CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

CARLA DICK DE CASTRO PINHO NOVO

PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE DIODOS PIN LATERAIS- TOPOLOGIAS, CARACTERÍSTICAS E PROPOSTA DE UMA NOVA CONFIGURAÇÃO

São Bernardo do Campo

2017

CARLA DICK DE CASTRO PINHO NOVO

PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE DIODOS PIN LATERAIS-TOPOLOGIAS, CARACTERÍSTICAS E PROPOSTA DE UMA NOVA CONFIGURAÇÃO

Tese de Doutorado apresentado ao Centro Universitário FEI, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, orientado pelo Prof. Dr. Renato Camargo Giacomini

São Bernardo do Campo

2017

Dick de Castro Pinho Novo, Carla.
PROJETO E CARACTERIZAÇÃO DE DIODOS PIN LATERAIS-TOPOLOGIAS, CARACTERÍSTICAS E PROPOSTA DE UMA NOVA CONFIGURAÇÃO / Carla Dick de Castro Pinho Novo. São Bernardo do Campo, 2017.
241 f. : il.

Tese - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Renato Camargo Giacomini.

1. PIN. 2. sensor de imagem. 3. eficiência quântica. 4. corrente de escuro. 5. diodo. I. Camargo Giacomini, Renato, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

centro universitário FEI

APRESENTAÇÃO DE TESE
ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica

Doutorado

PGE-10

Aluno: Carla Dick de Castro Pinho Novo **Matrícula:** 513304-6

Título do Trabalho: Projeto e caracterização de diodos PIN laterais-topologias, características e proposta de uma nova configuração.

Área de Concentração: Dispositivos Eletrônicos Integrados

Orientador: Prof. Dr. Renato Camargo Giacomini

Data da realização da defesa: 30/11/2017

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora

São Bernardo do Campo, 30 / 11 / 2017.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA	
Prof. Dr. Renato Camargo Giacomini	Ass.: _____
Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez	Ass.: _____
Prof. Dr. Aparecido Sirley Nicolett	Ass.: _____
Prof. Dr. Genaro Mariniello da Silva	Ass.: _____
Prof.ª Dr.ª Sara Dereste dos Santos Perseghini	Ass.: _____

A Banca Examinadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA TESE

ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

_____

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

_____

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Dedico este trabalho à minha família que me proporcionou a paz necessária para seguir em frente com afinco nas minhas pesquisas.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Renato Camargo Giacomini, meu orientador, por ter confiado no meu potencial, ajudando no meu trabalho e dando autonomia para a sua realização.

À amiga Arianne Pereira, pela sua generosidade contagiante, pela sua constante alegria e pela ajuda em todos os momentos.

Aos amigos Renato Zapata, Vinicius Schnabel, Rudolf Buhler e João Baptista pelas grandes discussões compartilhadas.

Aos amigos do grupo de pesquisa André Perin, Pedro Benko e Cleiton pela parceria nos trabalhos realizados em conjunto com os quais pude avançar em meu aprendizado e desenvolvimento.

Aos demais amigos Bruna, Ligia, Thales, Rafael, Genaro e Juliana pelo compartilhamento de experiências, medos, expectativas e pelas simples conversas nos momentos de descontração.

Aos professores do grupo IED Dr. Marcelo Antonio Pavanello, Dra. Michelly de Souza, Dr. Salvador Pinillos Gimenez e Dr. Rodrigo Doria pelo conhecimento e experiência compartilhados.

Ao meu marido Fábio, por estar ao meu lado dando suporte e carinho durante esses anos.

Ao meu pai Alberto, minha mãe Lizete, meus irmãos Junior e Renato e minhas tias Lenice e Beth, pelo amor, fé e por sempre acreditarem na minha capacidade.

Aos meus quatro filhos queridos, Isabella, Pedro, João e Tiago, pela paciência durante os períodos de minha ausência.

Ao Centro Universitário da FEI, por oferecer a infraestrutura necessária para a realização dessa pesquisa.

Ao CNPq e Capes pelo apoio financeiro indispensável para a realização deste trabalho.

A tantas outras pessoas, que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho e que, de forma involuntária foram aqui omitidos.

"Estuda.- Estuda com empenho.- Se tens de ser sal e luz, necessitas de ciência, de idoneidade.

Ou julgas que por seres preguiçoso e comodista, hás de receber ciência infusa?".

São Josemaría Escrivá (BALAGUER, 1939)

RESUMO

A exploração científica e tecnológica no campo da óptica é atualmente limitada pela capacidade de detecção do sensor utilizado. Basicamente, estes fotodetectores são compostos por elementos sensíveis à radiação eletromagnética, que deveriam converter, com grande eficiência, um sinal óptico em um sinal elétrico. Entretanto, ainda existem lacunas de conhecimento no que diz respeito ao funcionamento dos detectores ópticos. Este trabalho consiste na análise profunda das características dos diodos PIN de silício em diferentes tecnologias, os quais são largamente utilizados como detectores ópticos em escala comercial pela indústria de semicondutores. Os diodos PIN laterais são compostos por uma região P+ e uma região N+, intercaladas por uma região intrínseca e são utilizados principalmente em sistemas de imagem em geral, sistemas de comunicações ópticas e sistemas para aplicações especiais, tais como indústria médica, indústria do meio ambiente, indústria de petróleo e gás, indústria de segurança, indústria automotiva, indústria espacial e bélica, entre outras. Além disso, também podem ser utilizados para determinar o comprimento de onda e a intensidade da radiação eletromagnética incidente em um sistema óptico. Para o bom uso nessas aplicações, é importante a análise mais profunda dos detectores de radiação eletromagnética PIN, operando em ambientes hostis, tais como temperaturas extremas e a utilização de terminais de controle para melhorar o seu desempenho. O foco deste trabalho é a análise da eficiência quântica, responsividade e relação sinal-ruído dos detectores sujeitos à variação de temperatura, em diferentes aplicações e tecnologias de fabricação. Para que isto seja possível, alguns fotodiodos foram desenvolvidos integralmente para este trabalho, desde a elaboração do leiaute, até a sua fabricação e caracterização experimental através da emissão óptica de *LEDs* (Light Emiting Diodes), utilizando um microespectômetro que opera na faixa de 350 a 800nm. A análise foi dividida pelo tipo de aplicação requerida, já que o processo tecnológico envolvido é diferente para cada aplicação. Para os sensores de imagem foi demonstrado que a maior responsividade alcançada foi de 0,45 A/W para o vermelho e 0,035 A/W para o azul em temperatura ambiente. Já em altas temperaturas (T=500K), o dispositivo atingiu 0,77 e 0,052 A/W para o vermelho e azul, respectivamente. Já para o caso de aplicações especiais, a utilização da tecnologia *SOI* (Silicon On Insulator) apresentou-se como alternativa muito favorável, pois fornece a possibilidade de utilização do *back-gate* (porta traseira), cuja análise em conjunto com a variação da temperatura, foi inovadora na comunidade científica. No caso de baixas temperaturas (T=100K), a melhor condição de polarização é no modo de inversão,

chegando a atingir 37,5% de eficiência com V_{BG} de +6V. No caso de temperaturas superiores a 300K, a melhor condição é no modo acumulação, chegando a uma eficiência de 61,9% para T=300K e 84,52% para T=500K (ambas com V_{BG}=-2V). Através de toda a análise desenvolvida, foi possível propor um projeto de dispositivo inovador, o qual foi chamado de diodo PG-PIN (Partially-Gated PIN Diode), que consiste em um diodo PIN lateral com porta parcial adjacente à região N+. A polarização do terminal de porta funciona como um sinal de controle capaz de alterar a resposta do dispositivo, resultando na determinação do comprimento e intensidade da radiação eletromagnética incidente. Este dispositivo é capaz de substituir a utilização de filtros de cor em um sistema óptico, fazendo com que o sistema seja mais vantajoso economicamente e com melhor desempenho.

Palavras chave: PIN. Diodo. Fotocorrente. Eficiência. Temperatura. Polarização.

ABSTRACT

The scientific and technological research in the field of optics is currently limited by the ability of the used detector. Basically these photodetectors are composed of elements sensitive to electromagnetic radiation, which should convert in a very efficient way, an optical signal into an electrical signal. However, there are still gaps in knowledge regarding the operation of the optical detectors, since most of the studies in microelectronics have been directed to the transistor and not to these devices. Thus, this work is a deep study of the characteristics of silicon PIN diodes on different technologies, since they are widely used as optical detectors on a commercial scale by the semiconductor industry. The PIN diodes are composed of a P + region and a N+ region, interleaved by an intrinsic region and are mainly used in image systems in general, optical communication systems and systems for special applications such as medical industries, environmental industries, oil and gas industry, the security industry, automotive, space and defense industry, among others. In addition, they can also be used to determine the incident wavelength and intensity of electromagnetic radiation on an optical system. Therefore, it is urgent to deeper analysis of PIN electromagnetic radiation detectors, especially operating in hostile environments, which present extreme temperatures, and control signals to improve their performance. The focus of this study was to analyze the efficiency, signal to noise ratio and responsivity of detectors subject to changes in temperature in different applications and technologies. The devices were characterized experimentally by means of the optical emission of LEDs, using a microespectometer, which operates in the range 350 to 800nm. The analysis was divided by the required type of application, since the involved technological process is different for each application. For image sensors has been shown that the highest responsivity was 0.45A/W for red light and 0,035A/W for blue light at room temperature. For higher temperature (500K), the responsivity was found to be 0,77A/W and 0,052A/W for red and blue, respectively. As for the case of special applications, the use of SOI technology has presented itself as a very favorable alternative because it provides the possibility of using the *back-gate* together with the back-gate, whose analysis was never done before. In the case of lower temperatures (T = 100K), the best polarization condition is the inversion mode, reaching 37.5% efficiency with + 6V V_{BG}. In the case of temperatures above 300K, the best condition is in accumulation mode,

reaching an efficiency of 61.9% for T = 300K and 84.52% for T = 500K (both with V_{BG} = -2V).

Throughout the developed analysis, it was possible to propose an innovative device design, which was called Right Gate, which consists of a lateral PIN diode with a gate terminal adjacent to the N + region. The gate terminal polarization functions as a control signal capable of altering the response of the device, resulting in the determination of the length and intensity of the incident electromagnetic radiation. This device is able to replace the use of color filters in an optical system, making the system more economically advantageous and with better performance.

Keywords: PIN. Diode. Photocurrent. Efficiency. Temperature. Polarization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de telescópios refrativos. 28
Figura 2 - O Espectro eletromagnético 30
Figura 3 - Espectro eletromagnético visível ao homem 30
Figura 4 - Uma onda eletromagnética representada por um raio de duas frentes de onda 31
Figura 5 – Representação do comprimento de onda (λ) 31
Figura 6 – Reflexão e refração de um raio luminoso numa interface dielétrica. 33
Figura 7 – Banda de valência e condução em um metal (A) e em um semicondutor ou isolante (B). 36
Figura 8 – Nível de condução e valência no espaço real 37
Figura 9 – Bandas de energia. 38
Figura 10 – "Salto" de um elétron do nível de energia permitido para a banda de condução. . 40
Figura 11 – Movimento dos elétrons. 42
Figura 12 – Resistividade do silício a T=300K em função da concentração de impurezas dopantes 44
Figura 13 – Processo de foto excitação direto e indireto 46
Figura 14 – Coeficiente de absorção para o germânio, silício e GaAs 47
Figura 15 – Profundidade de penetração do silício em função do comprimento de onda 48
Figura 16 – Recombinação através dos centros de recombinação 50
Figura 17 – Junção PN e a sua simbologia 51
Figura 18 – Diagrama de banda de energia em regiões do tipo N e P separadamente 52
Figura 19 – Diagrama de bandas da junção PN 52
Figura 20 – Criação da região de depleção por difusão de lacunas e elétrons 53
Figura 21 – Modelo Físico de uma junção PN abrupta com N_A diferente de N_D: A) Densidade de cargas. B) Campo elétrico. C) Potencial elétrico. 54
Figura 22 – Correntes de difusão, geração e recombinação em uma junção real 56
Figura 23 – Dispositivo PIN. 57
Figura 24 – Variação da concentração intrínseca de portadores e da largura de faixa proibida do silício em função da temperatura 60
Figura 25 – Variação do potencial de Fermi e da porcentagem de impurezas ionizadas com a temperatura para diversas concentrações de dopantes. 61
Figura 26 – Quadro geral de análise dos fotodiodos PIN 69

Figura 27 – Leiaute básico de um sensor de imagem CMOS 70
Figura 28 – Receptor óptico 71
Figura 29 – Sistema para medição de concentração de DNA 72
Figura 30 – Tipos básicos de fotodiodos em tecnologia CMOS: P+/Nwell, N+/P_{SUB} e Nwell/P_{SUB} 73
Figura 31 – Fotodiodo tipo PIN vertical 74
Figura 32 – Fotodiodo PIN lateral circular 75
Figura 33 – Fotodiodo finger em Nwell em tecnologia CMOS convencional de 0,35µm 76
Figura 34 – Fotodiodo do tipo schottky 77
Figura 35 – Fotodiodo com terminal de porta 78
Figura 36 – Fotodiodo lateral PIN SOI 79
Figura 37 – Fotodetector SOI do tipo metal-semicondutor-metal (trincheira). 81
Figura 38 – Ilustração da rugosidade da camada de silício utilizado para aumentar a responsividade 81
Figura 39 – Visão esquemática do fotodetector SOI RCE 82
Figura 40 – Dispositivo PIN SOI lateral com iluminação lateral. 83
Figura 41 – Estrutura esquemática de um fotodiodo PN com ressonância de plasma. 84
Figura 42 – Fotos de equipamentos utilizados para obtenção das curvas experimentais: (A) Analisador de parâmetros Keithley 4200 SCS e micro-refrigerador modelo K20 da MMR Technologies e (B) microprovador Cascade Microtech REL 3600. 89
Figura 43 - Esquema de aquisição de dados dos diodos PIN com iluminação e controle de temperatura. 90
Figura 44 – Esquema de montagem para medição e análise da potência óptica incidente. 91
Figura 45 – Corte transversal de um fotodiodo PIN em tecnologia CMOS 92
Figura 46 – Diodo PIN lateral A) Foto do dispositivo com 10 dedos B) Esquema do dispositivo multifinger. 93
Figura 47 – Corrente total entre anodo e catodo em função da tensão de anodo para diferentes potências ópticas incidentes com m=10, iluminado com luz vermelha, azul e infra-vermelho (IV) (experimental). 95
Figura 48 – A região de depleção em fotodiodos PIN CMOS 96
Figura 49 – Corrente total em função da potência óptica incidente com m=10, iluminado com luz azul e vermelha (experimental). 97

Figura 50 – Corrente total em função da tensão de anodo para diferentes potências ópticas incidentes com m=10, iluminado com luz UV para dispositivos com áreas diferentes (experimental). 98
Figura 51 – EQ_T em função de λ para o fotodiodo PIN CMOS BULK com diferentes $L_{P,N}$ (simulado) 100
Figura 52 – Corte transversal esquemático de um diodo PIN CMOS a) Com $L_{P,N}$=0,34µm (m=28); B) Com $L_{P,N}$=1,36µm (m=20). 100
Figura 53 – Eficiência quântica total em função do comprimento de onda para quatro dispositivos com mesma área total em T=300K (experimental). 101
Figura 54 – Responsividade dos fotodiodos em função de L_I para a luz vermelha e azul em T=300K (experimental). 102
Figura 55 – Responsividade normalizada dos fotodiodos em função de L_I para a luz vermelha e azul em T=300K (experimental). 103
Figura 56 – Corrente de escuro em função de V_D para o dispositivo com L_I=5,75µm para várias temperaturas (experimental). 105
Figura 57 – Corrente de escuro em função da temperatura para o dispositivo com L_I=5,75µm para vários valores de tensão de anodo (experimental). 105
Figura 58 – Corrente de escuro em função de L_I para os fotodiodos PIN CMOS BULK (simulado). 106
Figura 59 – Corte lateral do fotodiodo PIN CMOS com 5 dedos (simulado). 107
Figura 60 – Corte lateral do fotodiodo PIN CMOS com 20 dedos (simulado). 108
Figura 61 – Corrente total em função da tensão de anodo para diferentes temperaturas para o dispositivo com L_I=5,75µm (experimental). 108
Figura 62 – Corrente total em função da tensão de anodo para três diferentes temperaturas para o dispositivo com L_I=5,75µm A) Vermelho, B) Azul (experimental). 109
Figura 63 – Corrente normalizada pelo seu valor em temperatura ambiente em função da temperatura com V_D=-1V e L_I=5,75µm para: A) Corrente de escuro, B) Corrente fotogerada (experimental). 111
Figura 64 – Relação Sinal- Ruído (SNR) em função da temperatura para dois comprimentos de onda (azul e vermelho) (experimental). 112
Figura 65 – Responsividade em função da temperatura para vermelho e azul com duas diferentes potências ópticas incidentes (experimental). 113

Figura 66 – Esquemático do fotodiodo PIN SOI.....116
Figura 67 – Fotografia do fotodiodo PIN SOI.....116
Figura 68 – Módulo da corrente de escuro em função de V_D para o diodo PIN em tecnologia SOI e BULK. (simulado).....118
Figura 69 – Corrente fotogerada em função da tensão aplicada para fotodiodo PIN CMOS SOI e BULK com diferentes $t_{P,N}$ e t_{SI} para iluminação de λ=400nm. (simulado).....119
Figura 70 –Corrente fotogerada em função de V_D para fotodiodos PIN CMOS SOI e BULK com λ=400nm e diferentes valores de $N_{I.}$ (simulado).....120
Figura 71 – Refletividade do fotodiodo PIN CMOS BULK em função de λ para diferentes reflexões (simulado).....122
Figura 72 – Estrutura multi-camada de um dispositivo SOI.....122
Figura 73 – Refletividade do fotodiodo PIN CMOS SOI em função de λ para diferentes reflexões (simulado).....124
Figura 74 – Figura esquemática de um fotodiodo PIN CMOS BULK com 3 dedos.....125
Figura 75 – Figura esquemática de um fotodiodo PIN CMOS SOI com 3 dedos.....125
Figura 76 – Eficiência quântica total de um fotodiodo PIN CMOS SOI em função de L_I para três comprimentos de onda. (simulado).....127
Figura 77 – Eficiência quântica interna e PABS/PIN de um fotodiodo PIN CMOS SOI em função de LI. (simulado).....129
Figura 78 – EQ_T em função de λ para o fotodiodo PIN CMOS SOI com diferentes $L_{P,N.}$ (simulado).....130
Figura 79 – Corrente de escuro em função de L_I para os fotodiodos PIN CMOS SOI (simulado).....131
Figura 80 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI em função da temperatura para diferentes comprimentos de onda (simulado).....132
Figura 81 – Corrente total do fotodiodo normalizada pelo seu valor em temperatura ambiente em função de λ, para o fotodiodo PIN CMOS SOI em diferentes temperaturas. (simulado).....133
Figura 82 – Corrente total do fotodiodo normalizada pelo seu valor em temperatura ambiente em função de λ, para o fotodiodo PIN CMOS SOI com m=10 e m=30 (simulado).....134
Figura 83 – Largura da faixa proibida em função de x para duas temperaturas no dispositivo PIN CMOS SOI SR m10. (simulado).....135

Figura 84 – Corrente total em função de V_D para dois dispositivos com diferentes comprimentos de onda em T=300K. (experimental) 136
Figura 85 – Corrente total em função de V_D para: A) Dispositivo iluminado com λ=397nm e B) Dispositivo sem iluminação em T=300K. (experimental) 138
Figura 86 – Corrente de escuro e fotocorrente sob iluminação UV, medida em diferentes temperaturas, com λ=397nm, com V_{BG}=0V para L_I=8μm. (experimental) 138
Figura 87 – Corrente total do fotodiodo PIN SOI sob iluminação UV em função de V_{BG}, medida em diferentes temperaturas, com λ=397nm, para L_I=8μm. (experimental) 139
Figura 88 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI iluminado com λ=397nm em função de V_D (experimental). 140
Figura 89 – Corrente de escuro e corrente total normalizada pelo seu valor em 300K em função da temperatura. (experimental) 141
Figura 90 – Relação sinal-ruído em função da temperatura para várias tensões de *back-gate*. (experimental) 141
Figura 91 – Relação sinal-ruído normalizada pelo seu valor com V_{BG}=0V, em função da temperatura para V_D=-0,5V (experimental) 142
Figura 92 – Relação sinal-ruído normalizada pelo seu valor com V_{BG}=0V, em função de V_{BG} para três temperaturas de operação (experimental) 143
Figura 93 – Eficiência quântica total em função da temperatura para diferentes valores de V_{BG} para o dispositivo com L_I=8μm; V_D=-1,5V, λ=397nm e P_{IN}=0,55μW. (experimental) 144
Figura 94 – Corrente de escuro em função da tensão de anodo medida em diferentes temperaturas para V_{BG}=-5V. (experimental) 146
Figura 95 – Corrente fotogerada em função da tensão de anodo medida em diferentes temperaturas para dois valores de V_{BG}=-5V. (experimental) 146
Figura 96 – Corrente de escuro em função da tensão de porta traseira medida em diferentes temperaturas para V_D=-1V. (experimental) 147
Figura 97 – Corrente de escuro em função da tensão de porta traseira medida em diferentes temperaturas para V_D=-1V. (experimental) 148
Figura 98 – Corrente fotogerada em função da tensão de porta traseira medida em duas temperaturas para diferentes valores de V_D. (experimental) 149
Figura 99 – Relação sinal-ruído em função da temperatura com λ=397nm, medida para: A) $|V_{BG}|$=6V; B) $|V_{BG}|$=9V; C) $|V_{BG}|$=12V e D) $|V_{BG}|$=15V (experimental) 150

Figura 100 – Eficiência quântica total em função da temperatura para diferentes modos de operação. (experimental) 151
Figura 101 – Eficiência quântica total em função da temperatura para diferentes modos de operação. (experimental) 151
Figura 102 – Concentração de elétrons e lacunas em função da profundidade de silício para diferentes valores de V_{BG}, em T=300K e V_D=-1V no escuro. (simulado) 153
Figura 103 – Fotocorrente normalizada em função de V_{BG} para diferentes concentrações intrínsecas e V_D com λ=400nm, T=300K e L_I=8µm. (simulado) 153
Figura 104 – Relação sinal-ruído em função de V_{BG} para diferentes concentrações intrínsecas com λ=400nm e L_I=8µm. (simulado) 154
Figura 105 – Relação sinal-ruído em função da temperatura para diferentes concentrações intrínsecas e V_{BG} com λ=400nm e L_I=8µm. (simulado) 155
Figura 106 –Fotocorrente e corrente de escuro em função de V_{BG} para diferentes espessuras da camada de silício com λ=400nm em: A) T=500K e B) T=300K. (simulado) 156
Figura 107 – Relação sinal-ruído em função da temperatura para diferentes espessuras de silício e V_{BG} com λ=400nm e L_I=8µm. (simulado) 157
Figura 108 – Esquemático do fotodiodo PIN SOI em tecnologia 0,13µm 160
Figura 109 – A) Fotografia de todos os diodos do chip. B) Fotografia do fotodiodo PIN SOI com 22 dedos em tecnologia de 0,13µm 160
Figura 110 – Corrente de escuro em função da tensão de anodo para o dispositivo em tecnologia 0,13µm com L_I=1µm e V_{BG}=0V (experimental) 161
Figura 111 – Corrente de escuro em função da tensão de porta traseira para o dispositivo em tecnologia 0,13µm com L_I=1µm e V_D=-0,5V (experimental) 162
Figura 112 – Concentração de lacunas e elétrons em função da profundidade do filme de silício para o fotodiodo PIN CMOS SOI com L_I=1µm e V_D=-0,5V (simulado) 163
Figura 113 – Corrente de escuro em função da tensão de porta traseira para o dispositivo em tecnologia 0,13µm com L_I=1µm e dois valores de V_D (experimental) 164
Figura 114 – Corrente total em função da tensão de anodo para o dispositivo em tecnologia 0,13µm com L_I=1µm para três valores de temperatura (experimental). 165
Figura 115 – Corrente de escuro em função da tensão de anodo para o dispositivo em tecnologia 0,13µm com L_I=2µm para dois valores de V_{BG} (experimental). 166

Figura 116 – Corrente de escuro em função da tensão de anodo para o dispositivo em tecnologia 0,13µm com L_I=1µm e 100µm para dois valores de V_{BG} (experimental). ... 166
Figura 117 – Modelo elétrico do fotodiodo para: A) V_{BG} positivo e B) V_{BG} negativo. 167
Figura 118 – Corrente total normalizada pelo número de dedos (m) para dois dispositivos (L_I=100µm e L_I=5µm) em T=500K (experimental). 169
Figura 119 – Esquema de corte na estrutura do fotodiodo SOI (simulado). 170
Figura 120 – Taxa de geração nas estruturas de fotodiodo PIN SOI: A) V_{BG}= -15V, B) V_{BG}= -7V, C) V_{BG}= -5V, D) V_{BG}= -3V, E) V_{BG}= -1V, F) V_{BG}= +3V e G) V_{BG}= +15V. (simulado). 171
Figura 121 – Densidade de corrente total em inversão (simulado). 172
Figura 122 – Densidade de corrente total em acumulação (simulado). 172
Figura 123 – Razão entre as correntes de inversão e de acumulação em função do tempo de vida das lacunas para L_i=100µm em T=500K, iluminado com λ=376nm (simulado). .. 174
Figura 124 – Razão entre as correntes de inversão e de acumulação em função do tempo de vida dos elétrons para L_I=100µm em T=500K, iluminado com λ=376nm (simulado). . 175
Figura 125 – Corrente total em função de V_{BG} para L_I=1µm e L_I=10µm em T=300K, iluminado com λ=376nm (experimental). 176
Figura 126 – Densidade de corrente dos portadores minoritários em acumulação para L_I=1µm em T=300K com V_{BG}=-20V (simulado). 177
Figura 127 – Densidade de corrente dos portadores minoritários em inversão para L_I=1µm em T=300K com V_{BG}=+20V (simulado). 177
Figura 128 – Densidade de corrente dos portadores minoritários em inversão para L_I=1µm em T=300K com V_{BG}=+20V (simulado). 178
Figura 129 – Corrente de escuro em função de L_I para acumulação e inversão em três diferentes temperaturas. (experimental). 179
Figura 130 – Esquema de fotodiodo multifinger SOI 180
Figura 131 – Esquema de fotodiodo multifinger SOI com RDD vertical em inversão. 181
Figura 132 – Corrente fotogerada em função da temperatura para vários dispositivos em inversão (experimental). 182
Figura 133 – Corrente fotogerada em função da temperatura para vários dispositivos em acumulação (experimental). 183

Figura 134 – Eficiência quântica total em função de L_I para duas temperaturas em acumulação e inversão (experimental). 185
Figura 135 – Relação sinal ruído em função da temperatura com diferentes V_{BG} no dispositivo com L_I=1µm (experimental). 186
Figura 136 – Relação sinal ruído em função da temperatura com diferentes V_{BG} no dispositivo com L_I=100µm (experimental). 186
Figura 137 – Relação sinal ruído normalizada por T=300K em função da temperatura para: A) V_{BG}=-15V e B) V_{BG}=+15V (experimental). 187
Figura 138: Curva de sensibilidade das células cone. 190
Figura 139: Intensidade das cores base utilizadas para reproduzir todo o espectro visível. .. 191
Figura 140: o filtro *Bayer* para separação de cores 194
Figura 141: Foveon X3 195
Figura 142: O dispositivo TFD 196
Figura 143 – Diferentes dispositivos construídos em tecnologia IBM 0,13um: A) Right Gate, B) Left Gate, C) Center Gate, D) Dual Gate, E) Full Gate e F) No Gate. 198
Figura 144 – Leiaute dos dispositivos no software *IC Station*. 199
Figura 145 – Corrente do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de anodo sem contato de corpo (experimental). 200
Figura 146 – Corrente do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de anodo com contato de corpo (experimental). 201
Figura 147 – Esquema do dispositivo com contato de corpo 201
Figura 148 – Corrente de anodo do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de catodo sem iluminação (experimental). 202
Figura 149 – Corrente de anodo do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de catodo (experimental). 203
Figura 150 – Corrente de anodo do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de porta para duas potência ópticas de azul diferentes (experimental). 204
Figura 151 – Corrente de anodo do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de porta para diferentes polarizações de catodo (experimental). 205
Figura 152 – Relação entre as correntes de anodo do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de porta para diferentes comprimentos de onda (experimental). 206
Figura 153 – Região de Depleção no dispositivo Right-Gate 208

Figura 154 – Corrente de anodo em função da tensão de catodo para o dispositivo Right-Gate com diferentes polarizações de porta (experimental) 208
Figura 155 – Corrente de catodo em função da tensão de porta para o dispositivo Right-Gate com duas polarizações de catodo (experimental) 209
Figura 156 – Corrente de catodo em função da tensão de porta para o dispositivo Right-Gate com várias polarizações de catodo (UV) (experimental) 210

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Banda de energia para diversos materiais semicondutores.....48
Tabela 2 – Principais dimensões e parâmetros dos dispositivos em tecnologia AMI 0,35µm.92
Tabela 3 –Dispositivos multi-dedos em tecnologia AMI 0,35µm. 93
Tabela 4 – Razão das correntes obtidas com potência óptica incidente de 0,28µW em relação a potência de 0,14µW para o azul e vermelho (L_I= 5,75µm e V_D=-1V).....110
Tabela 5 – Principais parâmetros do fotodiodo SOI em tecnologia 2µm da UCLouvain.....115
Tabela 6 – Comprimentos da região de depleção em função de N_I 120
Tabela 7 – Principais dimensões dos dispositivos multi-finger 125
Tabela 8 –Valores da RDD dos dispositivos multi-finger.....126
Tabela 9 –Valores da RDD total dos dispositivos multi-finger.....127
Tabela 10 – Razão de (SNR_{500K}/SNR_{300K}); ($EQ_{T\ 500K}$/ $EQ_{T\ 300K}$); ($I_{PH\ 500K}/I_{PH\ 300K}$); ($I_{DARK\ 500K}/I_{DARK\ 300K}$), para L_I=8µm, V_D=-1,5V, λ=397nm e P_{IN}=0,55µW 145
Tabela 11 – Razão da fotocorrente e corrente de escuro para V_{BG}=+10V e V_{BG}=-10V 148
Tabela 12 – Principais parâmetros do fotodiodo SOI em tecnologia 0,13 µm da ST Microelectronics. 159
Tabela 13 – Principais dimensões do fotodiodo SOI em tecnologia 0,13 µm da ST Microelectronics. 159
Tabela 14 – Valores de RDD total dos dispositivos multi-finger.....180
Tabela 15 – Principais parâmetros dos diodos em tecnologia IBM 0,13µm.....196
Tabela 16 –Responsividade dos dispositivos Full Gate. 207

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{FS}	Área fotossensível do dispositivo [m^2]
A_T	Área total do dispositivo [m^2]
B	Campo magnético [T]
B	Largura de banda [Hz]
c	Velocidade de propagação da luz no vácuo [3 x 10^8 m/s]
d	Largura da região de depleção total [m]
D_N	Coeficiente de difusão de elétrons [cm^2/s]
dn	Largura da região de depleção do lado n [m]
D_P	Coeficiente de difusão de lacunas [cm^2/s]
dp	Largura da região de depleção do lado p [m]
dx	Comprimento da região de depleção lateral [m]
dy	Comprimento da região de depleção vertical [m]
ε	Campo elétrico transversal [V/m]
E	Energia do fóton [eV]
E_a	Energia de ativação de dopante tipo aceitador [eV]
E_C	Mínima energia da banda de condução [eV]
E_d	Energia de ativação de dopante tipo doador [eV]
E_F	Energia do nível de Fermi [eV]
E_{FN}	Energia do nível de Fermi para semicondutor do tipo N [eV]
E_{FP}	Energia do nível de Fermi para semicondutor do tipo P [eV]
E_g	Band gap ou lacuna de energia [eV]
E_i	Energia do nível intrínseco de um semicondutor [eV]
EQ_E	Eficiência quântica externa de um fotodetector [adimensional]
EQ_I	Eficiência quântica interna [adimensional]
EQ_T	Eficiência quântica total de um fotodetector [adimensional]
E_V	Máxima energia da banda de valência [eV]
f	Frequência [Hz]
F_N	Fluxo de elétrons [C/s]
f_1	Frequência mínima de corte[Hz]
f_2	Frequência máxima de corte[Hz]

$G_{N,P}$	Taxa de geração de pares elétron-lacuna originada por fontes externas de energia [$cm^{-3}.s^{-1}$]
$G_{(óptica)}$	Taxa de geração extrínseca de portadores [$cm^{-3}.s^{-1}$]
h	Constante de Planck [eV.s]
I_D	Corrente total de uma junção PN [A]
I_{DARK}	Corrente de escuro [A]
I_{DISP}	Corrente disponível no dispositivo sem recombinação [A]
IDR	Illuminated to dark ratio [adimensional]
$I_{FG\ (max)}$	Corrente fotogerada máxima [A]
I_{FG}	Corrente gerada pela incidência de luz [A]
I_T	Corrente total [A]
I_{Tder}	Corrente total de deriva [A]
I_{Tdif}	Corrente total de difusão [A]
J	Densidade de corrente ideal [A/m^2]
J_N	Densidade de corrente de deriva de elétrons [A/m^2]
$J_{N(dif)}$	Densidade de corrente de difusão de elétrons [A/m^2]
J_P	Densidade de corrente de deriva de lacunas [A/m^2]
$J_{P(dif)}$	Densidade de corrente de difusão de lacunas [A/m^2]
J_{rg}	Densidade de corrente de geração e recombinação [A/m^2]
Js	Densidade de corrente de saturação [A/m^2]
$J_{T(N)}$	Densidade de corrente total de elétrons [A/m^2]
$J_{T(P)}$	Densidade de corrente total de lacunas [A/m^2]
k	Constante de Boltzman [$1{,}38066 \times 10^{-23}$ J/K]
k	Função de onda ou momento dos portadores [N.m]
k_m	Parte imaginária do índice de refração do meio m [adimensional]
L_{abs}	Profundidade de penetração da radiação luminosa [m]
L_{CAV}	Comprimento da cavidade de um fotodiodo convencional [m]
L_d	Comprimento da região depletada de um fotodiodo [m]
L_I	Comprimento da região intrínseca de um diodo PIN [m]
L_N	Comprimento de difusão de elétrons [m]
L_P	Comprimento de difusão de lacunas [m]
L_T	Comprimento total do dispositivo [m]

m	Quantidade de dedos do fotodiodo multi-finger [adimensional]
m_e^*	Massa efetiva do elétron [Kg]
m_h^*	Massa efetiva da lacuna [Kg]
n	Concentração de elétrons em um semicondutor intrínseco [cm^{-3}]
n_0	Concentração de elétrons em equilíbrio [cm^{-3}]
N_A	Concentração de dopantes do tipo P [cm^{-3}]
N_A^-	Quantidade de portadores aceitadores ionizados [cm^{-3}]
N_C	Densidade de estados da banda de condução [adimensional]
N_D	Concentração de dopantes do tipo N [cm^{-3}]
N_D^-	Quantidade de portadores doadores ionizados [cm^{-3}]
n_i	Concentração intrínseca de portadores [cm^{-3}]
N_I	Concentração de portadores da região intrínseca [cm^{-3}]
N_m	Índice de refração do meio m [adimensional]
n_m	Parte real do índice de refração do meio m [adimensional]
n_N	Concentração de elétrons num material tipo N [cm^{-3}]
n_P	Concentração de elétrons num material tipo P [cm^{-3}]
n_{PO}	Concentração de elétrons no equilíbrio dentro da região P [cm^{-3}]
N_V	Densidade de estados da banda de valência [adimensional]
N_{WELL}	Concentração de dopantes da cavidade do tipo N [cm^{-3}]
p	Concentração de lacunas em um semicondutor intrínseco [cm^{-3}]
p_0	Concentração de lacunas em equilíbrio [cm^{-3}]
P_A	Fração da potência luminosa absorvida [adimensional]
P_{Ai}	Potência absorvida por um meio em uma dada interface [adimensional]
P_{IN}	Potência luminosa incidente [W/cm^2]
p_N	Concentração de lacunas num material tipo N [cm^{-3}]
p_{NO}	Concentração de lacunas no equilíbrio dentro da região N [cm^{-3}]
p_P	Concentração de lacunas num material tipo P [cm^{-3}]
P_R	Fração da potência luminosa refletida [adimensional]
P_T	Fração da potência luminosa transmitida [adimensional]
P_{Ti}	Potência transmitida por um meio em uma dada interface [adimensional]
$P_{T(i+1)}$	Potência transmitida por um meio na interface seguinte [adimensional]
q	Carga elementar do elétron [$1,6 \times 10^{-19}$ C]

R	Refletividade [adimensional]
R	Responsividade [A/W]
s_n	Taxa de recombinação de superfície para elétrons [adimensional]
SNR	Relação sinal-ruído [adimensional]
s_p	Taxa de recombinação de superfície para lacunas [adimensional]
T	Temperatura [K]
t_{CAV}	Espessura da cavidade de um fotodiodo convencional [m]
t_{ox}	Espessura do óxido de passivação [m]
t_{oxb}	Espessura do óxido enterrado [m]
$t_{P,N}$	Profundidade da região difundida (P+ e N+) [m]
t_{si}	Espessura da camada de silício [m]
U	Taxa de geração-recombinação intrínseca total [$cm^{-3}.s^{-1}$]
$U_{(geração)}$	Taxa de geração intrínseca [$cm^{-3}.s^{-1}$]
$U_{(recombinação)}$	Taxa de recombinação intrínseca [$cm^{-3}.s^{-1}$]
$U_{N,P}$	Taxa de geração-recombinação intrínseca para elétrons e lacunas [$cm^{-3}.s^{-1}$]
U_T	Tensão térmica [V]
v	Velocidade de propagação da luz [m/s]
V_{BI}	Potencial de junção [V]
V_{BG}	Tensão de *back-gate* [V]
V_{CAT}	Tensão de catodo [V]
V_D	Tensão externa aplicada a uma junção PN [V]
v_{dN}	Velocidade de deriva dos elétrons [m/s]
V_G	Tensão de *gate* [V]
$v_{sat,e}$	Velocidade de saturação de elétrons [m/s]
$v_{sat,h}$	Velocidade de saturação de lacunas [m/s]
V_{TH}	Tensão de limiar [V]
W	Largura do dispositivo [m]
α	Coeficiente de absorção [m^{-1}]
ζ	Campo elétrico originado pelos íons da região de depleção [V/m]
η	Máxima eficiência alcançável [adimensional]
λ	Comprimento de onda [m]
λ_c	Maior comprimento de onda que pode ser absorvido pelo silício [m]

μ_0	Mobilidade dos portadores independentes do campo elétrico [m^2/V.s]
$\mu_{i,L}$	Mobilidade dos portadores devido ao espalhamento de rede [m^2/V.s]
$\mu_{i,DAP}$	Mobilidade dos portadores devido ao espalhamento por impurezas ionizadas, portador-portador e impurezas neutras [m^2/V.s]
μ_N	Mobilidade dos elétrons [m^2/V.s]
μ_P	Mobilidade das lacunas [m^2/V.s]
ρ	Resistividade de um semicondutor homogeneamente dopado [Ω.cm]
σ	Condutividade de um semicondutor homogeneamente dopado [$\Omega^{-1}.cm^{-1}$]
τ_e	Tempo de vida efetivo da geração térmica na região de depleção [s]
τ_N	Tempo de relaxação de elétrons [s]
τ_P	Tempo de relaxação de lacunas [s]
ε_{si}	Permissividade do silício [F/m]
Φ_F	Potencial de Fermi [V]

LISTA DE ABREVIATURAS

ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BGN	Band Gap Narrowing
BOX	Buried Oxide
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DBR	Distributed Bragg Reflector
DNA	Ácido Desoxirribonucléico
DVD	Digital Versatile Disc
HR	High Resistivity
IONIZ	Ionization
IV	Infravermelho
LED	Light Emitting Diode
MOS	Metal Oxide Semiconductor
RCE	Resonant Cavity Enhacement
RDD	Região de Depleção
SHI	Shirahata
SOI	Silicon On Insulator
SR	Standard Resistivity
SRH	Shockley Read Hall
TFA	Thin-Film-On-ASIC
UV	Ultra-Violeta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 22
1.1 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO 25
2 FUNDAMENTOS DA ÓPTICA 27
2.1 UMA VISÃO HISTÓRICA 27
2.2 DESCRIÇÃO QUALITATIVA DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA 30
2.3 DESCRIÇÃO CORPUSCULAR DA LUZ 32
2.4 REFLEXÃO, ABSORÇÃO E TRANSMISSÃO 33
3 FÍSICA DOS SEMICONDUTORES 35
3.1 BANDAS DE ENERGIA 35
3.2 TEORIA DA CONDUÇÃO ELÉTRICA 41
3.2.1 Corrente de deriva em um semicondutor 41
3.2.2 Corrente de difusão em um semicondutor 44
3.2.3 Relação de Einstein 45
3.3 FENÔMENOS DE GERAÇÃO E RECOMBINAÇÃO 45
3.3.1 Transições indiretas e diretas 46
3.3.2 Tipos de geração e recombinação 49
3.3.3 Recombinação SRH 49
3.4 JUNÇÃO PN 51
3.4.1 Junção PN não polarizada 51
3.4.2 Junção PN polarizada 54
3.4.3 Corrente de geração e recombinação (diodo não ideal) 55
3.5 FOTODIODO PIN 57
3.6 EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA 59
3.6.1 O efeito na concentração intrínseca e na ionização incompleta de portadores 59
3.6.2 O efeito na corrente de escuro 62
3.6.3 O efeito da variação da temperatura na mobilidade dos portadores 62
4 DESEMPENHO DOS FOTODETECTORES 65

4.1 EFICIÊNCIA QUÂNTICA 65
4.2 RESPONSIVIDADE 66
4.3 RELAÇÃO SINAL-RUÍDO 67
4.4 SENSIBILIDADE 67
4.5 VELOCIDADE DE RESPOSTA 68
4.6 DESEMPENHOS DOS FOTODIODOS PIN ANALISADOS NESSA TESE 68
5 TIPOS E APLICAÇÕES DE FOTODETECTORES 70
5.1 TECNOLOGIA CMOS CONVENCIONAL (BULK) 72
5.1.1 Fotodiodos convencionais (verticais) 73
5.1.2 Fotodiodos tipo PIN vertical 74
5.1.3 Fotodiodo PIN lateral circular 75
5.1.4 Fotodiodo PIN tipo finger 75
5.1.5 Fotodiodo de barreira Schottky 76
5.1.6 Fotodiodo Pin com porta 77
5.2 TECNOLOGIA CMOS SOI 78
5.2.1 Tipos de dispositivos SOI fotodetectores 79
5.2.2 Dispositivos no substrato 85
5.2.3 Dispositivos verticalmente integrados 85
6 MATERIAIS E MÉTODOS 87
6.1 O SIMULADOR ATLAS 87
6.2 MODELOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES 87
6.3 APARATO EXPERIMENTAL 88
7 RESULTADOS PARA SENSORES DE IMAGEM 92
7.1 INFLUÊNCIA DA POTÊNCIA ÓPTICA INCIDENTE E DO COMPRIMENTO DE ONDA 94
7.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA QUÂNTICA TOTAL 98
7.3 ANÁLISE DA RESPONSIVIDADE 101
7.4 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA 104
7.5 RESULTADOS PARCIAIS PARA SENSORES DE IMAGEM 113
8 RESULTADOS PARA SENSORES UTILIZADOS EM APLICAÇÕES ESPECÍFICAS 115

8.1 DISPOSITIVOS SOI EM TECNOLOGIA DE 2µM 115
8.1.1 Comparação entre dispositivos BULK e SOI 117
8.1.2 Estruturas multi-camadas 121
8.1.3 Influência da quantidade de dedos 124
8.1.4 Efeito da variação da temperatura 131
8.1.5 Resultados experimentais do fotodiodo PIN SOI em tecnologia de 2µm. 135
8.1.6 Análise da operação de fotodiodos SOI para tecnologias mais avançadas através de simulação. 152
8.1.7 Resultados Parciais para aplicações específicas em tecnologia de 2µm 157
8.2 DISPOSITIVOS SOI EM TECNOLOGIA DE 0,13µM 158
8.2.1 Influência da temperatura 160
8.2.2 Modelo elétrico equivalente 165
8.2.3 Análise da taxa de recombinação/geração de portadores 168
8.2.4 Influência do comprimento da região intrínseca na operação dos dispositivos 175
8.2.5 Análise das figuras de mérito 181
a) Análise da corrente fotogerada 181
8.2.6 Resultados Parciais para aplicações específicas em tecnologia de 0,13µm 187
9 RESULTADOS PARA SENSORES UTILIZADOS EM DISCRIMINAÇÃO DE CORES 189

9.1 A DISCRIMINAÇÃO DE CORES 189
9.1.1 Colorimetria 189
9.1.2 O sistema RGB 191
9.1.3 A discriminação de cores 193
9.1.4 Dispositivos discriminadores de cores 194
9.2 APRESENTAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DISCRIMINADORES DE CORES DESENVOLVIDOS NESTA TESE. 196
9.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA SENSORES UTILIZADOS NA DISCRIMINAÇÃO DE CORES 199
9.4 PEDIDO DE PATENTE 210
9.4.1 Objetivo 210
9.4.2 Introdução 210
9.4.3 Nossa proposta 211
9.4.4 Patentes relacionadas 212
9.5 RESULTADOS PARCIAIS PARA APLICAÇÕES EM DISCRIMINAÇÃO DE CORES 213
10 CONCLUSÕES 214
10.1 CONCLUSÕES DESTA TESE 214
10.2 PUBLICAÇÕES GERADAS DURANTE O PERÍODO DE DOUTORADO 216
REFERÊNCIAS 220
APÊNDICE A – EXEMPLO DE ESTRUTURA COM ÚNICO DEDO 229
APÊNDICE B – EXEMPLO DE ESTRUTURA MULTIFINGER 233

1 INTRODUÇÃO

O sentido da visão humana não existiria sem a luz (ZÍLIO, 2001). Ela tem sido usada pelo homem desde a sua existência, por exemplo, ao utilizar as mãos como uma forma de linguagem. Este é um tipo de comunicação óptica, uma vez que não pode ser realizado sem a luz. A informação é carregada entre o emissor e o receptor pela radiação eletromagnética. Os movimentos das mãos modificam, modulam a luz. O olho funciona como um dispositivo detector da mensagem, que é processada pelo cérebro (SOARES, 2005).

Neste sentido, a detecção da luz é um dos processos mais fundamentais na área da óptica. Em função do seu estudo ao longo da história, foram conquistados grandes avanços, como a demonstração do efeito fotoelétrico realizada por Einstein em 1905 (SZE, 1981) admitindo a natureza corpuscular da luz; ou a invenção da primeira máquina fotográfica em 1929 (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002) realizada pelo francês Joseph Nicéphore Niépce em que uma lâmina de cobre recebia um banho de iodo, sendo que a imagem era captada através de uma lente e revelada com mercúrio quente. Somente em 1990, foi desenvolvida, pela Kodak, a primeira câmera fotográfica digital (CAMPOS, 2008), que utilizava sensores *charge-coupled device* (CCD).

A exploração científica e tecnológica do campo da óptica é atualmente limitada pela capacidade do detector utilizado, pois a extração da informação de um sinal óptico remete quase que, universalmente, à criação de um correspondente sinal elétrico, sendo esta conversão responsabilidade do fotodetector (MARK, SILVANO, *et al.*, 2004). A capacidade de detectar a luz começa com a análise das propriedades ópticas e elétricas de diferentes materiais, sendo os semicondutores, aqueles que apresentam as melhores características. A partir de uma perspectiva física, a presença de níveis proibidos de energia comparativamente no mesmo nível à energia dos fótons, faz com que os materiais semicondutores sejam excelentes candidatos para detecção óptica (SZE, 1981).

Atualmente, o mercado opto eletrônico de silício está em rápida expansão. A tendência é a utilização da tecnologia MOS em substituição à CCD, pois permite a integração das funções de imagem e do processamento de sinais dentro de um único circuito integrado, reduzindo o custo e incluindo uma série de funcionalidades.

Os sensores de imagem MOS são compostos por elementos sensíveis à luz que, em função da intensidade luminosa incidente sobre eles, geram um sinal elétrico ou carga elétrica. Este tipo de sensor possui baixo consumo de energia, menor custo em relação à CCD, acesso aleatório de dados da imagem (WONG, 1997), mecanismos de leitura seletiva

(THEUWISSEN, 2001) e alta velocidade de imagem (HILLEBRAND, 2000). Todas estas características tornam a tendência da substituição da tecnologia CCD pela CMOS ainda mais evidenciada (HILLEBRAND, 2000).

O mercado de comunicação óptica também se desenvolveu ao longo das últimas décadas. Primeiramente, este tipo de tecnologia era utilizado para longa distância através de fibra óptica, na qual a utilização de materiais custosos como os módulos III-V (materiais da coluna 3 a 5 da tabela periódica) poderia ser permitida (AMBROZIAK, 1968). Entretanto, cada vez mais, havia necessidade de expandir e melhorar a comunicação óptica de curta distância, tal como a comunicação de chip para chip, ou mesmo dentro de um único chip para transferência de dados. Para tais aplicações, a utilização de materiais mais baratos, como o silício, se faz necessário, já que a solução necessita ser comercialmente viável em termos de custo (SASSON; SANCHES, 2009).

Devido ao fato do fóton, chamado de "partícula da luz" (ISHAK, 2003), descoberta por Einstein, não interagir de maneira significativa com outro fóton, eles podem propagar a informação que carregam de forma muito rápida. Por isso são indicados para realizar a comunicação entre os sistemas, ou mesmo dentro de um único *chip*. Pode-se dizer, portanto que, pelo menos nos próximos anos, o processamento de sinais continuará a ser feito eletronicamente e a comunicação opticamente (AFZALIAN; FLANDRE, 2003).

Por isso, nunca foi tão importante melhorar as taxas de processamento de sinais e de comunicação. Mas até recentemente, somente foi visado o escalamento dos transistores, na tentativa de integrar o maior número de funcionalidades dentro de um único *chip*. Entretanto, se a taxa de processamento de sinais está crescendo, a efetiva transferência de dados através de conexões elétricas não está aumentando tanto quanto a velocidade dos transistores. Atualmente, estas interconexões constituem o gargalo para aumentar a velocidade de todo um sistema (AFAZALIAN; FLANDRE, 2007).

Deste modo, para substituir as interconexões elétricas por ópticas, é necessário desenvolver um completo sistema óptico composto por um emissor e um receptor (o fotodetector), os quais devem estar integrados ao circuito eletrônico a fim de aumentar o desempenho e a velocidade, sem introduzir custos extras de fabricação (AMBROZIAK, 1968).

Neste contexto, os campos da medicina e do meio ambiente também fazem uso de fotodetectores, como na medição de concentração de ácido desoxirribonucleico (DNA) e proteínas, nas taxas de raios ultravioletas (UV), e ozônio (BULTEEL; FLANDRE., 2009). O mercado de armazenamento de dados ópticos, como por exemplo, o *digital versatile disc*

(DVD), também surgiu e se desenvolveu chegando ao padrão Blu-Ray (Blu Ray Disc), que permite uma maior capacidade de armazenamento e maior velocidade. Ou seja, em todas as aplicações mencionadas até aqui, como na câmera fotográfica, no DVD, no Blu-Ray e nos sistemas de comunicação óptica, o fotodetector é o dispositivo mais importante, pois é através dele que o sinal óptico se transformará em elétrico, sendo o mais utilizado na atualidade, o diodo PIN de silício, o qual é composto por uma região P+ e uma região N+, intercaladas por uma região praticamente intrínseca (SADIKU, 2002).

Atualmente há uma série de pesquisas que tratam especificamente de fotosensores e a sua topologia é dividida em três grandes grupos, definidos de acordo com a sua aplicação e com o comprimento de onda que utilizam: sistemas de imagem, sistemas de aplicações específicas e sistemas de discriminação de cores (AFZALIAN, 2006). Cada topologia requer um determinado desempenho, por exemplo, para o caso de fotodetectores utilizados em sistemas de imagem é importante que os dispositivos apresentem uma alta responsividade na faixa da radiação eletromagnética visível (AFZALIAN, 2006). Já para os dispositivos utilizados em aplicações específicas, uma alta eficiência quântica na faixa do ultravioleta e azul é importante (AFZALIAN, 2006). Em contrapartida, para fotodiodos utilizados como discriminadores de cores, é necessário incrementar a relação de correntes apresentada pelos diferentes comprimentos de onda da radiação luminosa (MCKELVEY, 1982).

Pode-se demonstrar que a responsividade de um fotodiodo lateral de sílicio *complementary metal oxide semiconductor* (CMOS) com comprimento de região intrínseca de 20µm já apresentada pela comunidade científica em (LUNARDI, 2015) no ano de 2015 atingiu 0,58 A/W para a radiação eletromagnética na faixa do vermelho e em (WOODWARD; KRISHNAMOORTHY, 1999) o dispositivo atingiu 0,04 A/W para o azul (ambos em temperatura ambiente). Ao levar-se em conta a eficiência quântica, em 2013, os autores de (INOKAWA, HIROAKI e ONO, 2013) apresentaram um dispositivo com eficiência de 37% para a faixa do ultravioleta e em (AFZALIAN, 2006) atingiu-se 62,3% para um dispositivo com comprimento intrínseco de 6µm (ambos com T=300K). Além disso, em 2017, Andrei Schmidt et al. em (ANDREI, STEFAN, *et al.*, 2017) debruçou-se sobre a análise do comportamento da corrente de escuro dos fotodiodos PIN SOI laterais desenvolvendo um modelo matemático para expressar tal figura de mérito.

Entretanto, nesses trabalhos não houve a análise conjunta dos efeitos da variação da temperatura, da mudança de comprimento intrínseco e da polarização de *back-gate*, tal como é proposto nesta tese. Por isso, ainda há lacunas de conhecimento no que diz respeito ao funcionamento dos fotodiodos, pois a maior parte dos estudos realizados em microeletrônica

foi direcionada ao transistor para obtenção de maior funcionalidade e desempenho dos circuitos integrados, em consonância com a Lei de Moore (MOORE, 1975).

Portanto é urgente a análise mais profunda dos detectores de radiação eletromagnética PIN, especialmente operando em ambientes hostis. A operação destes sensores, neste tipo de ambiente, tem ganhado importância em campos como na indústria de petróleo e gás, indústria de segurança (tais como monitoramento de incêndios), indústria automotiva, indústria espacial e bélica, entre outras. Desta forma, a expressão "ambiente hostil" pode relatar uma série de parâmetros, tais como, temperaturas extremas, alta pressão, ingresso de partículas, interferência eletromagnética, vibração e impacto físico (ZÍLIO, 2000).

A contribuição desta tese consiste em um estudo sobre as características dos detectores de radiação eletromagnética do tipo PIN, construídos em silício, demonstrando a sua adequação às diferentes aplicações mencionadas operando em ambientes hostis. Este objetivo é alcançado através de simulações numéricas e medidas experimentais, os quais permitiram identificar os fenômenos físicos e parâmetros tecnológicos de interesse, analisando os seus impactos no desempenho e no desenvolvimento do leiaute destes dispositivos.

1.1 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em onze capítulos, sendo que no primeiro é feita uma breve introdução a fim de demonstrar um panorama inicial da problemática a ser tratada e delimitar os objetivos. No segundo capítulo desta tese é feita uma revisão dos conceitos básicos da óptica moderna, incluindo uma revisão histórica, seguida da descrição qualitativa de radiação eletromagnética e a sua interação com a matéria, a fim de expor os fenômenos de reflexão, absorção e transmissão da luz.

No terceiro capítulo são introduzidos conceitos em relação à física dos semicondutores, representando apenas uma pequena parte da vasta literatura, sendo que apenas os assuntos pertinentes à operação dos dispositivos são incluídos aqui. Além disso, é apresentada uma breve discussão das junções p-n, bem como suas características relacionadas à geração-recombinação dentro da região de depleção. Também serão apresentadas as variações decorrentes da alteração da temperatura.

No quarto capítulo é apresentado o conceito de desempenho de fotodetectores e seus indicadores, tais como responsividade, eficiência quântica interna e total, além da sensibilidade.

No quinto capítulo são apresentadas as tecnologias CMOS convencional e *silicon on insulator* (SOI), bem como os fotodetectores de silício que representam o estado da arte atual. Além disso, são apresentados os dispositivos a serem analisados nesta tese: os diodos PIN.

No sexto capítulo é feita uma breve explanação sobre os materiais e métodos utilizados para obter as simulações e curvas experimentais.

Nos capítulos sete, oito e nove são apresentados os resultados obtidos para sensores de imagem, sensores utilizados em aplicações específicas e sensores utilizados para discriminar cores, além de serem incluídas as discussões pertinentes.

Finalmente no capítulo dez são apresentadas as conclusões obtidas ao longo do trabalho desenvolvido, através de comparações dos resultados encontrados nos capítulos anteriores e no capítulo onze são apresentadas as publicações geradas ao longo deste doutorado.

2 FUNDAMENTOS DA ÓPTICA

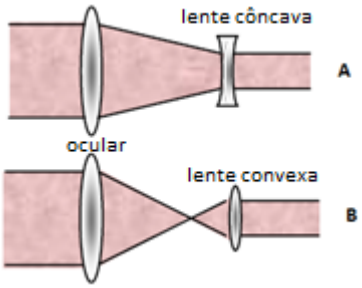
A óptica é o ramo da física que estuda a propagação da luz e a sua interação com a matéria (SASSON; SANCHES, 2009). Em muitas áreas da ciência e tecnologia, o entendimento de determinados conceitos pode ser difícil porque seus efeitos não são facilmente visualizados. Na óptica, entretanto, é possível a visualização de resultados de um experimento em função de vários parâmetros. Tendo em vista esta facilidade de visualização, neste capítulo será apresentada uma visão histórica da óptica e seus desenvolvimentos iniciais, para que a compreensão da relação óptica ondulatória versus corpuscular fique mais clara.

2.1 UMA VISÃO HISTÓRICA

Alguns aspectos que merecem destaque na óptica estão ligados às ideias sobre a natureza da luz e aos caminhos paralelos que a óptica e o eletromagnetismo trilharam ao longo da história durante séculos (ZÍLIO, 2000).

Antes do século XVII existia pouco embasamento teórico para os fenômenos ópticos observados. Eram conhecidos alguns elementos tais como lentes e espelhos, mas a teoria descrevendo seu princípio de funcionamento não estava sedimentada. A primeira grande revolução óptica ocorreu durante o século XVII, quando houve um desenvolvimento significativo da sua formulação matemática, o que possibilitou a previsão dos fenômenos observados até então. Foram introduzidos alguns sistemas ópticos como o telescópio refrativo (Figura 1-A), que foi utilizado por Galileo Galilei (1564-1642) (ZÍLIO, 2001), para descobrir as luas de Júpiter, os anéis de Saturno e a rotação do Sol. O telescópio com ocular convexa (ZÍLIO, 2000), mostrado na Figura 1-B, foi introduzido por Johannes Kepler (1571-1630), que o utilizou para fazer importantes observações astronômicas, que se tornaram conhecidas como as leis de Kepler. Nos dois tipos de telescópios, a lente objetiva (em refratores) ou espelho primário (em refletores), recolhe muita luz de um objeto distante e traz essa luz, ou imagem, para um ponto ou foco. Uma lente ocular leva a luz brilhante do foco da lente objetiva ou espelho primário e a “espalha” para ocupar uma grande parte da retina (WALKER, 2003).

Figura 1 - Tipos de telescópios refrativos.



Fonte: (ZÍLIO, 2000)

Legenda: A) Telescópio Galileano (ocular côncava) B) Telescópio Kepleriano (ocular convexa).

Logo depois, em 1609, foi inventado o microscópio e começou neste período a elaboração da formulação matemática que permite o cálculo da propagação dos raios. Em 1611, Kepler apresenta a lei de refração para pequenos ângulos, estabelecendo que os ângulos de incidência e refração sejam proporcionais. A lei de Snell foi deduzida pela primeira vez em 1637, por René Descartes (1596-1650), que lançou mão de uma formulação matemática baseada em ondas de pressão num meio elástico. Aparentemente, esta foi a primeira vez em que a luz foi tratada como onda (ZÍLIO, 2001).

O fenômeno de difração foi descoberto por Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), através da observação de bandas de luz na sombra de um bastão iluminado por uma pequena fonte. Em seguida, Robert Hooke (1635-1703) refez os experimentos de Grimaldi sobre difração e observou padrões coloridos de interferência em filmes finos. Ele concluiu, corretamente, que o fenômeno observado se devia à interação entre a luz refletida nas duas superfícies do filme e propôs que a luz se originava de um movimento ondulatório rápido no meio, propagando-se a uma velocidade muito grande (KNITTL, 1976).

Surgiam assim, as primeiras ideias da teoria ondulatória, ligadas às observações de difração e interferência que eram conhecidas no caso das ondas sobre uma superfície de águas calmas.

Contribuições relevantes para a óptica foram feitas por Isaac Newton (1642-1727). Em 1665 ele realizou experimentos de dispersão num prisma, que o levou à conclusão da composição espectral da luz branca. Também introduziu a teoria corpuscular que afirmava que "*a luz é composta de corpos muito pequenos, emitidos por substâncias brilhantes*". Nesta

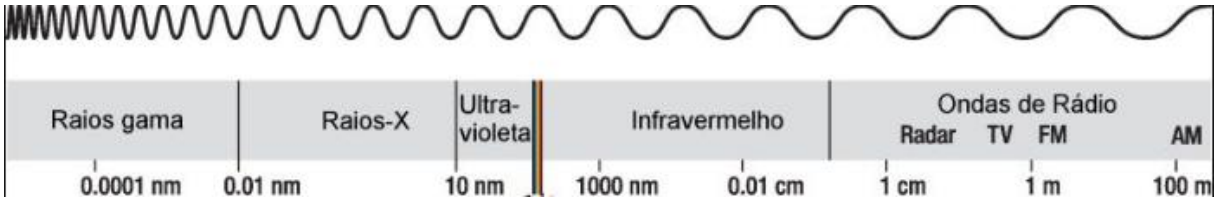
época Newton aceitava as duas teorias, tanto a corpuscular como a ondulatória (WALKER, 2003).

Independente da natureza corpuscular ou ondulatória da luz, um dado importante a ser obtido era sua velocidade de propagação. Muitos acreditavam que ela se propagava instantaneamente, com velocidade infinita. Porém, em 1676, Dane Ole Christensen Römer (1644-1710) sugeriu a medida da velocidade da luz pela verificação do intervalo entre eclipses da lua de Júpiter, que se move praticamente no mesmo plano que este planeta se move em torno do Sol (ZÍLIO, 2000). Durante o século XVIII acabou prevalecendo a teoria corpuscular, principalmente devido ao grande peso científico de Newton, que havia se inclinado na direção desta.

O início do século XIX presenciou o ressurgimento da teoria ondulatória. Entre 1801 e 1803, Thomas Young (1773-1829) propôs o princípio da superposição e com ele explicou o fenômeno de interferência em filmes finos. Devido ao peso científico de Newton e suas ideias sobre a teoria corpuscular, Young foi bastante criticado pela comunidade científica inglesa devido a estes trabalhos (ZÍLIO, 2000).

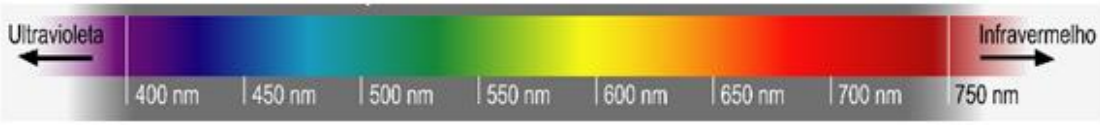
Enquanto isso, a eletricidade e o magnetismo desenvolviam-se paralelamente à óptica. Em 1845 foi feita a primeira ligação entre o magnetismo e a luz por Michael Faraday (1791-1867) que ficou conhecido como efeito Faraday, que consiste na rotação da polarização da luz quando esta passa por certos tipos de materiais submetidos a campos magnéticos intensos. Entretanto, o relacionamento completo entre a óptica e o eletromagnetismo só foi estabelecido por James Clerk Maxwell (1831-1879), que inicialmente introduziu a corrente de deslocamento e reescreveu, numa forma diferencial, as equações empíricas existentes na época. As expressões resultantes, hoje conhecidas como equações de Maxwell, foram combinadas e geraram uma equação de ondas para o campo eletromagnético. Com isto concluiu-se que a luz era uma onda transversal, de natureza eletromagnética. Esta descoberta foi ratificada pelo trabalho de Heinrich Rudolf Hertz (1857- 1894), que em 1888 produziu e detectou ondas longas através de uma antena. Hoje, sabe-se que a luz visível é uma forma de onda eletromagnética, mas com comprimento de onda restrito ao intervalo que vai de 4×10^{-7} m a $7{,}2 \times 10^{-7}$ m, como mostram as Figuras 2 e 3.

Figura 2 - O Espectro eletromagnético



Fonte: Autor

Figura 3 - Espectro eletromagnético visível ao homem



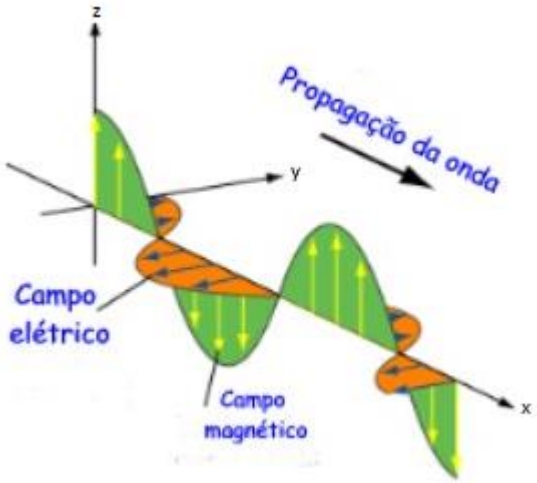
Fonte: (SASSON; SANCHES, 2009)

Mas foi entre 1900 e 1905, que Albert Einstein (1879-1955) desenvolveu os seus trabalhos sobre a teoria da relatividade e sobre o efeito fotoelétrico. Neste último admitia-se a teoria corpuscular da luz, e consistia na emissão de elétrons pela matéria sob a ação da luz. Por isso, atualmente, diz-se que a luz tem natureza dual porque, devido aos trabalhos de quantização do campo de radiação eletromagnética, conclui-se que as ondas eletromagnéticas são constituídas por partículas relativísticas, chamadas fótons. Portanto, certos fenômenos, como a interferência, podem ser descritos considerando-se o caráter ondulatório, e outros fenômenos, como o efeito fotoelétrico, considerando-se o caráter de partícula da luz. (ZÍLIO, 2001)

2.2 DESCRIÇÃO QUALITATIVA DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA

Uma onda eletromagnética é definida como sendo a composição variável dos campos magnético (B) e elétrico (E) conforme mostra a Figura 4. Várias propriedades importantes da onda eletromagnética podem ser observadas nesta figura, como por exemplo, que os campos elétricos (eixo y) e magnéticos (eixo z) são perpendiculares à direção de propagação da onda (eixo x) e são perpendiculares entre si. Além disso, o produto vetorial entre os campos aponta no sentido de propagação da onda e variam senoidalmente com a mesma frequência e fase (WALKER, 2003).

Figura 4 - Uma onda eletromagnética representada por um raio de duas frentes de onda



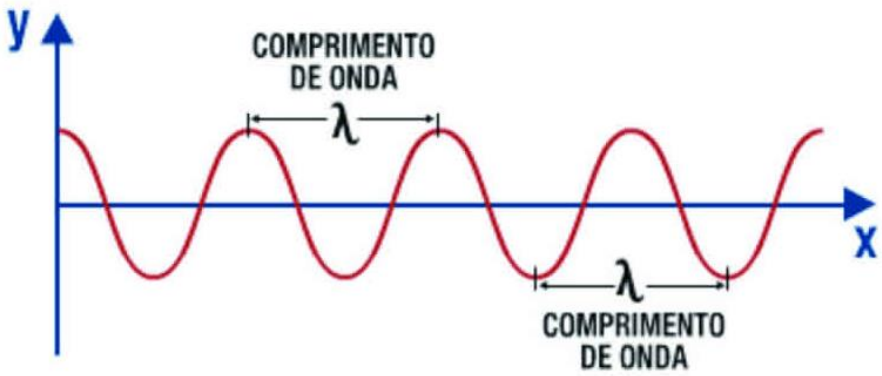
Fonte: (WALKER, 2003)

A Figura 4 ajuda a visualizar o que é, na verdade, uma situação complexa. Pode-se verificar que o campo magnético está variando senoidalmente, e, portanto, induz um campo elétrico perpendicular que também varia senoidalmente. Entretanto, como o campo elétrico está variando senoidalmente, induz um campo magnético perpendicular que também varia senoidalmente e assim por diante. Os dois campos se criam mútua e continuamente.

A equação (1) descreve a relação entre a frequência (f), a velocidade de propagação (c) e o seu comprimento de onda (λ) de uma onda eletromagnética, como mostra a Figura 5 (SZE, 1981).

$$f = \frac{c}{\lambda} \tag{1}$$

Figura 5 – Representação do comprimento de onda (λ)



Fonte: Autor

2.3 DESCRIÇÃO CORPUSCULAR DA LUZ

Conforme já mencionado, Einstein propôs que a radiação eletromagnética (ou simplesmente luz) era quantizada, ou seja, o seu quantum (quantidade elementar) é chamado de fóton. Segundo Einstein, um quantum de luz de frequência f tem uma energia dada pela equação (2) (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

$$E = hf \tag{2}$$

Onde h é a constante de Planck, que tem o valor de $h=6{,}63\times10^{-34}$ J.s $=4{,}14\times10^{-15}$ eV.s (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002)

A menor energia que uma onda luminosa pode ter é hf (Equação 2), que é a energia de um único fóton. Se a onda possui uma energia maior, esta deve ser um múltiplo inteiro de hf.

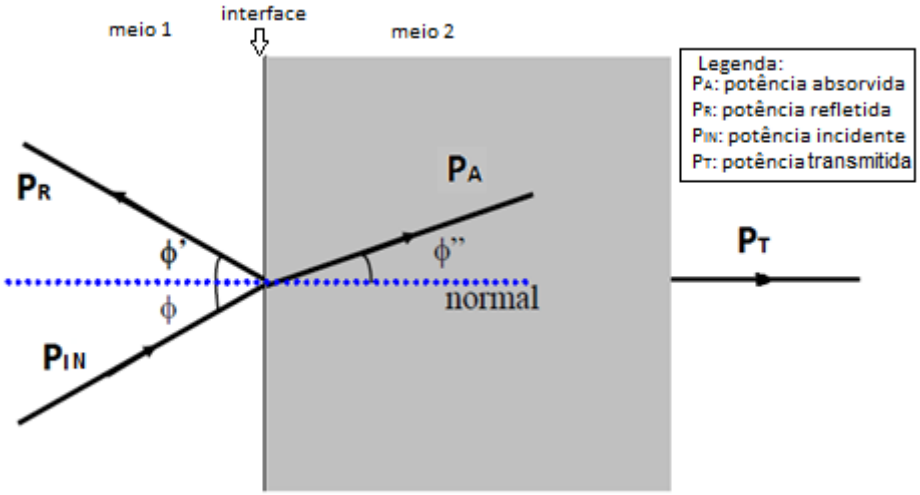
Einstein propôs ainda que sempre que a luz é absorvida ou emitida por um corpo, esta absorção ou emissão ocorre nos átomos do corpo. Quando um fóton de frequência f é absorvido por um átomo, a energia hf do fóton é transferida da luz para o átomo. Este evento de absorção implica na aniquilação do fóton. Quando um fóton de frequência f é emitido por um átomo, uma energia hf é transferida do átomo para a onda eletromagnética. Assim, os átomos de um corpo podem emitir ou absorver fótons (SZE, 1981).

A habilidade de detectar radiação eletromagnética através de todo o espectro óptico desde ultravioleta até o infravermelho, é muito importante. Entretanto existem aplicações específicas que exigem detecção na faixa do UV, e, por isso, é interessante discrimar com mais especificidade esta faixa do espectro eletromagnético, que vai de comprimentos de onda de 10nm até 400nm (BULTEEL, SCHOLOGEL e FLANDRE, 2003). De acordo com os seus efeitos na biosfera, a radiação UV é comumente dividida em três: UV-A (400 a 320nm), UV-B (320 a 280nm) e UV-C (280 a 10nm) e as principais aplicações da detecção desta faixa são: imagens médicas (GRUNDFEST, 1999), análise proteica e sequenciamento de DNA (KARCZEMSKA e SOKOLOWSKA, 2001), análise forense (SMITH e LAM, 2010), desinfecção e descontaminação (KNIGHT, 2004) e observação espacial (MALINOWSKI, DUBOZ e MOOR, 2010).

2.4 REFLEXÃO, ABSORÇÃO E TRANSMISSÃO

Como já foi mencionado no item 2.2, uma onda eletromagnética é composta pelo campo elétrico e magnético e a sua amplitude está ligada à magnitude do campo elétrico, que define a potência que está sendo transportada pela onda (AFAZALIAN; FLANDRE, 2007).

Figura 6 – Reflexão e refração de um raio luminoso numa interface dielétrica.



Fonte: Autor "adaptado de" (AFZALIAN, 2006)

Nos meios homogêneos a propagação da luz é retilínea e quando um raio atinge a interface que separa dois meios distintos, uma fração da potência do raio incidente (P_{IN}) é refletida (P_R) como se pode verificar na Figura 6, há também uma parte da potência que é transmitida (P_T) e uma terceira fração que é absorvida (P_A).

De acordo com a Lei da Conservação de Energia, tem-se que (equação 3):

$$\frac{P_R}{P_{IN}} + \frac{P_A}{P_{IN}} + \frac{P_T}{P_{IN}} = 1 \tag{3}$$

A razão entre a potência refletida e a potência incidente é chamada de refletividade (*R*) (AFZALIAN, 2006).

Cada meio é caracterizado por um parâmetro chamado índice de refração, N_m, que determina a velocidade com que o raio se propaga naquele meio (AFAZALIAN; FLANDRE, 2007).

O índice de refração N_m é na verdade um índice bidimensional, representado de forma complexa, pois a propagação da onda eletromagnética tem natureza complexa, já que é composta dos vetores E e B (campo elétrico e magnético) e é dado pela equação (4) (AFZALIAN, 2006).

$$N_{m=n_m-i.k_m} \tag{4}$$

Onde n_m é a parte real do índice de refração que determina a velocidade de propagação (v) da onda dentro do meio m. Sendo c, a velocidade da luz no vácuo, tem-se que n_m é definido pela equação (5) (AFZALIAN, 2006):

$$n_m = \frac{c}{v} \tag{5}$$

Já a parte imaginária do índice de refração é chamada de coeficiente de extinção (k_m) e determina o coeficiente de absorção [α(λ)] de acordo com a equação (6) (AFZALIAN, 2006):

$$\alpha(\lambda) = \frac{4.\pi.k_m}{\lambda} \tag{6}$$

Portanto, nos semicondutores ou qualquer outro material, o coeficiente de absorção depende do comprimento de onda e da energia do fóton. Este coeficiente e a espessura do meio (m) determinam a intensidade da potência absorvida (P_A). De fato, devido à absorção, após se propagar uma distancia y, a intensidade da potência inicial P_{IN} da luz decai de acordo com a equação (7) de Lambert-Beer (AFZALIAN, 2006).

$$P(y) = P_{IN}.e^{-\alpha.y} \tag{7}$$

3 FÍSICA DOS SEMICONDUTORES

Neste capítulo são introduzidos conceitos em relação à física dos semicondutores, representando apenas uma pequena parte da vasta literatura, sendo que apenas os assuntos pertinentes à operação dos dispositivos em questão são incluídos aqui. Além disso é apresentada uma breve discussão sobre junções p-n dos semicondutores, bem como suas características devido à geração-recombinação de portadores dentro da região de depleção.

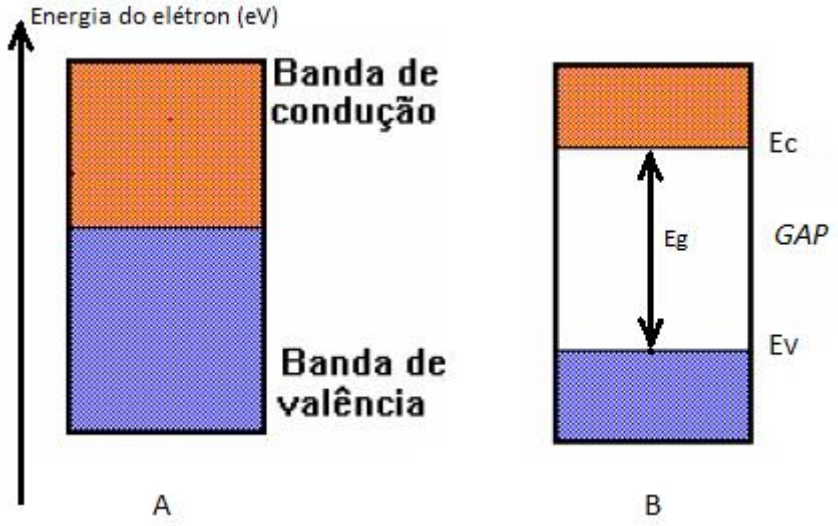
3.1 BANDAS DE ENERGIA

Reações químicas se originam da troca de elétrons das camadas mais superficiais de um átomo. Elétrons das camadas mais internas não participam das reações químicas por causa da alta atração eletrostática dos seus núcleos (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002). Portanto, o fenômeno de transporte de energia é proveniente dos elétrons das camadas mais externas. Em termos de banda de energia, os elétrons responsáveis por formar as ligações são aqueles que ocupam a última banda, onde há maior nível energético. As primeiras bandas (mais baixas), chamadas de "1s" contêm elétrons que estão firmemente ligados aos átomos, enquanto que nas últimas bandas (mais altas) não há elétrons. A última banda que contém elétrons é chamada de banda de valência, e são os elétrons presentes nesta camada os responsáveis pelas ligações entre os átomos. A banda de energia permitida diretamente acima da banda de valência é chamada de banda de condução, a qual, em um semicondutor a T=0K está vazia de elétrons. À medida que a temperatura aumenta, alguns elétrons têm energia térmica suficiente para "saltar" da banda de valência para a banda de condução, onde eles são livres para se mover. A diferença de energia entre o nível mais inferior da camada de condução e o nível mais superior da camada de valência é chamada de banda proibida ou "bandgap" (E_g) (SZE, 1981).

Levando em conta um caso mais genérico, há duas situações que podem ocorrer dependendo da localização do átomo dentro da tabela periódica, que pode ser observado na Figura 7 (STREEMAN e BANERJEE, 2000):

a) A camada de valência pode estar completamente preenchida com elétrons em T=0K, mas a próxima banda de energia se sobrepõe a ela ($E_g<0$);
b) A camada de valência pode estar completamente preenchida com elétrons e não há bandas vazias que se sobrepõem a ela ($E_g>0$).

Figura 7 – Banda de valência e condução em um metal (A) e em um semicondutor ou isolante (B).



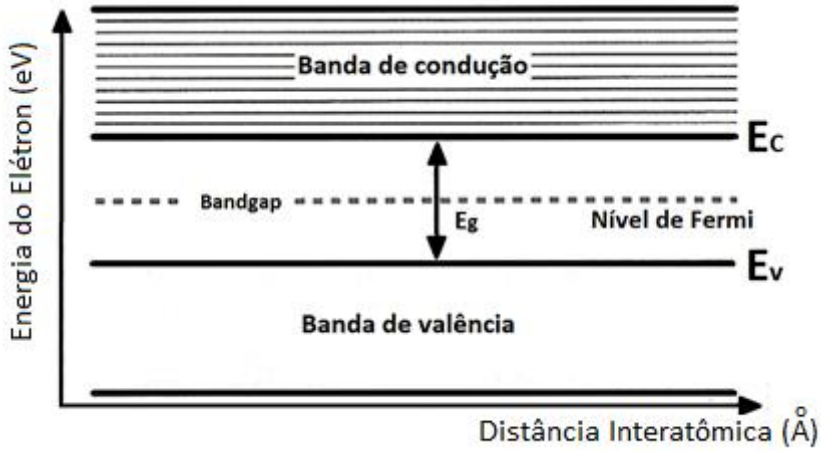
Fonte:Autor

No caso A, os elétrons podem deixar o átomo e se mover através do cristal sem receber nenhuma energia. Os materiais com este tipo de características são os metais. No caso B, os elétrons devem receber uma quantidade de energia para poder saltar ao nível de condução e então se mover através do cristal. Os materiais com este tipo de energia são os semicondutores ou isolantes (SEDRA e SMITH, 1988).

Portanto, a distinção entre um isolante ou semicondutor é quantitativa e é baseada no valor do seu *gap* de energia. O valor de E_g no silício é de 1,12eV (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

É conveniente representar as bandas de energia no espaço real (conforme Figura 8), onde o eixo x define uma distância dentro do cristal. A máxima energia da banda de valência é chamada de E_V e a mínima energia da banda de condução é E_C (SEDRA e SMITH, 1988).

Figura 8 – Nível de condução e valência no espaço real



Fonte: Autor "adaptado de" (SZE, 1981)

O conceito do nível de Fermi, E_F, é uma função estatística que representa a energia média de um elétron. Em zero Kelvin todos os estados permitidos de energia abaixo do nível de Fermi estão ocupados. De uma maneira análoga, o nível de Fermi pode ser definido como um nível de energia que tem 50% de probabilidade de ser preenchido com elétrons (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002). Isto porque em um semicondutor, E_F=Ei, uma vez que as densidades de estados permitidos nas bandas de valência e condução são iguais, resultando em E_F no meio da banda proibida.

O nível de Fermi (Φ_F) pode ser visto nas Figuras 8 e 9 e pode ser calculado através das equações (8) e (9) dependendo do tipo de material (N ou P), que serão explicados posteriormente.

$$\Phi_{F(Semicondutor\ tipo\ N)} = -\frac{kT}{q}\ ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) \tag{8}$$

$$\Phi_{F(Semicondutor\ tipo\ P)} = \frac{kT}{q}\ ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \tag{9}$$

Onde k é a constante de Boltzman, T é a temperatura em Kelvin, q é a carga elementar do elétron, N_A e N_D é a concentração de dopantes do tipo P e N respectivamente e n_i é a concentração intrínseca de portadores (será definida posteriormente).

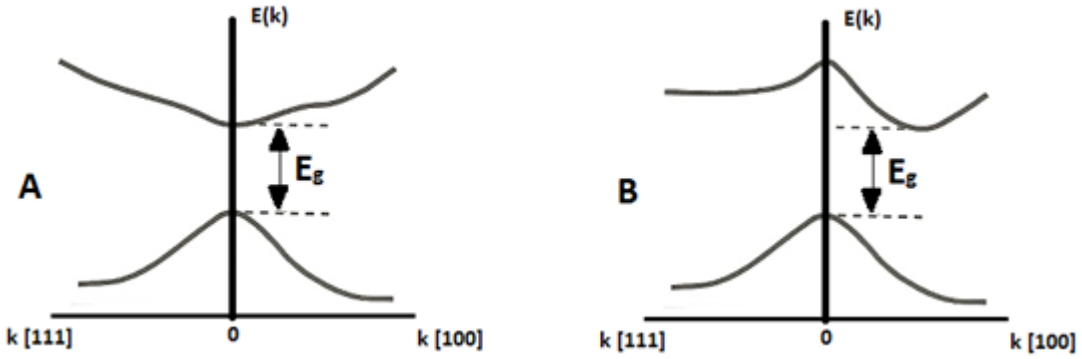
Há também outra forma de representar os diagramas de banda de energia em função do vetor de onda ou momento dos portadores (*k*), como representado na Figura 9, o que

permite a análise de algumas propriedades dos semicondutores. Por exemplo, na Figura 9-A, a mínima energia da banda de condução e a máxima energia da banda de valência ocorrem no mesmo valor de momentum (k=0), o que define um semicondutor de banda direta. Neste tipo de semicondutor, um elétron pode "cair" da banda de condução para a banda de valência sem violar a lei da conservação de momento (sem mudar o seu momento) (SZE, 1981). Este processo tem uma alta probabilidade de ocorrência e a energia perdida pelo elétron, pode ser emitida em forma de fóton com uma energia descrita pela equação (10), sendo h a constante de Planck e f a frequência do fóton. Na maioria dos semicondutores de banda direta, a energia emitida através dos fótons por um fenômeno de recombinação geralmente corresponde à energia da faixa visível ou infravermelho conforme mostrado na Figura 3. Um evento de recombinação onde fótons são emitidos é chamado de recombinação radioativa, e é explorado em dispositivos como diodos emissores de luz (*LED*) construídos a partir de arseneto de gálio (SZE, 1981).

$$E_g = hf = \frac{hc}{\lambda} \tag{10}$$

No caso da Figura 9-B, a mínima energia da banda de condução e a máxima energia da banda de valência ocorrem em valores de momentos diferentes. Este tipo de semicondutor é chamado de semicondutor de banda indireta, no qual um elétron não pode "cair" da banda de condução para a banda de valência sem mudança de momento, ou seja, no mesmo vetor de onda. Desta forma, no caso do silício e do germânio (família 4 da tabela periódica), quando os elétrons transitam da banda de condução para a de valência, a energia é transformada em calor.

Figura 9 – Bandas de energia.



Fonte: Autor "adaptado de" (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

Legenda: A) Semicondutor de banda direta, B) Semicondutor de banda indireta.

Outra importante característica dos semicondutores é sua concentração intrínseca de portadores livres (n_i), a qual já foi mencionada nas equações (8) e (9). De fato, esta concentração representa o produto do número de elétrons (n) e número de lacunas (p) livres de um semicondutor intrínseco, como mostra a equação (11) (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002):

$$pn = {n_i}^2 \tag{11}$$

Onde n_i é dado pela equação 42 que será apresentada ainda neste capítulo.

O semicondutor é dito intrínseco quando a vasta maioria dos seus portadores livres se origina dos próprios átomos do semicondutor. Neste caso, se um elétron recebe energia térmica suficiente para "saltar" da banda de valência para a banda de condução, ele deixa uma lacuna na banda de valência, por isso, o número de elétrons na banda de condução é exatamente igual ao número de lacunas livres da banda de valência, conforme demonstra a equação (12) (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002):

$$p = n = n_i \tag{12}$$

Desta forma é determinada a energia do nível de Fermi (E_F) em um semicondutor intrínseco à qual é igual a E_i, definida através da equação (13) (STREEMAN e BANERJEE, 2000). No silício, n_i=1,45x10^{10}cm^{-3} para temperatura ambiente (T=300K). A dependência de n_i com a temperatura será discutida posteriormente neste capítulo.

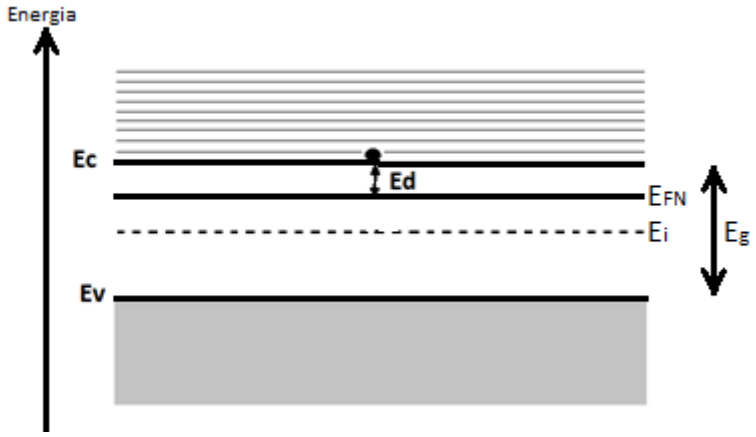
$$E_i = \frac{E_C + E_V}{2} \tag{13}$$

O silício utilizado na indústria de semicondutores tem um alto nível de pureza, mais de 99,99% (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002). Porém, podem ser introduzidos elementos que estão próximos ao silício na tabela periódica, tais como o boro (que está na coluna III) ou como o arsênio e o fósforo (que estão na coluna V) (SZE, 1981).

A introdução de átomos doadores como o fósforo ou arsênio cria um nível de energia permitido dentro do bandgap (E_{FN} na Figura 10). Este nível está localizado alguns meV (mili elétron-Volt) abaixo da banda de condução e a sua diferença até E_C é chamado de E_d (energia de ativação do dopante). Em temperatura ambiente, os elétrons presentes no nível E_{FN} possuem energia térmica suficiente para "saltar" para o nível de condução, tornando o átomo

da impureza ionizado. O mesmo processo acontece quando um átomo aceitador, como o boro, é introduzido no semicondutor, criando um nível de energia permitido próximo ao topo da banda de valência, o que pode criar um átomo de impureza ionizado, quando os elétrons da camada de valência adquirem energia suficiente para "saltar" para o nível permitido, criando lacunas na camada de valência (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

Figura 10 – "Salto" de um elétron do nível de energia permitido para a banda de condução.



Fonte: Autor

Impurezas doadoras e aceitadoras são comumente introduzidas ao semicondutor para aumentar a concentração de elétrons ou de lacunas livres, os quais modificam as propriedades físicas dos semicondutores (redução de resistividade, por exemplo). Ao conter impurezas doadoras, o semicondutor é dito do tipo N e a concentração destes átomos chamada de N_D. Da mesma forma, ao conter impurezas aceitadoras, o semicondutor é dito do tipo P e a sua concentração chamada de N_A (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

A concentração de elétrons (n_N) e lacunas (p_N) num material do tipo N é dada pela equação (14) (SZE, 1981):

$$n_N \cong N_D \;\; e \;\; p_N = \frac{{n_i}^2}{N_D} \tag{14}$$

A concentração de elétrons (n_P) e lacunas (p_P) num material do tipo P é dada pela equação (15) (SZE, 1981):

$$p_P \cong N_A \;\; e \;\; n_P = \frac{{n_i}^2}{N_A} \tag{15}$$

É importante ressaltar que a equações 14 e 15 são válidas para temperaturas maiores que 300K, pois, abaixo disso, é possível que nem todo átomo dopante se ionize, fato que será melhor explicado no item 3.6 desta tese.

3.2 TEORIA DA CONDUÇÃO ELÉTRICA

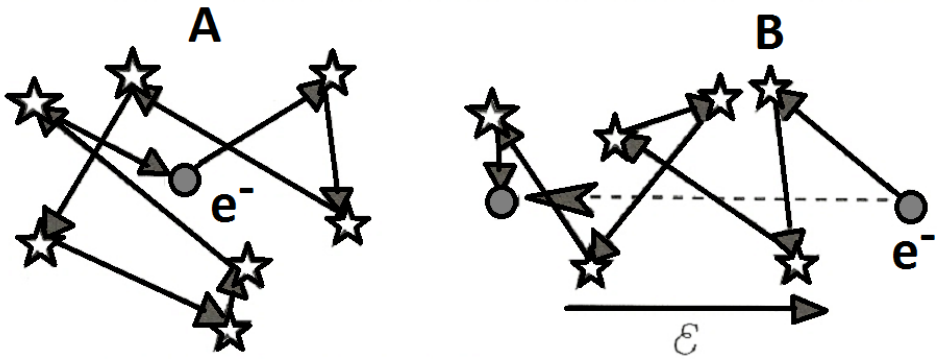
Neste item será descrito o movimento das cargas elétricas, bem como as relações entre cargas, campo elétrico e potencial.

3.2.1 Corrente de deriva em um semicondutor

O cristal de semicondutor contém defeitos intersticiais e espaços vazios devido ao deslocamento de átomos ou átomos faltantes. Além disso, os átomos vibram em torno da sua própria posição de equilíbrio. A amplitude destas vibrações depende da temperatura, desta forma, emerge o conceito de fônon, a qual é uma quase partícula que representa a propagação da vibração ou calor, através do cristal (KITTEL, 1986). Tanto as imperfeições do cristal, quanto os fônons podem interagir com os elétrons, isso faz com que haja uma série de colisões que obedecem ao princípio da conservação de energia e momento (ZIMAN, 1972).

Como consequência, os elétrons nunca estão "parados", e a sua trajetória é regida por uma série de vetores de velocidades (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002). Com a ausência de uma força externa, todos estes movimentos são em média neutros e o deslocamento da carga é nulo (Figura 11-A). Porém, ao aplicar-se um campo elétrico, surge uma corrente de deriva na direção oposta ao seu movimento, como mostra a Figura 11-B.

Figura 11 – Movimento dos elétrons.



Fonte: (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002)
Legenda: A) Na ausência de campo elétrico. B) Na presença de campo elétrico. (As estrelas representam colisões).

A média de tempo entre duas colisões de elétrons é chamada de tempo de relaxação (τ_N). Este tempo é da ordem de dezenas de pico segundos em temperatura ambiente, durante o qual um elétron pode se movimentar na ordem de 10 nanômetros (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

Adicionalmente, a velocidade de deriva dos elétrons (v_{dN}) resultante da aplicação de um campo elétrico é dada pela equação (16) (STREEMAN e BANERJEE, 2000):

$$v_{dN} = -\frac{q\,\tau_N}{m_e^*}\,\varepsilon \equiv -\mu_N\,\varepsilon \tag{16}$$

Onde m_e^* é a massa efetiva do elétron, μ_N é a mobilidade dos elétrons, q é a sua carga elementar e ε é o campo elétrico.

A mobilidade dos elétrons na banda de condução é μ_N, e a sua unidade é cm^2/Vs, e é dada pela equação (17) (STREEMAN e BANERJEE, 2000):

$$\mu_N = \frac{q\,\tau_N}{m_e^*} \tag{17}$$

Portanto, a mobilidade dos elétrons é proporcional ao tempo de relaxação e inversamente proporcional à sua massa efetiva. No entanto, o tempo de relaxação (média de tempo entre duas colisões de elétrons) é inversamente proporcional à temperatura, já que as vibrações térmicas da rede ou fônons aumentam com o aumento da temperatura. Sendo assim, a mobilidade é inversamente proporcional à temperatura. Similarmente, as impurezas e os

defeitos da rede causam espalhamento (colisões) entre os elétrons, e, portanto, a mobilidade cai com o aumento das impurezas ou concentração de defeitos (SZE, 1981).

Para lacunas, na camada de valência, tem-se que a mobilidade (μ_p)é dada pela equação (18) (STREEMAN e BANERJEE, 2000).

$$\mu_P = \frac{q\,\tau_P}{m_h^*} \tag{18}$$

Onde m_h^* é a massa efetiva da lacuna.

Se a concentração de elétrons na banda de condução é igual a n, a densidade de corrente de deriva de elétrons (J_N) é dada pela equação (19) (STREEMAN e BANERJEE, 2000):

$$J_N = q\,\mu_N\,n\,\varepsilon \tag{19}$$

De maneira análoga, a densidade de corrente de deriva de lacunas (J_P) é dada pela equação (20) (STREEMAN e BANERJEE, 2000):

$$J_P = q\,\mu_P\,p\,\varepsilon \tag{20}$$

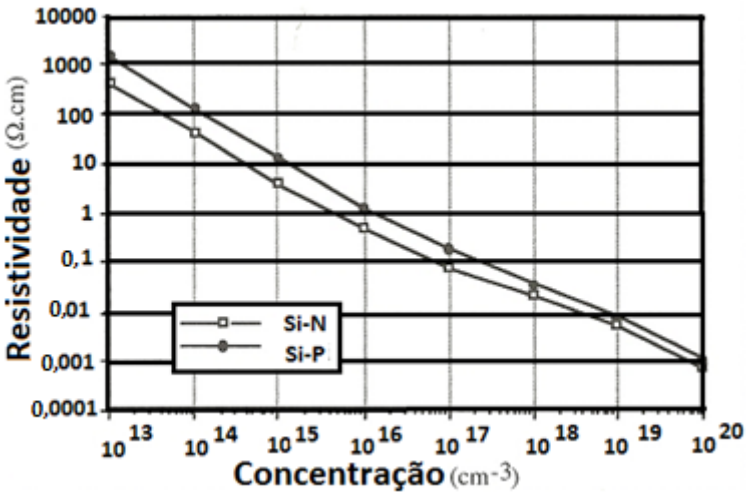
A condutividade, σ ($\Omega^{-1}.cm^{-1}$), e a resistividade, ρ (Ω.cm) de um semicondutor homogeneamente dopado são dados pelas equações (21) e (22) (STREEMAN e BANERJEE, 2000):

$$\sigma = q(n\,\mu_N + p\,\mu_P) \tag{21}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \tag{22}$$

Na Figura 12 pode-se observar que a resistividade de um semicondutor pode variar várias ordens de magnitude simplesmente alterando a concentração de dopantes (SZE, 1981).

Figura 12 – Resistividade do silício a T=300K em função da concentração de impurezas dopantes



Fonte: (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002)

3.2.2 Corrente de difusão em um semicondutor

Nos semicondutores a corrente pode ser produzida por diferença de concentração de portadores. A corrente, neste caso, é chamada de corrente de difusão. Os elétrons irão se difundir da região com maior concentração para a de menor concentração. O fluxo de elétrons, F_N, resultante do processo de difusão é diretamente proporcional ao gradiente da concentração de elétrons, dn/dx. Este fluxo, ao ser multiplicado por –q, é igual à densidade de corrente de difusão [$J_{N(dif)}$] dado pela equação (23) (SZE, 1981):

$$J_{N(dif)} = qD_N \frac{dn}{dx} \tag{23}$$

Analogamente, a densidade de corrente de lacunas [$J_{P(dif)}$] é dada pela equação (24) (SZE, 1981):

$$J_{P(dif)} = -qD_P \frac{dp}{dx} \tag{24}$$

Onde D_P e D_N são constantes chamadas de coeficientes de difusão para lacunas e elétrons, respectivamente. Essa constante representa a facilidade de fluidez com a qual os portadores podem se mover e se difundir em um material semicondutor (SZE, 1981).

Portanto, a densidade total de corrente fluindo através de um semicondutor será a soma da corrente total de elétrons [$J_{T(N)}$] e a corrente total de lacunas [$J_{T(P)}$], sendo que cada parcela possui sua componente de deriva e difusão. Vale a pena ressaltar que os mecanismos de difusão e deriva são contrários, por isso, há sinais negativos na equação (25) (SZE, 1981).

$$J = J_{T(N)} + J_{T(P)} = -q\,\mu_N\,n\,\varepsilon + qD_N\frac{dn}{dx} - q\,\mu_P\,p\,\varepsilon + qD_P\frac{dp}{dx} \tag{25}$$

3.2.3 Relação de Einstein

A mobilidade e o coeficiente de difusão estão relacionados um ao outro, conforme mostram a equações (26) e (27) (SZE, 1981):

$$D_N = \frac{k\,T}{q}\mu_N \tag{26}$$

$$D_P = \frac{k\,T}{q}\mu_P \tag{27}$$

Estas relações mostram que os coeficientes de difusão e a mobilidade representam a mesma coisa, exceto por um fator multiplicador, kT/q, que é chamado de tensão térmica (U_T) e vale 25,9 mV em temperatura ambiente (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

3.3 FENÔMENOS DE GERAÇÃO E RECOMBINAÇÃO

Conforme já foi mencionado nos tópicos anteriores, há elétrons livres na banda de condução e lacunas livres na banda de valência de um semicondutor acima de zero Kelvin. Um elétron da banda de condução está livre para se mover no cristal e também pode “saltar” para um “lugar vazio” (lacuna) que fica dentro da banda de valência. Através deste processo, o elétron perde energia, e tal fenômeno é chamado de evento de recombinação (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

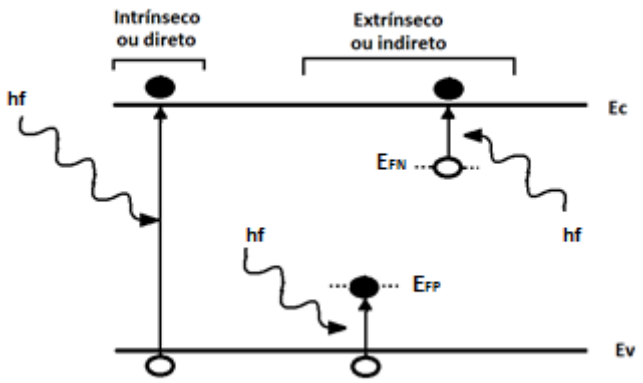
Analogamente, se houver energia suficiente disponível, um elétron pode “saltar” da banda de valência para a banda de condução, criando uma lacuna e um elétron livre e este processo é chamado de evento de geração (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

No equilíbrio termodinâmico, os eventos de geração e recombinação são balanceados, tal que a concentração de elétrons e lacunas ao longo do tempo mantém-se constante. No entanto, um estado de não equilíbrio pode ser atingido ao usar uma fonte de energia externa, tal como uma fonte de luz (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

3.3.1 Transições indiretas e diretas

Conforme já foi mencionado no item 3.1, há semicondutores de banda direta e banda indireta, sendo que o silício é um semicondutor de banda indireta, onde a mínima energia da banda de condução e a máxima energia da banda de valência não ocorrem para o mesmo valor de momento do portador (*k*). Isso faz com que o fenômeno de recombinação banda para banda, através do qual, um elétron “salta” da banda de condução para a banda de valência se torne muito improvável, fazendo com que este semicondutor não emita luz. Os fenômenos de recombinação, portanto, ocorrem através de níveis enérgicos dentro do bandgap, chamados de centros de recombinação, os quais são introduzidos no semicondutor por átomos de impurezas ou defeitos no cristal, conforme mostra a Figura 13 (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

Figura 13 – Processo de foto excitação direto e indireto

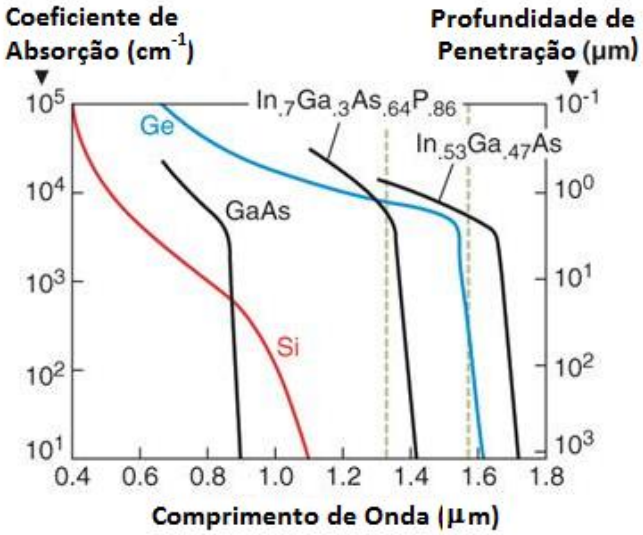


Fonte: Autor

Um dos principais responsáveis pelo fenômeno de geração extrínseca nos semicondutores é a incidência de radiação luminosa, e sua absorção é determinada pelo coeficiente de absorção (α), definido na equação (6). O silício é transparente a fótons com energia hv menor que o seu *bandgap*, por isso, o maior comprimento de onda (λ_c) que pode ser absorvido pelo silício é definido pelo seu *bandgap* através da equação (28), pois o coeficiente de absorção é muito baixo para comprimentos de onda maiores que λ_c (conforme mostra a Figura 14, na qual pode ser observado a profundidade de penetração e o coeficiente de absorção da radiação eletromagnética em função do seu comprimento de onda) (SZE, 1981). No silício, λ_c é de aproximadamente 1,1μm (SZE, 1981).

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \tag{28}$$

Figura 14 – Coeficiente de absorção para o germânio, silício e GaAs



Fonte: (SZE, 1981)

A tabela 1 mostra os valores da banda de energia e do respectivo comprimento de onda de corte para alguns materiais (SOARES, 2005).

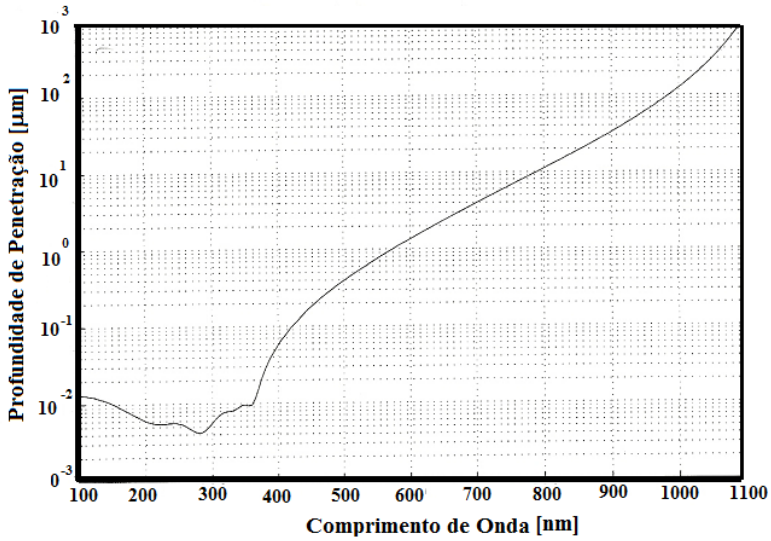
Tabela 1 – Banda de energia para diversos materiais semicondutores.

Material	E_g (eV)	λ_c (µm)
Si	1,17	1,06
Ge	0,775	1,6
GaAs	1,424	0,87
InP	1,35	0,92
$In_{0,55}Ga_{0,45}As$	0,75	1,65
$In_{1-0,45y}Ga_{0,45y}As_yP_{1-y}$	0,75 a 1,35	1,65 a 0,92

Fonte: (SOARES, 2005)

O inverso do coeficiente de absorção é a profundidade de penetração (L_{abs}), o qual é demonstrado na Figura 15 utilizando o modelo apresentado em (FOROUHI e BLOOMER, 1988) (FOROUHI e BLOOMER, 1986) e define a medida da distância que a luz pode "viajar" dentro de um material antes de ser absorvida.

Figura 15 – Profundidade de penetração do silício em função do comprimento de onda



Fonte: (AFZALIAN, 2006)

Desta forma, fótons com energia igual ou maior que E_g, podem ser absorvidos e então gerar pares elétron-lacuna. O mínimo comprimento de onda que pode ser absorvido é altamente influenciado pela recombinação de superfície, pois para baixos comprimentos de onda, a profundidade de penetração é muito baixa, e, portanto, a radiação é absorvida muito próxima à superfície, onde o tempo de recombinação é muito curto e os fotoportadores se recombinam antes de serem coletados. (a recombinação de superfície será explicada posteriormente) (AFAZALIAN; FLANDRE, 2007).

3.3.2 Tipos de geração e recombinação

Em um evento de recombinação, a energia pode ser liberada de três diferentes formas (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002):

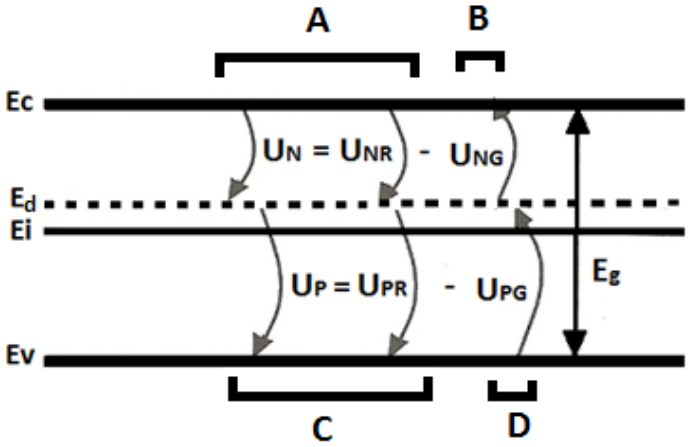
a) num evento de recombinação radioativa de banda para banda, a energia é liberada em forma de fótons;
b) num evento de recombinação Auger, a energia é transferida para outro elétron ou lacuna, o qual é excitado para um nível de maior energia;
c) num evento de recombinação SRH, o qual envolve níveis de energia dentro da bandgap, a energia é transferida para o cristal na forma de calor (fônons).

A recombinação de portadores não acontece somente no substrato de um cristal, mas também na sua superfície, onde a periodicidade das ligações é interrompida, e onde o contato com outros materiais é feito (ar, SiO_2, metal, etc). A taxa de recombinação de superfície é chamada de S_N e S_P.

3.3.3 Recombinação SRH

Na Figura 16, as transições A e C correspondem a eventos de recombinação e as transições B e D correspondem a eventos de geração. Estas transições são muito mais prováveis de acontecer, pois envolvem trocas de energia menor que E_g. Os termos G_N e G_P representam os eventos de geração de pares elétron-lacuna originados por fontes externas de energia. Entretanto, a taxa de geração-recombinação intrínseca (não gerada por eventos externos), é chamada de U_N e U_P para elétrons e lacunas respectivamente (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

Figura 16 – Recombinação através dos centros de recombinação



Fonte: Autor "adaptado de" (SZE, 1981)

A taxa de geração e de recombinação intrínseca total (U) é igual à diferença entre a taxa de recombinação e a taxa de geração térmica, ou seja, $U=U_{NR}- U_{NG}$, a qual é igual à zero em equilíbrio termodinâmico e que pode ser calculada através da equação (29) (SZE, 1981).

$$U = \frac{pn - n_i^2}{\tau_P\left(n + n_i.\exp\left[\frac{E_d - E_i}{kT}\right]\right) + \tau_N\left(p + n_i.\exp\left[\frac{E_i - E_d}{kT}\right]\right)} \tag{29}$$

Onde τ_P e τ_N é o tempo de vida das lacunas e dos elétrons em estado-estacionário, respectivamente e E_d é a energia de ativação de dopante tipo doador (ou centros de recombinação) (SZE, 1981).

Pode-se verificar que a taxa de geração e recombinação intrínseca é diretamente proporcional a $pn-n_i^2$, portanto U é definido pela relação (30) (SZE, 1981).

$$\begin{cases} U = 0 \; se \; pn = n_i^2 \; (equilíbrio) \\ U > 0 \; se \; pn > n_i^2 \; (recombinação) \\ U < 0 \; se \; pn < n_i^2 \; (geração) \end{cases} \tag{30}$$

De acordo com a expressão $U=U_{NR}- U_{NG}$, se U=0, significa que há equilíbrio e, portanto, $U_{NR}=U_{NG}$. Caso U_{NR} seja maior que U_{NG}, haverá recombinação e U será positivo. Em contrapartida se U_{NG} for maior que U_{NR}, então haverá geração e U será negativo.

Alguns dispositivos semicondutores operam no regime de injeção de portadores minoritários, tal como os fotodiodos PIN, portanto, o tempo de vida dos portadores minoritários é muito importante para a eficiência destes dispositivos. Na maioria dos casos, a

ordem de magnitude da concentração dos portadores minoritários é muito menor que a dos portadores majoritários. Portanto, a taxa de recombinação intrínseca é definida pelo tempo de vida dos portadores minoritários e é dada pelas equações (31) e (32) (SZE, 1981).

$$U = \frac{n_p - n_0}{\tau_N} \; em\ um\ semicondutor\ tipo\ P \tag{31}$$

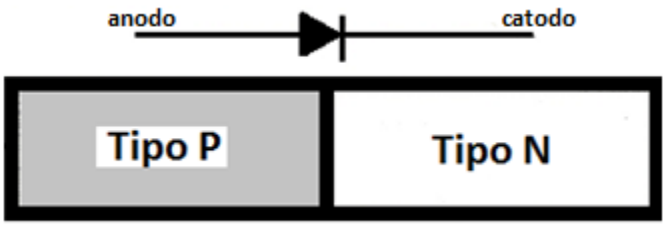
$$U = \frac{p_N - p_0}{\tau_P} \; em\ um\ semicondutor\ tipo\ N \tag{32}$$

Onde n_0 e p_0 é a concentração de elétrons e lacunas em equilíbrio (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

3.4 JUNÇÃO PN

Uma junção PN é formada quando um semicondutor do tipo N é "colocado em contato" com um semicondutor do tipo P e o seu símbolo está representado na Figura 17 (SEDRA e SMITH, 1988).

Figura 17 – Junção PN e a sua simbologia

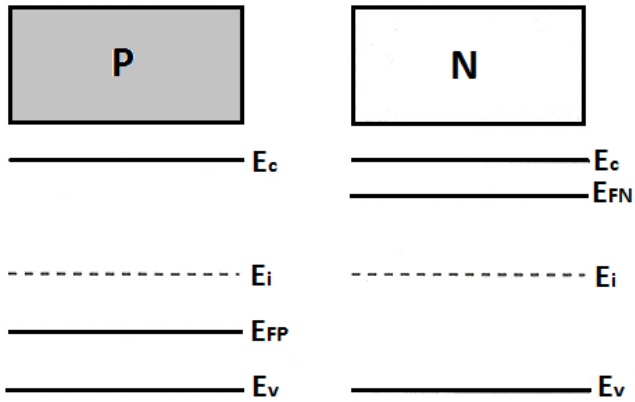


Fonte: Autor

3.4.1 Junção PN não polarizada

Na Figura 18 estão demonstrados os diagramas de banda de dois pedaços de semicondutores diferentes, um do tipo N e outro do tipo P e por simplicidade, a concentração de dopantes em ambos é considerada constante, sendo N_D (cm^{-3}) a concentração do lado N, e N_A (cm^{-3}), a concentração do lado P (SEDRA e SMITH, 1988). Os níveis de Fermi do lado P é definido como E_{FP} e do lado N, como E_{FN}.

Figura 18 – Diagrama de banda de energia em regiões do tipo N e P separadamente



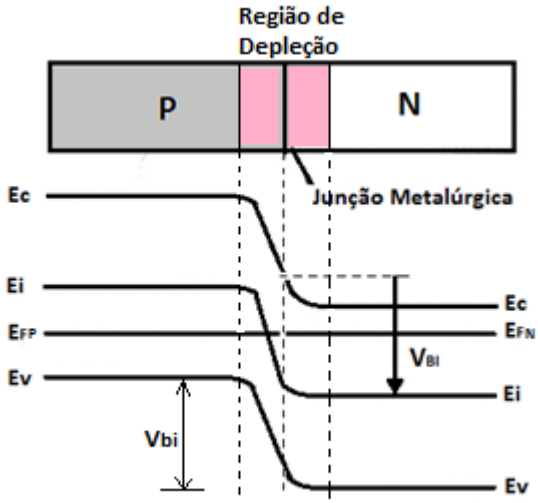
Fonte: (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002)

Ao conectar dois pedaços de material N e P, forma-se uma junção metalúrgica, e em equilíbrio termodinâmico, um potencial de junção (V_{BI}) é formado, devido ao deslocamento das cargas, já que acontece uma difusão de elétrons da região N para a P e uma difusão de lacunas da região P para a N, além do movimento dos portadores minoritários por deriva (SEDRA e SMITH, 1988).

O potencial de junção é dado pela equação (33) (MARTINO, PAVANELLO e VERDONCK, 2003) e pode visto na Figura 19 (SZE, 1981).

$$V_{BI} = \frac{kT}{q}\, ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \tag{33}$$

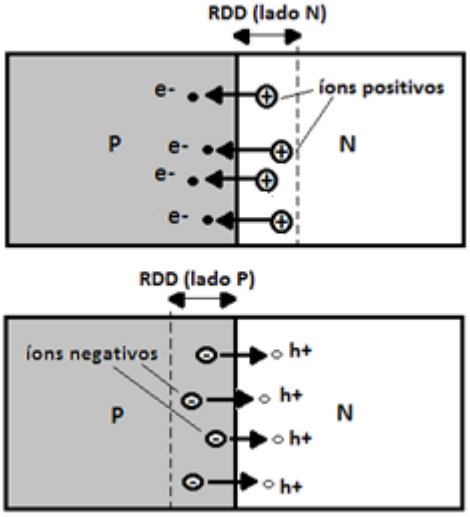
Figura 19 – Diagrama de bandas da junção PN



Fonte: (SZE, 1981)

Quando os elétrons se difundem do lado N para o lado P "deixam para trás" íons positivos, que não podem se mover ao longo do cristal. O mesmo acontece quando lacunas se difundem do lado P para o lado N, deixando íons negativos (Figura 20). A região onde estes íons estão localizados constitui uma região de carga espacial chamada região de depleção (RDD). Os íons localizados nesta região dão origem a um campo elétrico (ε, com sentido do lado N para o lado P) e consequentemente, ao aparecimento de uma diferença de potencial (SEDRA e SMITH, 1988).

Figura 20 – Criação da região de depleção por difusão de lacunas e elétrons



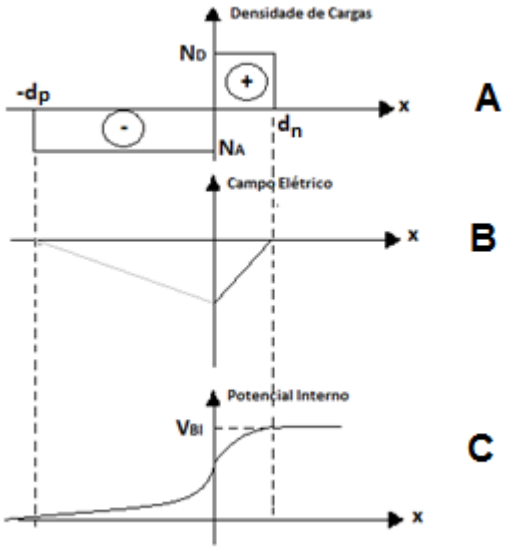
Fonte: (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002)

A diferença de potencial entre os dois lados da RDD dá origem a uma corrente de deriva, em que as lacunas da região tipo N (minoritárias) se deslocam para a região P e os elétrons da região P se deslocam para a região N, favorecidos pelo campo elétrico (SEDRA e SMITH, 1988).

À medida que a diferença de potencial entre os lados P e N da junção aumenta, em virtude da elevação do campo elétrico, a corrente de deriva aumenta, enquanto a corrente de difusão sofre uma diminuição até que, no equilíbrio, essa diferença de potencial seja suficiente para que ambos os componentes de corrente se igualem ($|I_{Tdif}| = |I_{Tder}|$) em valor absoluto, mas possuem sentidos opostos (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

O perfil de cargas, do campo elétrico e do potencial após o equilíbrio térmico pode ser visto na Figura 21 (SZE, 1981), na qual pode ser observado o comprimento da região de depleção do lado P (d_p) e do lado N (dn).

Figura 21 – Modelo Físico de uma junção PN abrupta com N_A diferente de N_D: A) Densidade de cargas. B) Campo elétrico. C) Potencial elétrico.



Fonte: Autor "adaptado de" (SZE, 1981)

3.4.2 Junção PN polarizada

A largura da RDD é modificada com a aplicação de tensão externa (V_D). A aplicação de V_D positivo (potencial do lado P maior que do lado N) diminui a largura da RDD, porque o campo elétrico externo se contrapõe ao campo elétrico interno, o que fará com que a corrente de difusão (majoritários) suplante a corrente de deriva (minoritários), e se diz que o diodo está polarizado diretamente. Aplicando-se uma tensão V_D negativa, a largura de depleção aumenta e a corrente de difusão fica menor que a deriva (que não se altera com a tensão aplicada), dizendo-se que o diodo está polarizado reversamente.

As larguras da região de depleção do lado N (dn) e do lado P (dp) são dadas pelas equações (34) e (35) (SZE, 1981).

$$dn = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{si}(V_{BI} - V_D)N_A}{qN_D(N_A + N_D)}} \quad largura\ da\ RDD\ \ do\ lado\ N \tag{34}$$

$$dp = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{si}(V_{BI} - V_D)N_D}{qN_A(N_A + N_D)}} \quad largura\ da\ RDD\ \ do\ lado\ P \tag{35}$$

A densidade de corrente numa junção PN ideal é dada pela equação (36) (SZE, 1981).

$$J = J_S \left[exp\left(\frac{q\,V_D}{kT}\right) - 1 \right] \tag{36}$$

Onde Js é a densidade de corrente de saturação ou densidade de corrente reversa, pois a magnitude da corrente fluindo através de uma junção PN reversamente polarizada é igual à Js, o qual é independente da tensão reversa aplicada e do campo elétrico, mas depende das concentrações de dopantes, do coeficiente de difusão e do tempo de vida das cargas minoritárias, como pode ser observado na equação (37) (STREEMAN e BANERJEE, 2000):

$$J_S = \frac{q\,D_N\,n_{PO}}{L_N} + \frac{q\,D_P\,p_{NO}}{L_P} = qn_i^2 \left(\frac{1}{N_A}\sqrt{\frac{D_N}{\tau_N}} + \frac{1}{N_D}\sqrt{\frac{D_P}{\tau_P}} \right) \tag{37}$$

Onde: D_N, D_P são os coeficientes de difusão de elétrons e lacunas respectivamente e n_{PO} e p_{NO} são respectivamente a concentração de elétrons no equilíbrio dentro da região P e a concentração de lacunas no equilíbrio dentro da região N (STREEMAN e BANERJEE, 2000).

L_N e L_P são os comprimentos de difusão dos portadores minoritários (elétrons e lacunas), cujo sentido físico é o quanto os portadores minoritários podem se difundir na região P ou N antes de se recombinar, e são definidos através do tempo de vida (τ_N e τ_P) e do coeficiente de difusão (D_N e D_P), conforme mostram as equações (38A) e (38B).

$$L_P = \sqrt{D_P \tau_P} \quad e \quad L_N = \sqrt{D_N \tau_N} \tag{38}$$

(A) **(B)**

Finalmente, a corrente de um diodo ideal pode ser obtida multiplicando-se a densidade de corrente pela área da seção transversal (A) (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

3.4.3 Corrente de geração e recombinação (diodo não ideal)

Até este ponto, foi considerado um diodo ideal, negligenciando os mecanismos de geração e recombinação que acontecem dentro da RDD. Porém, nos diodos reais, estes mecanismos têm que ser levados em consideração. Os mecanismos de geração e recombinação aqui considerados são os SRH, já definidos no item 3.3.3 e que acontecem basicamente porque, ao aplicar-se uma tensão externa V_D, o valor do produto pn não é mais

igual a n_i^2 (seu valor de equilíbrio). Portanto, a densidade de corrente total (J) será dada pela equação (39) (STREEMAN e BANERJEE, 2000), na qual a densidade de corrente de geração e recombinação é dada por J_{rg}.

$$J = J_S\left[exp\left(\frac{q\,V_D}{kT}\right) - 1\right] + J_{rg} \tag{39}$$

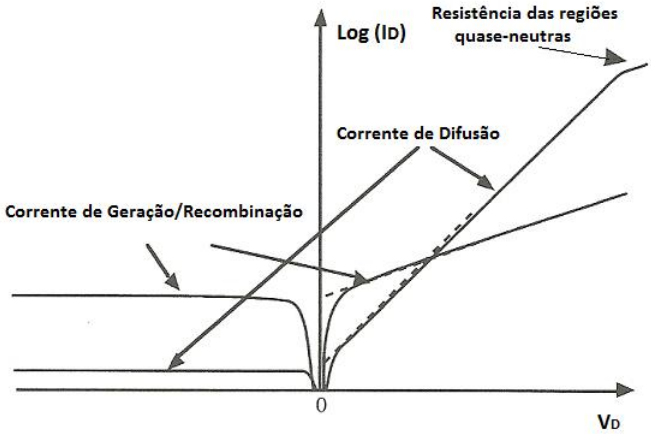
Onde:

$$J_{rg} = \frac{q\,n_i}{2\,\tau_0}\sqrt{\frac{2\varepsilon_{si}(V_{BI} - V_D)}{q}\;.\;\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}\;\left[\exp\left(\frac{q\,V_D}{2kT}\right) - 1\right] \tag{40}$$

Considerando $\tau_0 = \tau_P = \tau_N$ (tempo de vida dos elétrons e das lacunas são iguais).

A corrente de geração/recombinação é maior que a corrente de difusão quando o diodo está polarizado diretamente com baixas tensões ou quando o diodo está polarizado reversamente, conforme pode ser visto na Figura 22. No caso da polarização reversa, a corrente de geração é dominante já que $pn < n_i^2$. Entretanto, quando o diodo está polarizado diretamente com altas tensões de polarização, a corrente de difusão se sobrepõe a corrente de recombinação (SZE, 1981).

Figura 22 – Correntes de difusão, geração e recombinação em uma junção real



Fonte: (SZE, 1981)

A origem física dessa corrente é a seguinte: quando a junção é polarizada reversamente, o produto pn é menor do que n_i^2, portanto, o mecanismo de geração SRH força um aumento no produto pn para o seu valor de equilíbrio. Dessa forma, os portadores gerados

são separados pelo campo elétrico na RDD. As lacunas geradas são atraídas para a região P, e, os elétrons, para a região N. O movimento desses transportadores constitui a corrente de geração (SZE, 1981).

Outra característica de um diodo real é que a resistência das regiões P e N não podem ser desprezadas em alta polarização direta, o que causa uma redução da corrente (este fato pode ser observado na Figura 22) (SZE, 1981).

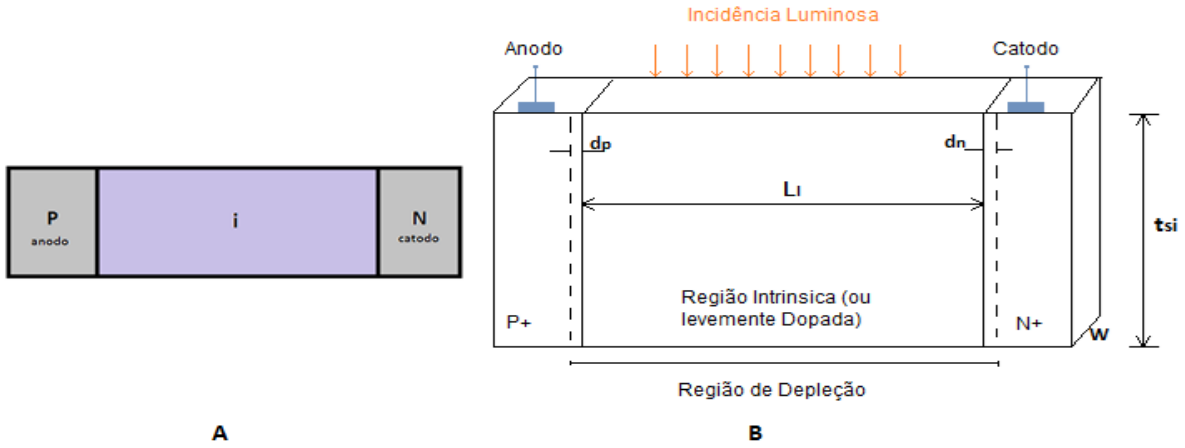
A corrente de um diodo também é variável com a temperatura, porém os efeitos da temperatura serão considerados no item 3.6.

3.5 FOTODIODO PIN

Pode-se verificar a estrutura de um diodo PIN na Figura 23A e 23B. Este dispositivo consiste em uma junção PN com uma região quase intrínseca no meio de comprimento L_I. Na prática, esta região intrínseca pode ser tanto N quanto P com baixa concentração de portadores (SZE, 1981).

Esta região com baixa concentração pode estar totalmente depletada ou não, dependendo do valor da tensão aplicada ao dispositivo e da sua dopagem (SEDRA e SMITH, 1988).

Figura 23 – Dispositivo PIN.



Fonte: Autor

Legenda: A)Vista frontal e B) Lateral de um fotodiodo PIN

A absorção da luz produz pares elétron-lacuna. Os pares produzidos dentro da RDD ou a até no máximo um comprimento de difusão dela, podem ser separados pela ação do

campo elétrico, fazendo com que corrente flua pelo dispositivo, através da deriva dos portadores pela RDD (AFZALIAN, 2006).

Conforme já foi visto no item 3.3.1, a profundidade de penetração de luz no semicondutor varia de acordo com o seu comprimento de onda (SZE, 1981); (AFZALIAN e FLANDRE, 2005), ou seja, quanto menor o comprimento de onda, menor a profundidade da penetração. Por isso, em fotodiodos PIN, os portadores gerados pela radiação luminosa podem contribuir de forma mais eficiente para a fotocorrente, já que a região de depleção, nestes dispositivos, é formada desde a superfície, ao contrário dos dispositivos verticais que serão demonstrados no item 5.

Além disso, a taxa de recombinação dentro da RDD é muito menor que nas regiões P e N (SZE, 1981), por isso, quanto maior o tamanho da camada de depleção, menor será a perda por recombinação e, portanto, maior será a quantidade de absorção da luz. Esta é a razão pela qual os fotodiodos PIN geralmente operam em polarização reversa, aumentando assim o tamanho da sua RDD (AFZALIAN, 2006).

No entanto, os pares elétrons-lacunas gerados devem ser rapidamente separados pela ação do campo elétrico a fim de evitar a recombinação. Mas, para se ter um campo elétrico interno elevado, é necessária uma camada de depleção pequena (MARTINO, PAVANELLO e VERDONCK, 2003). Desta forma, há um conflito na determinação do tamanho da RDD, uma vez que ela deve ser grande o suficiente para permitir que o maior número possível de fótons seja absorvido, e suficientemente pequena para reduzir o tempo de trânsito dos portadores fotogerados (STREEMAN e BANERJEE, 2000).

Outra importante característica dos diodos PIN é a sua corrente de escuro (I_{DARK}), que é a corrente de fuga quando o dispositivo está reversamente polarizado, mas não está exposto à luz. A corrente de escuro é devida à geração térmica de pares elétron-lacuna dentro da região de depleção, pois acima de T=0K, os elétrons podem adquirir energia suficiente para "saltar" para a banda de condução devido às vibrações da rede cristalina (conforme já comentado no item 3.2.1). Esta geração é observada tanto no volume do semicondutor, quanto na sua superfície e a contribuição das regiões fora da RDD é de fato várias ordens de magnitude menor (AFZALIAN, 2006). A corrente de escuro é proporcional à área de junção e para uma área fixa, ela varia com a largura do diodo (W) e com a espessura da camada de silício (t_{si}).

Portanto a corrente total (I_T) que flui através do dispositivo é a soma da corrente de escuro com a corrente gerada pela incidência de luz (corrente fotogerada: I_{FG}) e é dada pela equação (41) (AFAZALIAN; FLANDRE, 2007).

$$I_T = I_{FG} + I_{DARK} \tag{41}$$

3.6 EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

A variação da temperatura provoca uma série de efeitos nas propriedades elétricas dos semicondutores e nos parâmetros elétricos dos dispositivos (SZE, 1981). Alguns desses efeitos, diretamente relacionados com este trabalho, serão apresentados neste capítulo.

3.6.1 O efeito na concentração intrínseca e na ionização incompleta de portadores

A concentração intrínseca de portadores (n_i) no semicondutor, que indica a quantidade de portadores livres gerados por excitação térmica, depende apenas do material e da temperatura. Assim, em temperaturas próximas de 0 K praticamente não há portadores livres. Ao aumentar a temperatura, os elétrons ganham energia suficiente para se tornarem elétrons livres, gerando pares elétron-lacuna. A concentração intrínseca é dada pela equação (42) (GUTIERREZ e CLAYES, 1991).

$$n_i = \sqrt{N_C . N_V} exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \tag{4242}$$

Onde N_C e N_V são, respectivamente, as densidades de estados das bandas da condução e valência (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

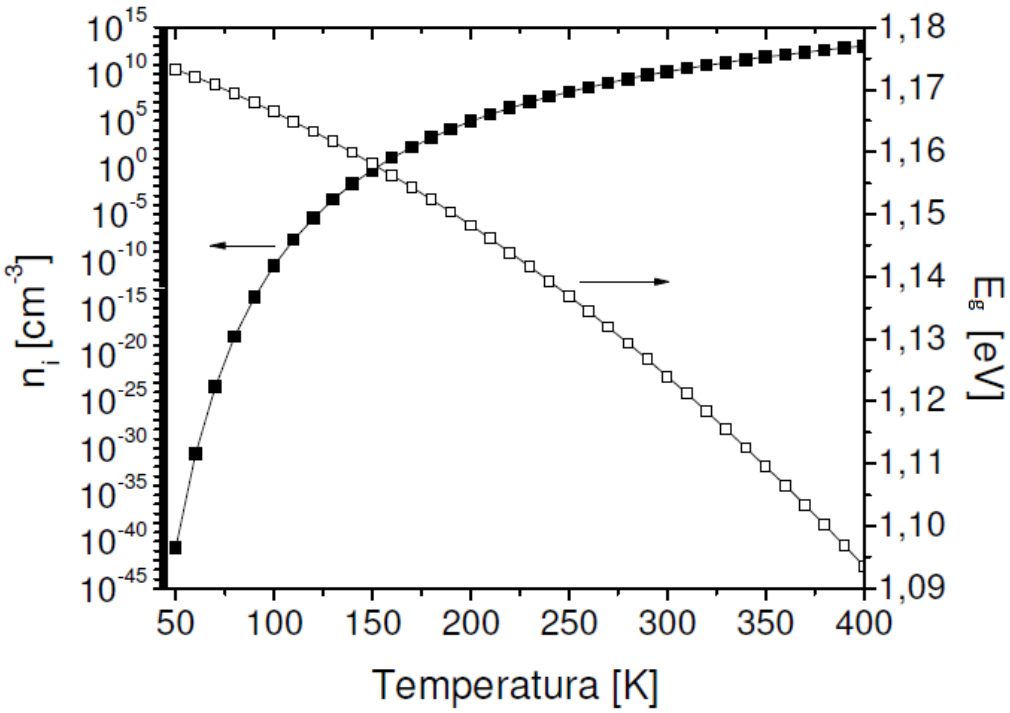
A largura da faixa proibida do silício (E_g) também depende da temperatura e é dada pela equação (43) segundo (SELBERHERR, 1989):

$$\begin{aligned} E_g &= 1{,}17 + 1{,}059.10^{-5}.T - 6{,}05.10^{-7}.T^2, \;\; para\, T \leq 170K \; ou \\ E_g &= 1{,}1785 - 9{,}025.10^{-5}.T - 3{,}05.10^{-7}.T^2, \;\; para\, T > 170K \end{aligned} \tag{4343}$$

A Figura 24 mostra a variação da concentração intrínseca de portadores (n_i) e da largura de faixa proibida do silício (E_g) com a temperatura entre 50 K e 400 K. Nesta figura os valores de n_i e de E_g foram calculados através das equações 42 e 43. No cálculo de n_i, as densidades de estados N_C e N_V foram calculadas de acordo com a ref. (GUTIERREZ e CLAYES, 1991). Pode-se notar que há um pequeno aumento de E_g com a redução da

temperatura, enquanto que n_i diminui muitas ordens de grandeza na mesma faixa (STREEMAN e BANERJEE, 2000).

Figura 24 – Variação da concentração intrínseca de portadores e da largura de faixa proibida do silício em função da temperatura



Fonte: (DORIA, 2010)

Em um semicondutor dopado, a energia térmica disponível pode não ser suficiente para ionizar todas as impurezas (SELBERHERR, 1989). Dessa forma, a quantidade de portadores ionizados (N_A^-) será menor que a concentração de impurezas aceitadoras, N_A, presentes no material e pode ser expressa pela equação (44) (STREEMAN e BANERJEE, 2000):

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + 4exp\left(\frac{E_a - E_{FP}}{kT}\right)} \tag{44}$$

Ou, no caso de impurezas doadoras:

$$N_D^- = \frac{N_D}{1 + 2exp\left(\frac{E_{FN} - E_d}{kT}\right)} \tag{45}$$

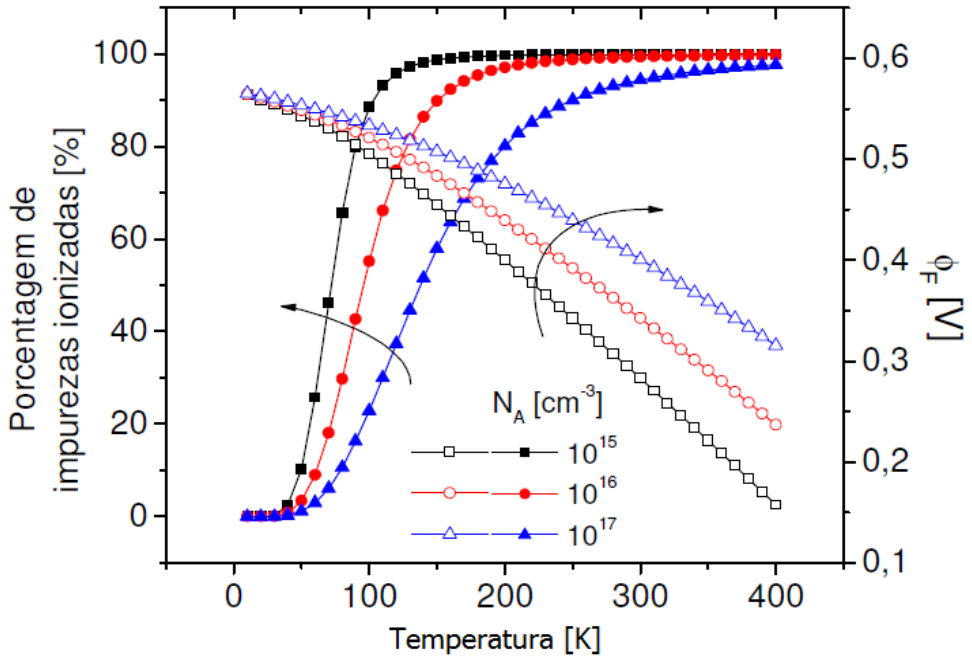
Onde N_D é a concentração de impurezas doadoras, N_D^- é a quantidade de portadores doadores ionizados, E_a e E_d são os níveis de energia de ativação de impurezas aceitadoras e doadoras, E_{FN} e E_{FP} são os níveis de Fermi considerando material tipo N e tipo P, respectivamente. (MCKELVEY, 1982)

O potencial de Fermi (Φ_F), descrito nas equações (8) e (9), também depende da temperatura (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

Nesse caso, a concentração N_A deve ser substituída por N_A^-. A Figura 25 mostra a variação do potencial de Fermi e da porcentagem de impurezas ionizadas com a temperatura para silício com diversas concentrações de dopantes. Para obter N_A^-, E_{FP} foi calculado de acordo com a ref. (MCKELVEY, 1982).

Pode-se perceber que ao reduzir a temperatura, o potencial Φ_F aumenta, devido à enorme redução da concentração intrínseca n_i. O aumento de Φ_F é menor para a concentração de dopantes mais alta. Em temperaturas muito baixas, inferiores a 50 K, uma parcela ínfima das impurezas é ionizada (SZE, 1981).

Figura 25 – Variação do potencial de Fermi e da porcentagem de impurezas ionizadas com a temperatura para diversas concentrações de dopantes.



Fonte: (DORIA, 2010)

3.6.2 O efeito na corrente de escuro

A corrente total reversa em um diodo PIN totalmente depletado pode ser aproximada pela equação (46) (SZE, 1981):

$$I_{DARK} = qAn_i^2 \left(\frac{1}{N_A}\sqrt{\frac{D_N}{\tau_N}} + \frac{1}{N_D}\sqrt{\frac{D_P}{\tau_P}} \right) + \frac{qn_iW}{\tau_e} \tag{46}$$

Onde W é a largura do dispositivo, A é a área da região de depleção e τ_e é o tempo de vida efetivo da geração térmica na região de depleção.

Na equação (46), o primeiro termo representa a componente de difusão da região neutra e é proporcional a n_i^2 e o segundo termo representa a corrente de geração térmica na RDD e é proporcional a n_i. Nota-se que ambos os termos são dependentes de n_i e consequentemente, da temperatura (SOUZA, BULTEEL, *et al.*, 2011).

Em temperatura de zero Kelvin, não há portadores de carga, uma vez que todos os níveis energéticos da faixa de valência estão ocupados por elétrons e todos os níveis energéticos da faixa de condução estão desocupados. Nessa temperatura, o material se comporta como um isolante. Quando há um aumento da temperatura, pares elétrons-lacunas são gerados, pois alguns elétrons da faixa de valência são excitados termicamente, adquirindo energia suficiente para passar para a faixa de condução, deixando um número igual de estados desocupados, chamados de lacunas, na faixa de valência. Quanto maior a temperatura, mais níveis da faixa de condução tornam-se ocupados e mais níveis da faixa de valência desocupados e maior é a corrente de geração térmica (SOUZA, BULTEEL, *et al.*, 2011).

Para semicondutores com valores de concentração intrínseca (n_i) pequenos, como o silício, a corrente de geração é a dominante na corrente de escuro. Entretanto, para temperaturas altas (SZE, 1981), a corrente de difusão será dominante, já que n_i passa a ser muito maior em altas temperaturas.

3.6.3 O efeito da variação da temperatura na mobilidade dos portadores

A mobilidade dos portadores é definida como a facilidade com que os elétrons e lacunas atravessam a rede cristalina de um material. Este parâmetro está relacionado diretamente com a capacidade de fornecimento de energia do dispositivo. Quanto menor for a

resistência do material, menor será a perda de energia, e assim, maior mobilidade dos portadores (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002).

No interior do material, o movimento dos elétrons não é livre, ocorrendo colisões entre portadores e átomos da rede cristalina. Essas colisões ocorrem devido aos mecanismos de espalhamento, que podem ser classificados como: espalhamento de rede, espalhamento por impurezas ionizadas, espalhamento portador-portador e espalhamento por impurezas neutras (GUTIERREZ e CLAYES, 1991).

a- Espalhamento de rede ou espalhamento por fônons

É um dos mais importantes mecanismos de espalhamento, está relacionado às interações entre os portadores e a vibração da rede cristalina, também chamada de fônons. Este mecanismo está diretamente relacionado com a temperatura, onde as vibrações diminuem com a redução de temperatura (GUTIERREZ e CLAYES, 1991);

b- Espalhamento por impurezas ionizadas

Este mecanismo considera a redução da mobilidade dos portadores devido às altas concentrações de dopantes introduzidas na rede cristalina do material (GUTIERREZ e CLAYES, 1991);

c- Espalhamento portador-portador

O mecanismo de espalhamento portador-portador exerce influência sobre a mobilidade em altas densidades de portadores, como em dispositivos de potência, quando a quantidade de portadores supera a de dopantes (SELBERHERR, 1989), ou em dispositivos submicrométricos, que apresentam altas densidades de corrente;

d- Espalhamento por impurezas neutras

Este mecanismo está relacionado às impurezas não ionizadas em baixas temperaturas e tem influência sobre a mobilidade apenas para concentrações de impurezas neutras acima de $10^{18}cm^{-3}$ (DORKEL e LETURCQ, 1981).

A mobilidade dos portadores pode ser descrita pela equação (47), através do modelo unificado para baixos campos elétricos, proposto por Klaassen (KLAASSEN, 1992), onde são considerados os mecanismos de espalhamento, por temperatura e concentração de dopantes, podendo ser combinados através da regra de Mathiessen (GUTIERREZ e CLAYES, 1991).

$$\mu_0 = \frac{1}{\frac{1}{\mu_{i,L}} + \frac{1}{\mu_{i,DAP}}} \tag{47}$$

Onde μ_0 é a mobilidade dos portadores independentes do campo elétrico, $\mu_{i,L}$ é a mobilidade dos portadores devido ao espalhamento de rede (KLAASSEN, 1992) e $\mu_{i,DAP}$ é a mobilidade dos portadores devido ao espalhamento por impurezas ionizadas, portador-portador e impurezas neutras (KLAASSEN, 1992).

A equação (47) não considera a dependência da mobilidade com o campo elétrico transversal, nem com o lateral. Por isso, para se obter a mobilidade total dos portadores, é necessário considerar o campo elétrico transversal, que é aquele que atrai os portadores para a primeira ou segunda interfaces (no caso da tecnologia SOI). Entretanto, os fotodiodos PIN convencionais não apresentam o terminal de porta, por isso essa atração poderá ocorrer somente através da segunda interface (no caso de SOI), com o terminal de substrato. Já no caso de fotodiodos com porta (*gated photodiode*), a dependência com o campo elétrico transversal é importante (BULTEEL; FLANDRE., 2009).

O campo elétrico lateral afeta a mobilidade devido à saturação da velocidade do portador. A velocidade de saturação dos portadores é dependente da temperatura e pode ser expressa através do modelo proposto por Canali (CANALI e AL., 1975). As equações (48) e (49) apresentam a velocidade de saturação para elétrons e lacunas, respectivamente:

$$v_{sat,e} = 10^7 . \left(\frac{T}{300}\right)^{-0,87} \tag{48}$$

$$v_{sat,h} = 8,37.10^6 . \left(\frac{T}{300}\right)^{-0,52} \tag{4944}$$

4 DESEMPENHO DOS FOTODETECTORES

O objetivo de um fotodetector é converter um sinal óptico em um sinal elétrico. Idealmente ele teria que detectar todos os fótons incidentes, independentemente do seu comprimento de onda, ou frequência e transformá-los em sinal elétrico sem introduzir nenhum tipo de ruído. Infelizmente, os fotodetectores reais, tais como o diodo PIN, não são capazes de efetuar esta conversão sem nenhum tipo de perda, por isso, a seguir, serão apresentadas as principais formas de medir o seu desempenho (AFZALIAN, 2006).

4.1 EFICIÊNCIA QUÂNTICA

A eficiência quântica total (EQ_T) é definida como sendo a razão entre a corrente de anodo realmente fotogerada (I_{FG}) e a máxima corrente que poderia ter sido gerada se todos os fótons tivessem sido convertidos em fotoportadores (SZE, 1981). Desta forma, EQ_T é dada pela equação (50) (AFZALIAN, 2006).

$$EQ_T = \frac{I_{FG}}{I_{FG\ (\max)}} \tag{50}$$

Onde $I_{FG(max)}$ é a máxima corrente fotogerada pelo dispositivo.

Idealmente a eficiência quântica total seria 100% se cada fóton gerasse um par elétron-lacuna, porém a eficiência real é limitada por três fatores (AFZALIAN, 2006):

a- Pela área fotossensível: Uma parte da área total do dispositivo, A_T, não pode ser considerada fotoativa, porque a luz não consegue penetrar no semicondutor, já que este está coberto com metal. O próprio óxido ou silício podem refletir parte da radiação luminosa incidente. Este efeito pode ser minimizado com a utilização de coberturas anti-reflexivas (AMBROZIAK, 1968). Neste ponto, pode-se definir então, a eficiência quântica externa (EQ_E) que corresponde apenas à eficiência da área fotossensível (A_{FS}) do dispositivo. Em (KNITTL, 1976) define-se a equação (51):

$$EQ_T = \frac{A_{FS}}{A_T} EQ_E \tag{51}$$

b- Pelas reflexões: Em qualquer estrutura com incidência de luz, há perdas por reflexão e transmissão, conforme foi visto no item 2.4. Nem toda a potência luminosa incidente (P_{IN}) é absorvida pelo dispositivo (P_A). Esta relação entre P_A e P_{IN} é dependente do comprimento de onda e da profundidade do semicondutor e é chamada de máxima eficiência alcançável, η, dada pela equação (52) (AFZALIAN, 2006).

$$\eta = \frac{P_A}{P_{IN}} \tag{52}$$

c- Pela recombinação: Nem todos os portadores que foram gerados pelos fótons incidentes serão coletados pelos terminais do fotodiodo, pois alguns deles se recombinarão, principalmente fora da região de depleção. Os portadores gerados fora da RDD devem primeiramente se difundir para dentro da RDD, porém a difusão é um fenômeno lento, que aumenta a recombinação. Pode-se definir, portanto, a eficiência quântica interna (EQ_I) do dispositivo, a qual leva em consideração apenas as perdas por recombinação e é dada por (KNITTL, 1976) através da equação (53) (KNITTL, 1976) .

$$EQ_I = \frac{I_{FG}}{I_{DISP}} \tag{53}$$

Onde I_{FG} é a corrente fotogerada e I_{DISP} é a corrente disponível no dispositivo, ou seja, seria a corrente fotogerada se não houvesse perdas por recombinação.

Portanto, pode-se chegar à expressão da eficiência E_{QT} levando em consideração os três mecanismos de perda citados acima através da equação (54) (AFZALIAN, 2006).

$$EQ_T = \frac{P_A}{P_{IN}} \frac{A_{FS}}{A_T} EQ_I \tag{54}$$

4.2 RESPONSIVIDADE

Uma importante figura de mérito para avaliar o desempenho dos fotodetectores é a sua responsividade (R), definida como sendo a razão entre a corrente fotogerada (I_{FG}) e a potência

óptica incidente (P_{IN}) (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002), dada pela equação (55).

$$R = \frac{I_{FG}}{P_{IN}} = \frac{q\lambda}{hc} EQ_T \quad em\ A/W \tag{55}$$

Onde q é a carga elementar do elétron, λ é o comprimento de onda, h é a constante de Planck e c é a velocidade da luz no vácuo.

De acordo com a equação (41), a corrente total do dispositivo é a soma da corrente fotogerada e da corrente de escuro, por isso, chega-se à equação (56) (SZE, 1981).

$$R = \frac{I_T - I_{DARK}}{P_{IN}} \tag{56}$$

4.3 RELAÇÃO SINAL-RUÍDO

A corrente de escuro presente em um fotodetector, já exposta no item 3.5, é na verdade, uma forma de ruído inerente a estes tipos de dispositivos. Portanto, pode ser definida uma relação sinal ruído (SNR) através da equação (57).

$$SNR = \frac{I_{FG}}{I_{DARK}} = \frac{I_T - I_{DARK}}{I_{DARK}} \tag{57}$$

Esta relação pode também ser expressa em decibéis (dB)

A relação sinal ruído é altamente influenciada pela temperatura, como será visto ao longo desta tese.

4.4 SENSIBILIDADE

A sensibilidade é definida pela mínima potência do sinal incidente que é detectável (AFZALIAN, 2006) e depende da corrente de escuro, da responsividade e do ruído total do sensor (incluindo o ruído do circuito de leitura). Esta medida é importante, pois, mesmo que o dispositivo tenha uma responsividade alta, pode ser que ele não seja sensível a uma determinada potência de sinal muito baixa, ou seja, a sua corrente fotogerada e a sua corrente de escuro não seriam distinguíveis uma da outra.

4.5 VELOCIDADE DE RESPOSTA

A velocidade de resposta de um fotodetector é limitada pela combinação de três fatores: a difusão dos portadores, o tempo de deriva dentro da RDD e a sua capacitância (AFZALIAN e FLANDRE, 2004).

Os portadores gerados fora da região de depleção devem difundir-se para a RDD, resultando num considerável tempo de atraso (pois o mecanismo de difusão é lento) (AFZALIAN, 2006).

Se a região intrínseca estiver totalmente depletada, os portadores gerados ali serão coletados através do seu mecanismo de deriva, o qual é muito mais rápido. Porém, caso a região intrínseca não esteja totalmente depletada, haverá também difusão (AFZALIAN, 2006).

Portanto, a RDD não deve ser muito grande para que não haja atrasos relativos ao tempo de trânsito dos portadores dentro dela. Por isso, a determinação do tamanho da RDD e consequentemente do tamanho da região intrínseca (L_I) é um dos fatores mais importantes para a velocidade de resposta do fotodetector PIN (FLANDRE e AL, 2001).

A largura de banda (B) é um parâmetro importante dos fotodetectores, principalmente em aplicações de comunicação de dados e corresponde à faixa de frequência na qual o fotodetector tem uma resposta em frequência aproximadamente plana (com variação inferior a 3 dB) (MARK, SILVANO, *et al.*, 2004). Ela é dada pela equação (58) (MARK, SILVANO, *et al.*, 2004), no qual f_2 é a máxima frequência de corte e f_1 é a mínima frequência de corte.

$$B = f_2 - f_1 \tag{58}$$

A largura de banda também define o limite de transferência de dados, usualmente descrito em bits/segundos ou b/s (MARK, SILVANO, *et al.*, 2004).

4.6 DESEMPENHOS DOS FOTODIODOS PIN ANALISADOS NESSA TESE

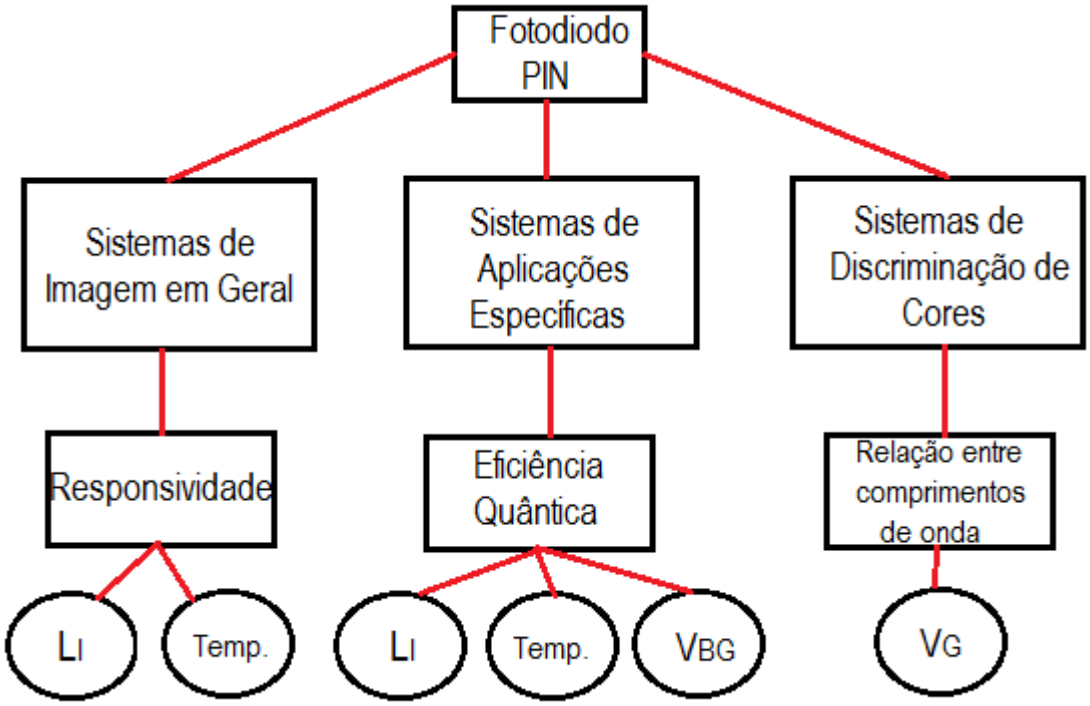
Neste momento já é possível explicar os três tipos de aplicação que serão abordados neste trabalho e as suas principais figuras de mérito. É importante mencionar que os fotodiodos PIN analisados nesse trabalho podem operar em três tipos de aplicação distintas e que, cada aplicação requer um determinado desempenho. Por isso, alguns fotodiodos foram desenvolvidos especificamente para essa tese. Segundo a Figura 26, primeiramente será

apresentado o resultado obtido para fotodiodos PIN ao serem utilizados como sensores de imagem em geral. Nesse caso, é importante que os dispositivos apresentem uma alta responsividade na faixa da radiação eletromagnética visível (AFZALIAN, 2006). Além disso, essa análise será feita a fim de mostrar qual a melhor configuração do dispositivo em termos de comprimento da região intrínseca em função da temperatura de operação.

Num segundo momento, o desempenho de fotodiodos PIN será analisado em aplicações específicas que requerem uma alta eficiência quântica na faixa do ultra-violeta e azul (AFZALIAN, 2006). Dessa forma, a polarização do terminal de *back-gate* em conjunto com a variação da temperatura serão analisados a fim de determinar a melhor condição de operação em função do comprimento da região intrínseca.

Finalmente, os fotodiodos PIN serão analisados operando como discriminadores de cores a fim de substituir a utilização de filtros de cores em aplicações de sensores de imagem. Nesse caso, os dispositivos apresentarão um terminal de porta, o qual será importante para incrementar a relação de correntes apresentada pelos diferentes comprimentos de onda da radiação luminosa.

Figura 26 – Quadro geral de análise dos fotodiodos PIN



Fonte: Autor

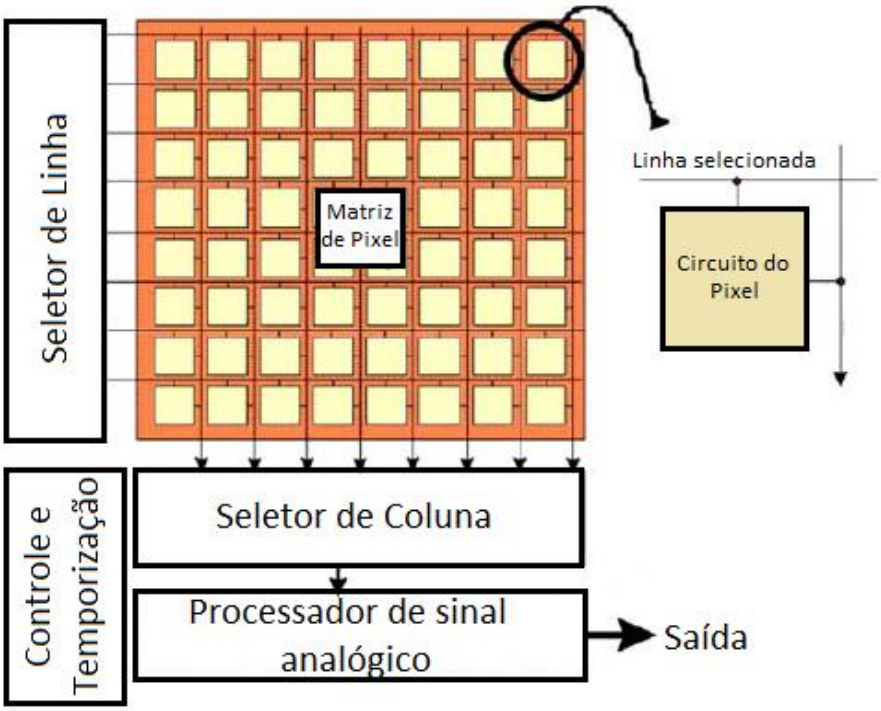
5 TIPOS E APLICAÇÕES DE FOTODETECTORES

Nesse capítulo serão apresentados os principais tipos de fotodetectores conhecidos pela comunidade científica atualmente a fim de nortear a comparação dos parâmetros e resultados obtidos nesse trabalho, os quais serão apresentados nos capítulos seguintes.

Basicamente a topologia dos fotodetectores é dividida em três grandes grupos, definidos de acordo com a sua aplicação e com o comprimento de onda que utilizam: sistemas de imagem, comunicação óptica e aplicações específicas (AFZALIAN, 2006).

Os fotodetectores utilizados em sistemas de imagem necessitam ter uma alta responsividade em todos os comprimentos de onda do espectro visível, bem como uma alta relação sinal-ruído e baixa corrente de escuro (AFZALIAN; FLANDRE, 2003). Um exemplo de sensor de imagem pode ser visto na Figura 27, o qual é composto por quatro blocos principais: a matriz de pixels, o processador de sinais analógico, seletores de linha e coluna e, finalmente, o bloco do temporizador e controle. Obviamente a intenção deste trabalho é estudar a operação do fotodetector, que está no bloco do pixel, pois cada pixel possui o seu fotodetector e ele determina grande parte da qualidade da imagem (BIGAS, CABRUJA, *et al.*, 2006).

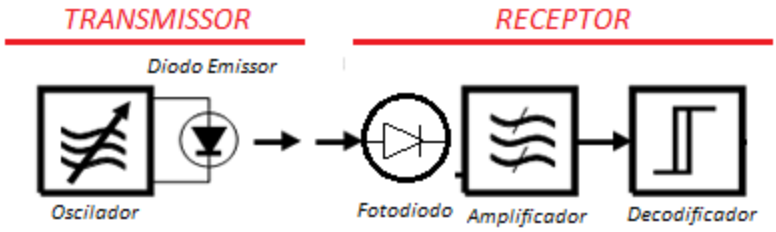
Figura 27 – Leiaute básico de um sensor de imagem CMOS



Fonte: Autor “adaptado de” (BIGAS, CABRUJA, *et al.*, 2006)

Os fotodetectores utilizados em sistema de comunicação óptica necessitam de uma alta largura de banda e grande sensibilidade especialmente na faixa do infra-vermelho (AFZALIAN, 2006). Pode-se verificar através da Figura 28 que um sistema óptico é formado por um bloco transmissor e outro receptor. No bloco receptor, o principal elemento é o fotodiodo, seguido de um amplificador e um decodificador (AFZALIAN, 2006).

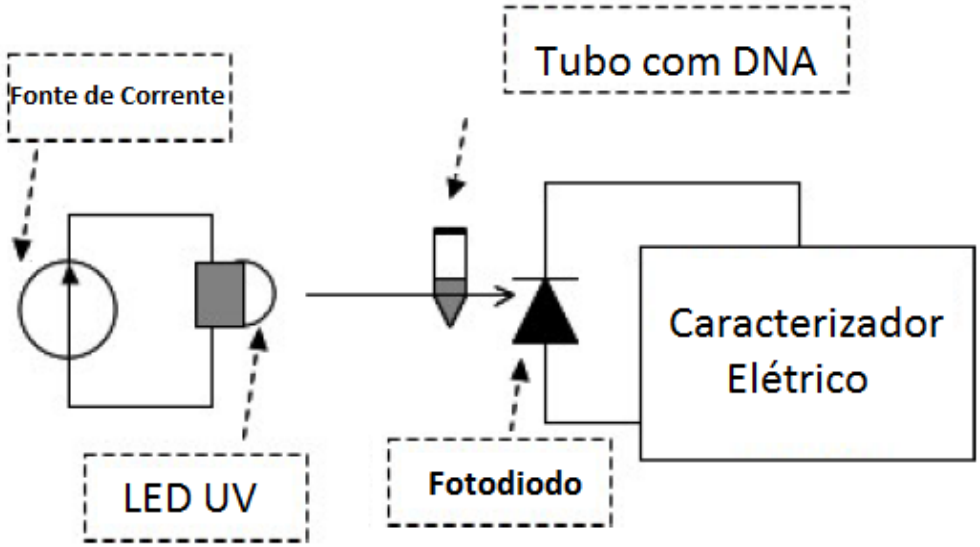
Figura 28 – Receptor óptico



Fonte: Autor “adaptado de” (AFZALIAN, 2006)

Já os fotodetectores utilizados para aplicações específicas, tais como medidores de concentração de ozônio, DNA e detectores de chama necessitam ter uma alta relação sinal-ruído na faixa do ultravioleta, além de alta eficiência quântica (BULTEEL, SCHOLOGEL e FLANDRE, 2003). A Figura 29 mostra um sistema completo para medição de concentração de DNA, que utiliza o método de absorção de radiação eletromagnética na faixa do UV pelas proteínas do sangue (BULTEEL, SCHOLOGEL e FLANDRE, 2003). Nesse sistema, o LED emite é polarizado por uma fonte de corrente e emite radiação eletromagnética na faixa do UV, a qual, passa pelo tubo contendo DNA e é absorvida de acordo com a quantidade contida no tubo. Dessa forma, a radiação que não é absorvida pela DNA pode chegar ao fotodiodo e, medido pelo sistema de caracterização elétrica. A capacidade de medir intensidades ópticas tão baixas requer fotodetectores muito eficientes (BULTEEL, SCHOLOGEL e FLANDRE, 2003).

Figura 29 – Sistema para medição de concentração de DNA



Fonte: Autor "adaptado de" (BULTEEL, SCHOLOGEL e FLANDRE, 2003)

Como pôde ser visto, todas as aplicações mencionadas fazem uso de fotodetectores, os quais, para cada aplicação devem ter o seu desempenho priorizado em função da resposta a ser obtida, além do comprimento de onda utilizado.

Por isso, neste capítulo serão mostradas algumas topologias de fotodetectores utilizadas em sistemas de imagem, comunicação óptica e em aplicações específicas.

5.1 TECNOLOGIA CMOS CONVENCIONAL (BULK)

De acordo com o que já foi visto nos capítulos anteriores, a profundidade de penetração da radiação luminosa depende do seu comprimento de onda. Como pode ser visto na Figura 15, para λ=400nm, a radiação será absorvida na profundidade de aproximadamente 80nm da camada de silício, já para λ=1000nm, a profundidade de absorção será de 100µm (AFZALIAN e FLANDRE, 2004). Tendo em vista esta larga diferença na profundidade de penetração, os fotodetectores utilizados em sistemas de imagem como, por exemplo, em câmeras fotográficas, têm que ser capazes de absorver radiação luminosa em toda a faixa do espectro visível, por isso, uma camada espessa de silício é necessária (AFZALIAN, 2006).

Porém, ao mesmo tempo em que a camada de silício espessa aumenta a sua responsividade, também prejudica a sua velocidade de resposta, pois os portadores gerados no

substrato terão que difundir até a camada de depleção para então contribuírem com a fotocorrente, por isso, os fotodetectores que utilizam a tecnologia CMOS convencional tem largura de banda geralmente abaixo de 100MHz (AFZALIAN, 2006) e, portanto, são inapropriados para utilizações que necessitem de alta velocidade de resposta.

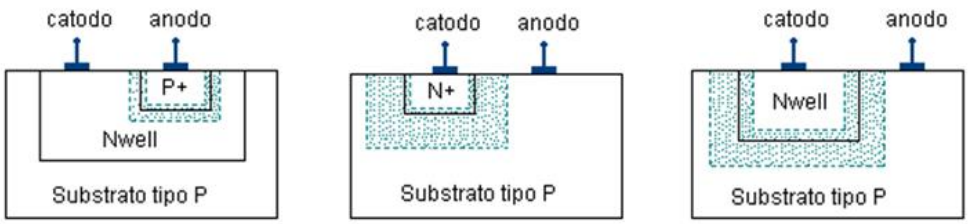
Para aplicações em sistemas médicos ou de meio-ambiente, ou mesmo para aplicações de armazenamento de dados ópticos como o DVD; se faz necessária a fotodetecção de comprimentos de onda na faixa do ultravioleta (UV) em torno de 390nm (AFZALIAN e FLANDRE, 2005). Desta forma, a absorção da radiação é extremamente superficial, o que faz com que o restante do substrato do dispositivo só forneça ruído (em forma de corrente de escuro) (AFZALIAN e FLANDRE, 2004).

Nos itens a seguir serão apresentados alguns fotodiodos que utilizam tecnologia CMOS convencional (item 5.1) e SOI (item 5.2). A análise destes dispositivos se faz necessária a fim de referenciar e parametrizar os resultados obtidos com os dispositivos caracterizados neste trabalho.

5.1.1 Fotodiodos convencionais (verticais)

A Figura 30 mostra três tipos de fotodiodos convencionais que utilizam o processo CMOS padrão, conhecidos como: P^+/N_{well}, N^+/P_{SUB} e N_{well}/P_{SUB} (CAMPOS, 2008). Pode-se verificar que a região de depleção formada entre as junções fica em sua grande parte distante da superfície, o que faz com que a absorção de radiação luminosa de comprimentos de ondas curtos seja bastante prejudicada. Além disso, a espessura da camada de depleção se torna de difícil controle, já que a concentração de dopantes é um parâmetro que depende da tecnologia utilizada (BIGAS, CABRUJA, *et al.*, 2006).

Figura 30 – Tipos básicos de fotodiodos em tecnologia CMOS: P+/Nwell, $N+/P_{SUB}$ e $Nwell/P_{SUB}$



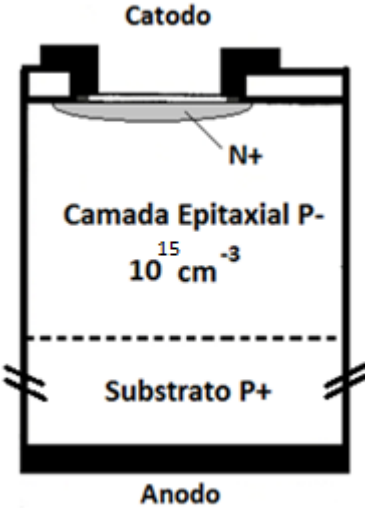
Fonte: Autor

5.1.2 Fotodiodos tipo PIN vertical

Com poucas modificações no processo de fabricação, foram desenvolvidos os fotodiodos PIN verticais, como pode ser observado na Figura 31, onde o fotodiodo é formado entre a camada N^+, a camada epitaxial P^- e o substrato P^+. Nesses dispositivos, a espessura usual da camada epitaxial é de 7µm, entretanto, com a concentração de dopantes da camada epitaxial de $10^{15}cm^{-3}$, a pequena tensão reversa disponível nos circuitos integrados resultará em uma camada de depleção de apenas 2µm, a qual, não é suficiente para gerar uma RDD em toda a camada epitaxial. Dessa forma, não é possível evitar o mecanismo de difusão de portadores para altos comprimentos de onda, pois eles serão gerados fora da região de depleção, o que resulta em uma baixa velocidade de resposta (ZIMMERMANN, 2000).

Ao tratar de sistemas de transmissão de dados de curta distância, a radiação eletromagnética utilizada é de 850nm (ZÍLIO, 2001), portanto, a espessura da camada epitaxial deveria ser maior para aumentar a sensibilidade (AFZALIAN, 2006). Em (ZIMMERMANN, 2000) relata-se a proposta de utilização de uma camada epitaxial de 15µm com baixa dopagem (em torno de $2x10^{13}cm^{-3}$). Estes parâmetros são necessários para depletar completamente a camada epitaxial e permitir uma diminuição do tempo de subida para 0,55ns, quando comparado ao tempo de subida de 7,24ns (com concentração de $10^{15}cm^{-3}$). Portanto, uma largura de banda de 1GHz poderia ser atingida com 40% de eficiência quântica total (BULTEEL, SCHOLOGEL e FLANDRE, 2003).

Figura 31 – Fotodiodo tipo PIN vertical



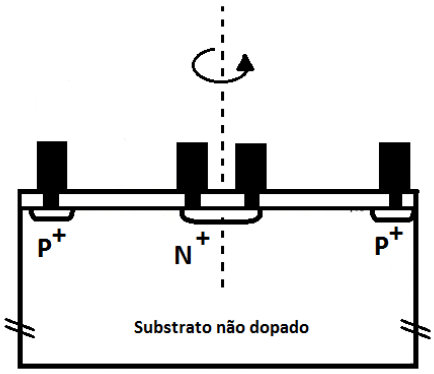
Fonte: Autor “adaptado de” (ZIMMERMANN, 2000)

5.1.3 Fotodiodo PIN lateral circular

Em (GARETT, QI e CAMPBELL, 1996) relata-se a fabricação juntamente com transistores NMOS, de um fotodiodo PIN Circular, com L_I de 1µm, utilizando a dopagem inicial da lâmina na camada P^- de $6x10^{12}cm^{-3}$ (Figura 32). Como este dispositivo apresentava uma camada de depleção muito próxima à superfície, a sua eficiência quântica era de 67% sem nenhuma cobertura anti-reflexiva e a sua largura de banda era de 1,3GHz.

A principal desvantagem destes dispositivos é que, reduzindo a concentração de dopantes da camada epitaxial, diminui-se a imunidade do efeito latch-up (tiristor parasitário) (FOROUHI e BLOOMER, 1988) ou pode-se causar problemas como punch-through (COLINGE, 2004).

Figura 32 – Fotodiodo PIN lateral circular



Fonte: Autor “adaptado de” (GARETT, QI e CAMPBELL, 1996)

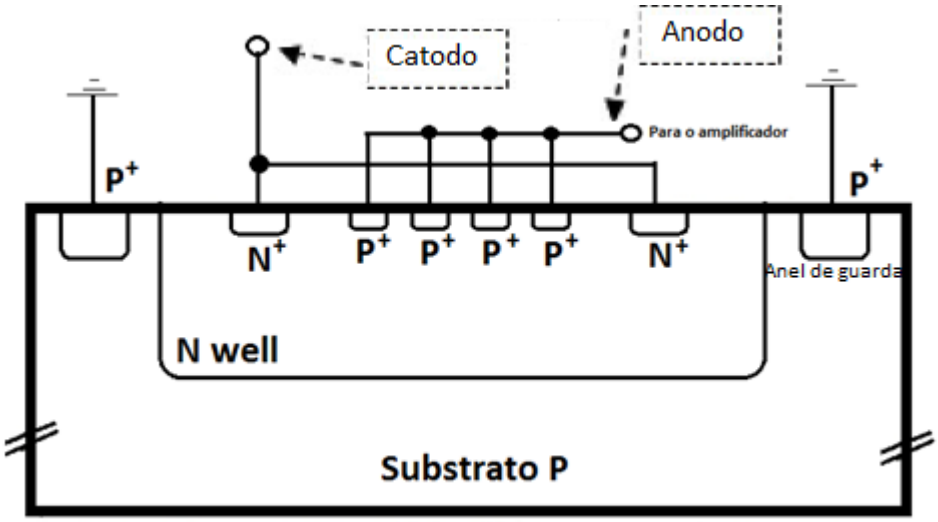
5.1.4 Fotodiodo PIN tipo finger

Os fotodiodos do tipo finger evoluíram dos fotodiodos PIN laterais, onde a camada P^+ foi substituída por dedos P^+ para melhorar a eficiência quântica para baixos comprimentos de onda. Ao variar a distância entre os dedos, bem como o seu comprimento, pode-se melhorar o compromisso entre sensibilidade e velocidade de resposta (ZIMMERMANN, 2000). Para curtas distâncias entre os dedos, os tempos de subida e descida ficaram abaixo de 0,25ns (largura de banda de 1GHz) para comprimentos de onda na faixa do azul (400nm). Já para o vermelho (por volta de 750nm), estes tempos ficaram em torno de 30ns, devido ao mecanismo lento de difusão dos fotoportadores gerados no substrato.

Em (WOODWARD; KRISHNAMOORTHY, 1999) foi proposto utilizar uma camada de material N (N-well) para reduzir este tempo de difusão, conforme mostra a Figura 33.

Nesta configuração, a corrente de anodo fica isenta dos portadores gerados no substrato, que são coletados pelo contato de substrato. Com uma área total de 16,5x16,5μm^2, foi reportado uma taxa de transmissão de dados de 1GBit/s, porém a responsividade era baixa devido à junção rasa formada entre P^+/ N_{Well} variando de 0,01 a 0,04 A/W (dependendo da tensão reversa aplicada). Entretanto, a corrente de escuro de 1nA era relativamente baixa comparada a outros fotodetectores com tecnologia convencional (WOODWARD; KRISHNAMOORTHY, 1999).

Figura 33 – Fotodiodo finger em Nwell em tecnologia CMOS convencional de 0,35μm

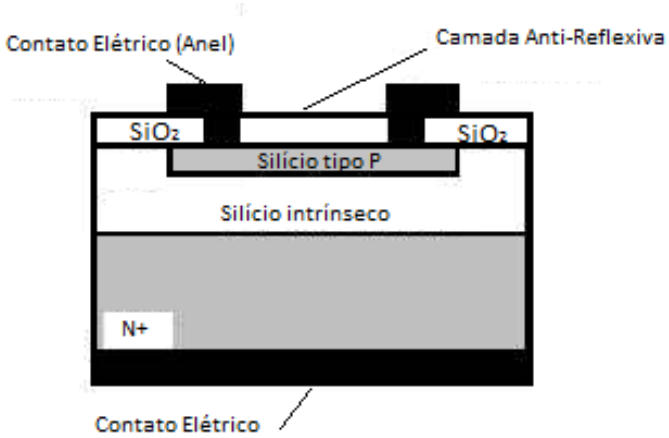


Fonte: Autor "adaptado de" (WOODWARD; KRISHNAMOORTHY, 1999)

5.1.5 Fotodiodo de barreira Schottky

Em dispositivos do tipo Schottky, a região de depleção se inicia próximo à superfície de silício, entretanto há uma alta perda em responsividade (sendo a máxima reportada em (KUSCHNERUS, RABUS e RICHTER, 1998) de 0,2A/W) devido à cobertura metálica necessária neste tipo de diodo. A Figura 34 mostra um diodo Schottky publicado em (KUSCHNERUS, RABUS e RICHTER, 1998), no qual, embora o metal desfavoreça a responsividade; também permite uma superfície de silício livre de defeitos de interface, o que melhora a estabilidade óptica.

Figura 34 – Fotodiodo do tipo schottky

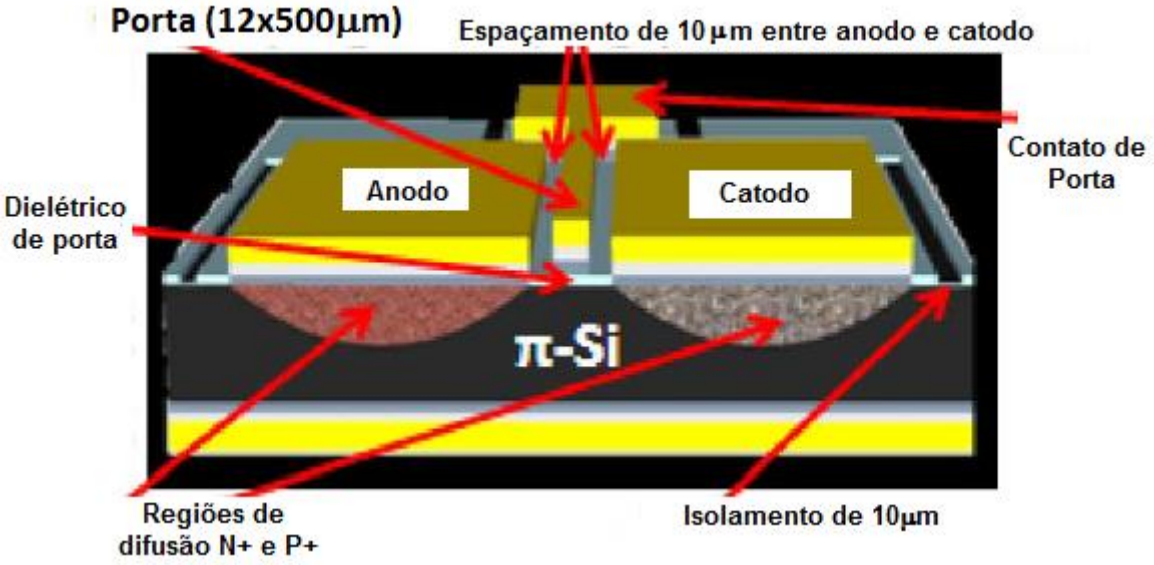


Fonte: Autor "adaptado de" (KUSCHNERUS, RABUS e RICHTER, 1998)

5.1.6 Fotodiodo Pin com porta

Alguns artigos da literatura (KAMRAN e FAIZ, 2011) (CAMPOS, FARAMARZPOUR e OGNIAN, 2013) reportam um dispositivo híbrido composto por um diodo Lateral PIN com um terminal de porta ocupando parte da região intrínseca conforme pode ser visto na Figura 35. Este dispositivo nada mais é do que um fotodiodo PIN lateral com um terminal de porta que controla o perfil da concentração de portadores ao longo da região intrínseca, além de controlar o perfil do campo elétrico. Uma importante observação sobre estes dispositivos é que eles podem ser fabricados pelos métodos convencionais de fabricação, não sendo necessário, portanto, um eletrodo de porta transparente ou iluminação pela região do substrato. Além disso, são semelhantes aos já fabricados TFET's ou *tunnel* FET. O perfil do campo elétrico ao ser modificado pelo terminal de porta pode ser utilizado para discriminação de cores, já que a região intrínseca é apenas parcialmente coberta pelo eletrodo de porta, permitindo que a luz atinja o substrato nas laterias da porta e fazendo com que o dispositivo atinja uma responsividade de 20 e 16 A/W para o vermelho e azul respectivamente.

Figura 35 – Fotodiodo com terminal de porta



Fonte: Autor "adaptado de" (KAMRAN e FAIZ, 2011)

Outras topologias também poderiam ser utilizadas para alterar o perfil do campo elétrico longitudinal da região intrínseca e efetuar a discrimação de cores, tais como a topologia *wave, diamond e fish* (NAVARENHO, SILVEIRA e GIMENEZ, 2015). Nestas topologias o efeito de canto aumenta a resultante longitudinal do campo elétrico, o que resulta em um aumento na velocidade média de deriva dos portadores, e, portanto, na corrente dos dispositivos.

5.2 TECNOLOGIA CMOS SOI

A tecnologia SOI consiste na fabricação de um dispositivo Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) em uma camada de silício que repousa sobre uma camada de dióxido de silício, chamada óxido enterrado (Buried OXide - BOX), que isola a região ativa do dispositivo do restante do substrato. Esta tecnologia apresenta vantagens em relação à tecnologia MOS convencional, no que tange ao desempenho de transistores e circuitos, tais como menor inclinação de sublimiar, maior transcondutância, maior imunidade à radiação e eliminação do efeito tiristor parasitário (COLINGE, 2004); (COLINGE, 2008). Além disso, nos circuitos acoplados aos fotodetectores, como circuitos de leitura e amostragem, foi provado em (MADEIRA, 2012) a melhor imunidade ao efeito de corpo na tecnologia SOI, quando comparada a tecnologia CMOS convencional.

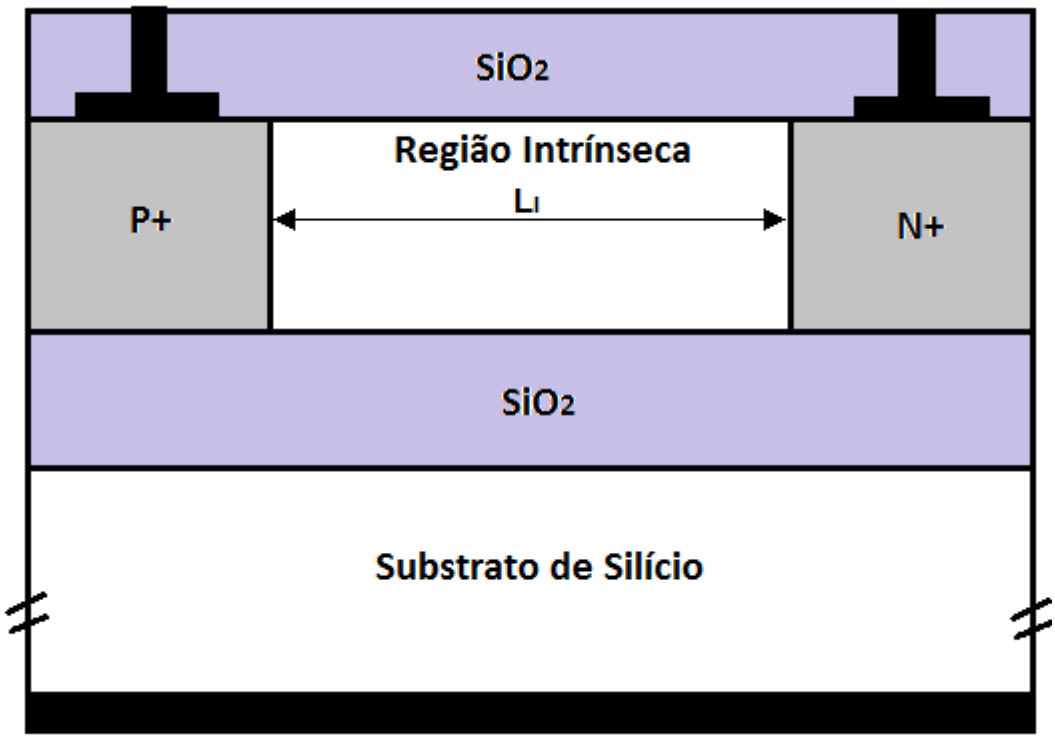
Devido à todas estas vantagens, e a larga utilização da tecnologia SOI, foram desenvolvidas algumas topologias de fotodetectores também nesta tecnologia. Neste item serão apresentadas as vantagens e desvantagens destes fotodetectores, bem como suas principais características.

5.2.1 Tipos de dispositivos SOI fotodetectores

A maioria dos processos SOI utilizam camadas de silício mais finas que 100nm (AFZALIAN, 2006). Com esta dimensão, apenas dispositivos fotodetectores laterais, tais como os fotodiodos PIN (Figura 36), ou transistores bipolares podem ser considerados, já que se torna muito difícil a implementação de dispositivos verticais, que necessitariam de uma camada de silício mais espessa para ter uma eficiência quântica aceitável (COLINGE, 2008).

Estes fotodetectores são muito utilizados em aplicações que envolvem comprimentos de onda curtos, na ordem de 400nm, pois a profundidade de absorção é de apenas algumas dezenas de nanômetros (AFZALIAN, 2006).

Figura 36 – Fotodiodo lateral PIN SOI



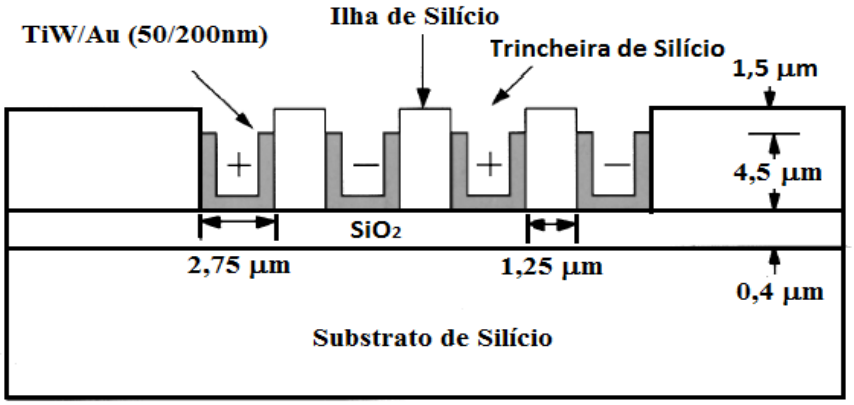
Fonte: Autor “adaptado de” (AFZALIAN, 2006)

Outra característica importante é que estes fotodetectores apresentam baixa corrente de escuro e excelente desempenho em termos de velocidade de resposta (AFZALIAN e FLANDRE, 2005). Estas vantagens são promovidas principalmente pela presença do óxido enterrado, que isola a região de depleção dos fotoportadores gerados no substrato e também diminui a área de junção. Por isso, são perfeitamente utilizados nas aplicações de DVD (AFZALIAN e FLANDRE, 2004), ou em aplicações na área da medicina e do meio ambiente, como na medição de concentração de DNA e proteínas, nas taxas de raios ultravioletas (UV), e ozônio (BULTEEL; FLANDRE., 2009), que fazem uso de radiação luminosa na faixa de 390nm.

Entretanto, o mercado de comunicações ópticas utiliza transmissores de luz na faixa de 850nm, sendo a primeira janela óptica, utilizada para curtas distâncias, pois os transmissores desta faixa de comprimento de onda são mais baratos (SADIKU, 2002). Como os fotodetectores fazem parte do circuito de recepção, eles teriam que ser capazes de fazer a conversão da radiação luminosa para corrente elétrica com alta responsividade e sensibilidade. Porém, como os fotoportadores são gerados no substrato para 850nm (abaixo do BOX), eles não conseguem contribuir para a fotocorrente, o que diminui muito a sua responsividade e sensibilidade (EMSLEY, DOSUNMU, *et al.*, 2003).

Este conflito entre responsividade e velocidade de resposta é inevitável nos dispositivos que utilizam o silício como semicondutor, devido ao seu baixo coeficiente de penetração. Como consequência, foram reportados na literatura, vários fotodetectores em SOI realizados com camadas de silício mais espessas, de aproximadamente 2μm. Em (GHIONI, 1996) e em (HO e WONG, 1996), por exemplo, fotodetectores do tipo trincheira (Figura 37) foram utilizados para aumentar o campo elétrico até a profundidade de 6μm, portanto, melhorando a velocidade de resposta e a responsividade, com largura de banda de alguns GHz. Entretanto, a camada de silício espessa faz com que estes dispositivos sofram com alta capacitância e alta corrente de escuro (HO e WONG, 1996).

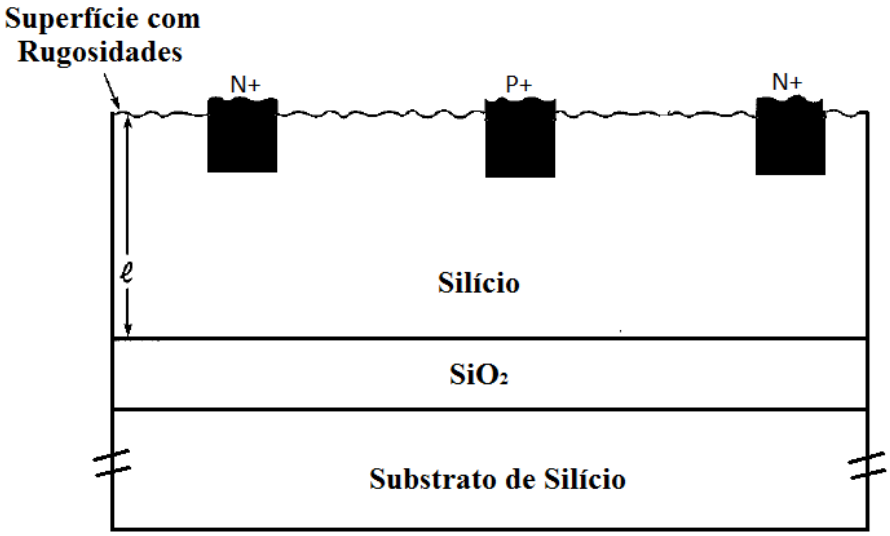
Figura 37 – Fotodetector SOI do tipo metal-semicondutor-metal (trincheira).



Fonte: Autor "adaptado de" (HO e WONG, 1996)

Outros exemplos de fotodetectores reportados na literatura com características de velocidade de resposta bastante desenvolvidas são: o dispositivo MSM (metal-semicondutor-metal) reportado em (HO e WONG, 1996) e (LIU, CHEN e CHOU, 1994), que chegou a atingir 140 GHz de largura de banda ou mesmo dispositivos com rugosidades reportados em (LEVINE, WYNN, *et al.*, 1995), que utilizam a rugosidade da superfície do silício de aproximadamente 0,1µm em uma camada espessa de 2µm para aumentar lateralmente a absorção da radiação luminosa chegando a uma velocidade de transmissão de 1Gb/s e responsividade de 0,19 A/W(conforme mostra a Figura 38) (LEVINE, WYNN, *et al.*, 1995).

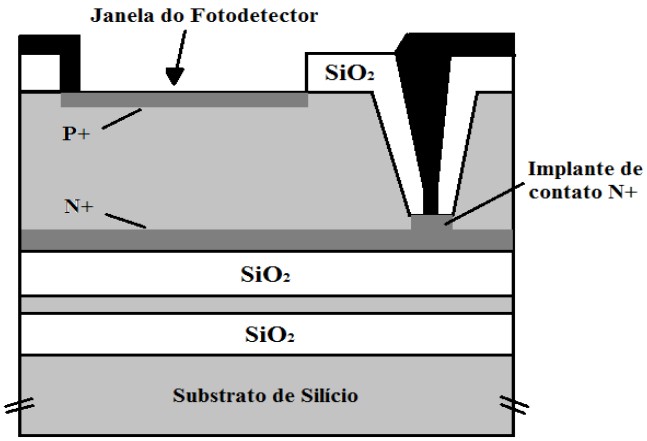
Figura 38 – Ilustração da rugosidade da camada de silício utilizado para aumentar a responsividade



Fonte: Autor "adaptado de" (LEVINE, WYNN, *et al.*, 1995)

Também foram desenvolvidos dispositivos fotodetectores que utilizam uma lâmina SOI dupla (EMSLEY, DOSUNMU, *et al.*, 2003), que é disponível comercialmente, conforme mostra a Figura 39. Estes dispositivos são chamados de DBR (distributed Bragg reflector), pois utilizam uma estrutura formada por várias camadas de diferentes materiais, nas quais, há várias reflexões que combinadas podem aumentar a eficiência quântica do dispositivo. Este fenômeno de várias reflexões também é conhecido como RCE (resonant cavity enhacement). O fotodetector resultante demonstrou uma eficiência quântica total de 40% para comprimento de onda de 860nm e um tempo de resposta de 29ps, que o torna adequado para aplicações de 10Gb/s (EMSLEY, DOSUNMU, *et al.*, 2003).

Figura 39 – Visão esquemática do fotodetector SOI RCE



Fonte: Autor "adaptado de" (EMSLEY, DOSUNMU, *et al.*, 2003)

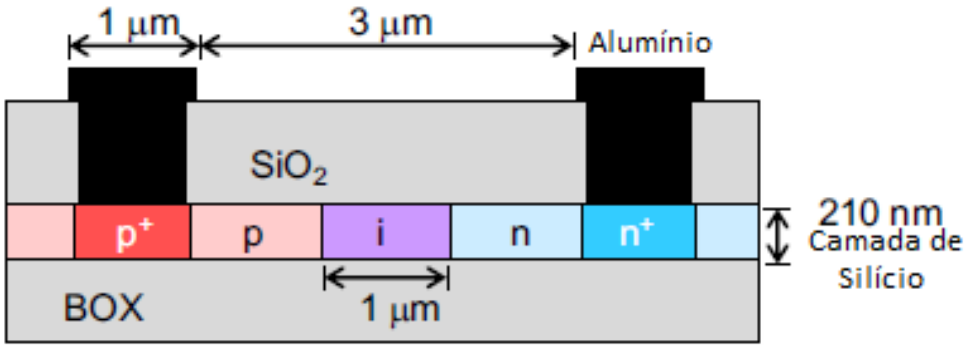
O fotodetector de avalanche foi reportado em (YOSHIDA, OHTOMO e SHIMAYA, 1998). Eles consistem em regiões P^+ e N^+, separadas entre si por portas de silício policristalino. Estas portas permitem depleção total das regiões N ($3x10^{17}cm^{-3}$) que ficam sob elas e separam as regiões N^+ da P^+. A responsividade de 0,4A/W foi reportada para comprimento de onda de 850nm. Se a concentração de dopantes da região N for aumentada, o fenômeno de avalanche (COLINGE, 2004) terá início com tensões de polarização mais baixas, entretanto, também reduzirá a região de depleção, fazendo com que apenas uma parte da região intrínseca (L_I) fique depletada, aumentando o tempo de transito dos portadores. Em (YANG, SCHAUB, *et al.*, 2003), um ganho de avalanche de quatro vezes foi atingido com tensão reversa de 9 Volts.

Dispositivos MOS fabricados em lâminas SOI também têm sido utilizados como fototransistores, explorando a sua operação no modo de transistor bipolar lateral com porta flutuante (ZHANG, CHAN e KO, 2000). Uma responsividade muito alta foi reportada, a qual

aumenta, ao diminuir o comprimento da porta. Entretanto, o desempenho em termos de velocidade de resposta é muito baixo, com tempo de subida e descida na ordem de dezenas ou centenas de microssegundos.

Recentemente, em 2014, Takeo Maruyama et. al publicaram em (MARUYAMA, MAEKITA e IIYAMA, 2014), um dispositivo SOI (Figura 40) fabricado em processos convencionais, o qual atingiu corrente de escuro extremamente baixa na faixa de 14pA e responsividade de 5mA/W para a faixa de infra-vermelho, entretanto a um custo de elevar a tensão de operação para -10V e iluminação lateral.

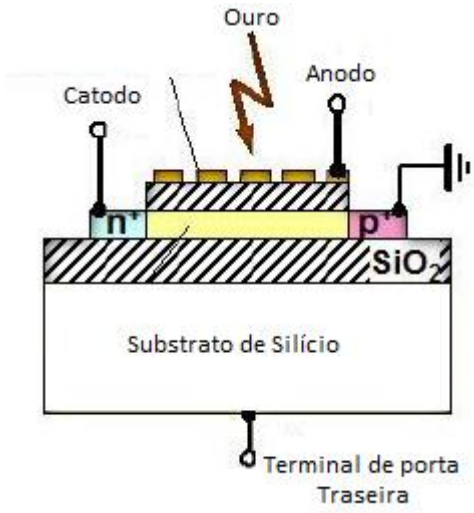
Figura 40 – Dispositivo PIN SOI lateral com iluminação lateral.



Fonte: Autor "adaptado de" (MARUYAMA, MAEKITA e IIYAMA, 2014)

O efeito da ressonância de plasma de superfície foi publicado por (INOKAWA, HIROAKI e ONO, 2013) ao ser utilizado em fotodetectores SOI, no qual a propagação da densidade de cargas na superfície do material de ouro é utilizada, já que ele é excitado pela radiação eletromagnética incidente. Logicamente que este processo (Figura 41) é mais custoso que o convencional, entretanto pode alcançar eficiência quântica de 37% na faixa de 550nm de comprimento de onda (INOKAWA, HIROAKI e ONO, 2013).

Figura 41 – Estrutura esquemática de um fotodiodo PN com ressonância de plasma.



Fonte: Autor "adaptado de" (INOKAWA, HIROAKI e ONO, 2013)

Fotodiodos PIN laterais, iguais aos estudados neste trabalho, foram reportados em (DEHLINGER, KOESTER, *et al.*, 2004), porém utilizando semicondutor germânio, em substituição ao silício. O germânio é um material compatível para integrar-se ao silício e já está presente nos dispositivos de silício a fim de aumentar a tensão mecânica da rede cristalina, aumentando a mobilidade dos portadores (DORIA, 2010).

A utilização de camadas ultrafinas de SOI como substrato para o crescimento da camada de germânio minimiza o problema da difusão de silício sobre o germânio durante etapas de recozimento. Além disso, a profundidade de absorção do germânio é de apenas algumas centenas de nanômetros para λ=850nm (como pode ser visto na Figura 14), por isso, é necessária uma camada de apenas 400nm de germânio para absorver radiação luminosa na faixa de 800 a 900nm. Um fotodiodo PIN lateral de 10x10µm, com 29GHz de largura de banda, com tensão de polarização de -1V e eficiência quântica de 32% foi reportado em (DEHLINGER, KOESTER, *et al.*, 2004). Entretanto, a corrente de escuro era muito alta, na ordem de 0,02µA, o que reduziu drasticamente e sensibilidade do fotodetector (DEHLINGER, KOESTER, *et al.*, 2004).

Os dispositivos mencionados acima têm vantagens apreciáveis sobre os dispositivos convencionais, entretanto, a sua construção requer várias etapas de processo diferentes, o que os encarece substancialmente (DEHLINGER, KOESTER, *et al.*, 2004).

A realização de um fotodetector em SOI que permita uma taxa de transmissão de dados maior que 10Gb/s, com alta sensibilidade, baixa complexidade e baixo custo para aplicações de receptores ópticos de baixa distancia, que utilizam 850nm de comprimento de

onda é realmente um desafio, já que a espessura de silício utilizada para prover alta velocidade de resposta é baixa, o que faz com que a responsividade seja baixa também (BIGAS, CABRUJA, *et al.*, 2006).

Uma opção para superar esta dificuldade seria não utilizar o comprimento de onda de 850nm para o mercado de comunicações ópticas de curta distância. Porém, os transmissores de ondas mais curtas são mais caros e têm potência de transmissão mais baixas, o que traria novos problemas.

5.2.2 Dispositivos no substrato

Com a simples adição de uma máscara litográfica extra no processo de fabricação de dispositivos em lâminas SOI a fim de corroer localmente a camada fina de silício e a camada do BOX, é possível integrar estes fotodetectores ao substrato. Desta forma, pode-se produzir um fotodiodo PIN lateral ou vertical no substrato de uma lâmina SOI convencional, que geralmente possui uma espessura de 500µm e concentração de dopantes na ordem de $10^{15}cm^{-3}$ (AFZALIAN, 2006), os quais proporcionam uma camada de depleção de profundidade de aproximadamente 2µm sob baixa tensão de operação e um comprimento de difusão na ordem de 20 µm. Estas características permitem um grande aumento da eficiência quântica principalmente na faixa de comprimento de onda do vermelho ou infravermelho (700-850nm), o que torna este tipo de fotodetector muito apropriado para sistemas de imagem (ZHENG e WRIGLEY, 2000), combinando as vantagens da tecnologia SOI para os circuitos de imagem (MADEIRA, 2012) (AFZALIAN; FLANDRE, 2003). Entretanto, as vantagens da baixa corrente de escuro e alta velocidade de resposta são perdidas. Na verdade, estes fotodetectores são muito parecidos com os detectores CMOS convencionais, mas têm a vantagem que o substrato não precisa ser otimizado para melhorar o desempenho dos transistores. Na tecnologia CMOS convencional (BULK), o escalamento dos transistores faz com que seja necessária uma maior concentração de dopantes no substrato o que gera uma região de depleção mais fina e menores comprimentos de difusão, resultando em fotodetectores menos eficientes (WONG, 1996).

5.2.3 Dispositivos verticalmente integrados

Outra forma de integrar os fotodetectores seria fabricá-los por cima dos circuitos por um pós-processo chamado *thin-film-on-ASIC* (TFA), onde ASIC significa *Application*

Specific Integrated Circuit. O fotodetector TFA é feito através da deposição de camadas de silício amorfo sobre o circuito e foram desenvolvidos para melhorar a responsividade. Pelo fato de estarem localizados separadamente dos transistores, os detectores podem ser otimizados também separadamente e todo o chip pode ser considerado fotoativo (LULE, 2000). O silício amorfo tem características de absorção da radiação luminosa melhores que o silício cristalino, já que a sua profundidade de penetração é 20 vezes menor (LULE, 2000).

Entretanto, a velocidade de operação destes dispositivos é mais baixa, quando comparada aos dispositivos que utilizam silício policristalino, devido à sua menor mobilidade. A corrente de escuro também é mais alta (ESTRADA, AFZALIAN, *et al.*, 2003).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a ferramenta de simulação bidimensional utilizada neste trabalho, além de descrever os principais modelos utilizados na realização deste estudo. Também será abordada a questão prática em relação ao aparato utilizado para obtenção das medidas experimentais.

6.1 O SIMULADOR ATLAS

As simulações realizadas para este trabalho foram feitas utilizando o simulador de dispositivos Atlas (Silvaco, 2010).

O simulador Atlas é baseado em um conjunto de equações físicas que permitem obter características elétricas associadas às estruturas descritas e às condições de polarização. O dispositivo a ser simulado é descrito através de uma grade de pontos (*grid*) bi ou tridimensional. Para cada cruzamento das linhas de grade, chamado de nó (*node*), o simulador resolve numericamente um conjunto de equações (Silvaco, 2010).

Com o Atlas é possível obter, além de curvas das características elétricas dos dispositivos simulados, variáveis internas da estrutura como potencial elétrico, densidade de corrente, campo elétrico, entre outros (Silvaco, 2010).

Para criar o arquivo de simulação, primeiro deve ser descrita uma grade de pontos compatível com a estrutura a ser simulada. Para isso, devem-se concentrar mais pontos de grade nas regiões onde há mudança de materiais ou de concentração de dopantes. Depois, devem ser definidas as regiões e os eletrodos do dispositivo (Silvaco, 2010).

Em seguida, é necessário definir os modelos físicos que melhor se aplicam ao que será estudado no dispositivo, polarizá-lo e solicitar que sejam salvas as curvas e estruturas desejadas para visualização dos resultados (Silvaco, 2010).

6.2 MODELOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

Os modelos utilizados no Atlas a fim de reproduzir os fenômenos físicos existentes são (Silvaco, 2010):

a) FERMI: modelo que utiliza a estatística de portadores de Fermi-Dirac para solução das equações;

b) *Band Gap Narrowing* (BGN): considera o estreitamento da largura da faixa proibida, sendo importante em regiões com altas concentrações de dopantes;
c) KLAASSEN: modelo de mobilidade inicial que considera temperatura, concentração de dopantes e interações entre os portadores;
d) *Paralel Electric Field Dependence* (FLDMOB): modelo de degradação da mobilidade que considera o efeito do campo elétrico lateral;
e) KLASRH: modelo de geração e recombinação que contabiliza o tempo de vida dos portadores dependente da concentração de dopantes e da temperatura;
f) OPTR: modelo para simulação de dispositivos ópticos, que considera a densidade de estados permitidos para múltiplas transições ópticas;
g) *Klaassen's concentration dependent Auger recombination model* (KLAAUG): modelo de recombinação que considera a transição direta dos portadores;
h) INCOMPLETE: considera a ionização incompleta das impurezas com a redução da temperatura;
i) IONIZ: usado como complemento do modelo INCOMPLETE, considerando ionização completa em silício com alta concentração de dopantes;
j) *Shirahata* (SHI): modelo de degradação da mobilidade pelo campo elétrico transversal e concentração de portadores.

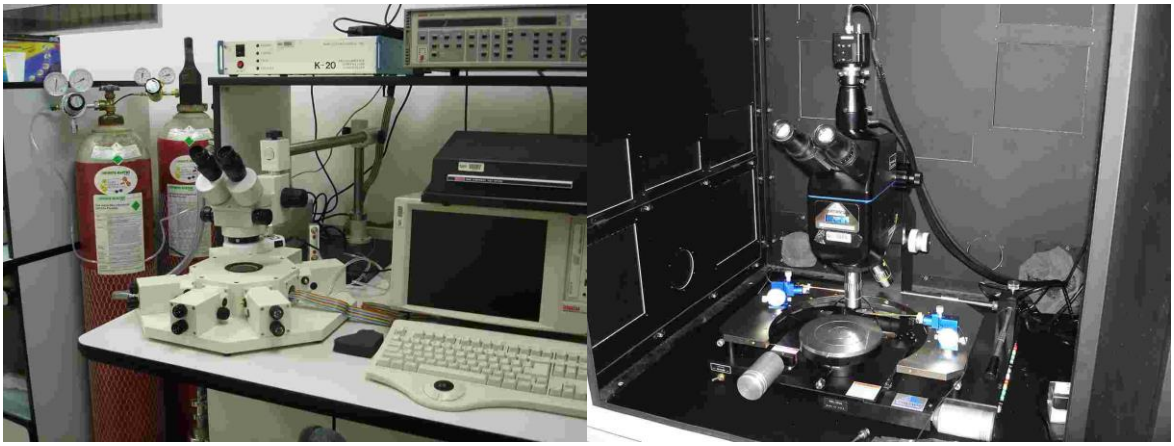
O módulo chamado Luminous do Simulador Atlas, o qual é o simulador optoeletrônico, foi utilizado a fim de calcular o perfil de intensidade óptica absorvida pelos dispositivos e convertê-lo em taxas de fotogeração. Através da determinação de vários raios com intensidade luminosa pré-determinados, foi possível a discriminação dos comprimentos de onda incidentes variando desde 350 a 1000nm.

No apêndice A e no apêndice B pode-se verificar um exemplo de arquivo de simulação utilizando o módulo Luminous.

6.3 APARATO EXPERIMENTAL

Os resultados experimentais foram obtidos a partir da utilização do Analisador de Parâmetros Agilent 4156C e a temperatura foi controlada através do Sistema de Variação de Temperatura da MMR Tecnologia (SOUZA, BULTEEL, *et al.*, 2010). A Figura 42 mostra uma fotografia dos equipamentos utilizados para obtenção das curvas experimentais.

Figura 42 – Fotos de equipamentos utilizados para obtenção das curvas experimentais: (A) Analisador de parâmetros Keithley 4200 SCS e micro-refrigerador modelo K20 da MMR Technologies e (B) microprovador Cascade Microtech REL 3600.

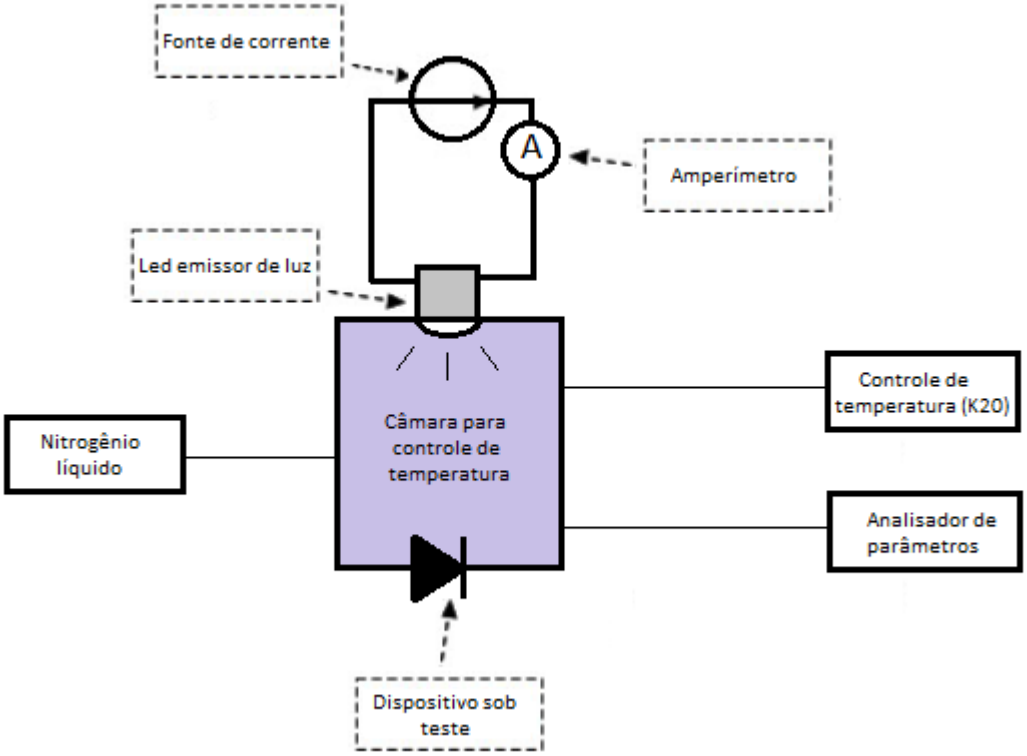


(A) (B)

Fonte: Autor

Em relação à fonte de luz, foram utilizados diodos emissores de luz (*LEDs*) na faixa de 380 a 770 nm de comprimento de onda cujo fabricante é a empresa *SUNLED USA*. Os fotodetectores foram posicionados de forma a receberem iluminação integral e transversal dos LEDs conforme mostra a Figura 43. Os LEDs foram ligados a uma fonte de corrente, controlada por um amperímetro. A intensidade da potência óptica utilizada foi controlada a partir da corrente que atravessava cada LED. O dispositivo testado (PIN) foi mantido dentro da câmara escura para controle de temperatura, efetuado através do sistema de alimentação de nitrogênio líquido e do controlador K20.

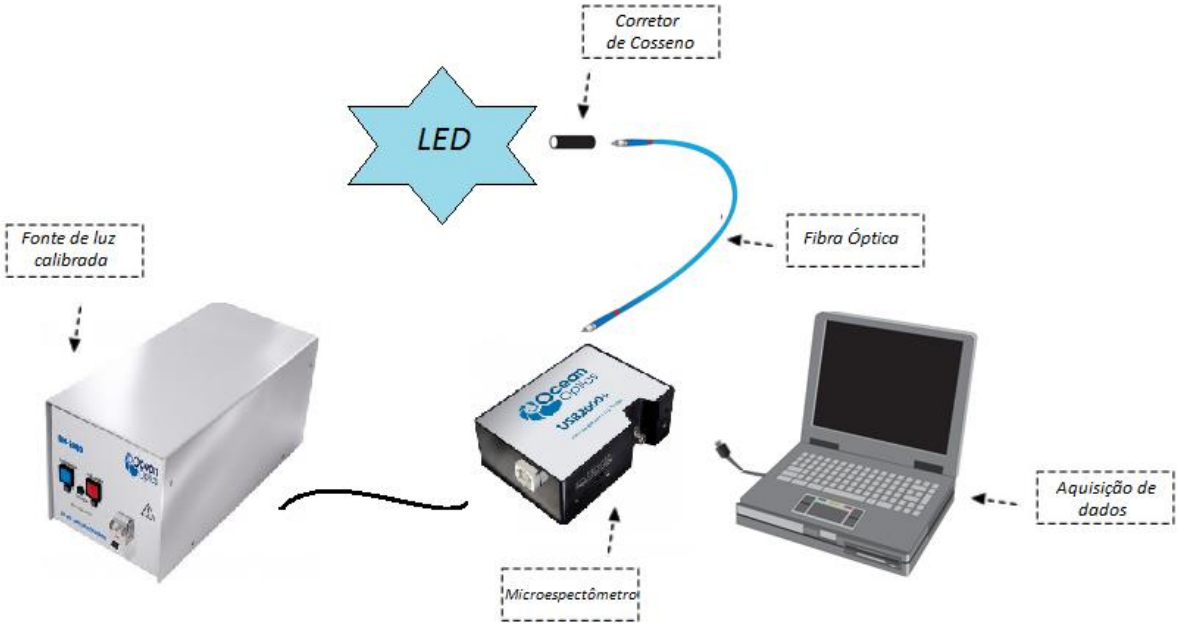
Figura 43 - Esquema de aquisição de dados dos diodos PIN com iluminação e controle de temperatura.



Fonte: Autor

A caracterização dos LEDs se deu através de um microespectômetro que opera na faixa de 350 a 800nm da empresa *OCEAN OPTICS*, uma fibra óptica e uma fonte de luz de halogênio previamente calibrada do mesmo fabricante, conforme mostra a Figura 44. Além disso, também foi necessária a utilização de um dispositivo chamado *cosine corrector* (corretor de cosseno), que é um difusor óptico o qual acopla a fibra óptica e o espectômetro, a fim de recolher um sinal com 180 graus de campo de visão. Esta caracterização foi necessária para verificar o espectro de emissão e a potência óptica incidente nos fotodiodos iluminados pelos LEDs (OCEAN, 2005).

Figura 44 – Esquema de montagem para medição e análise da potência óptica incidente.

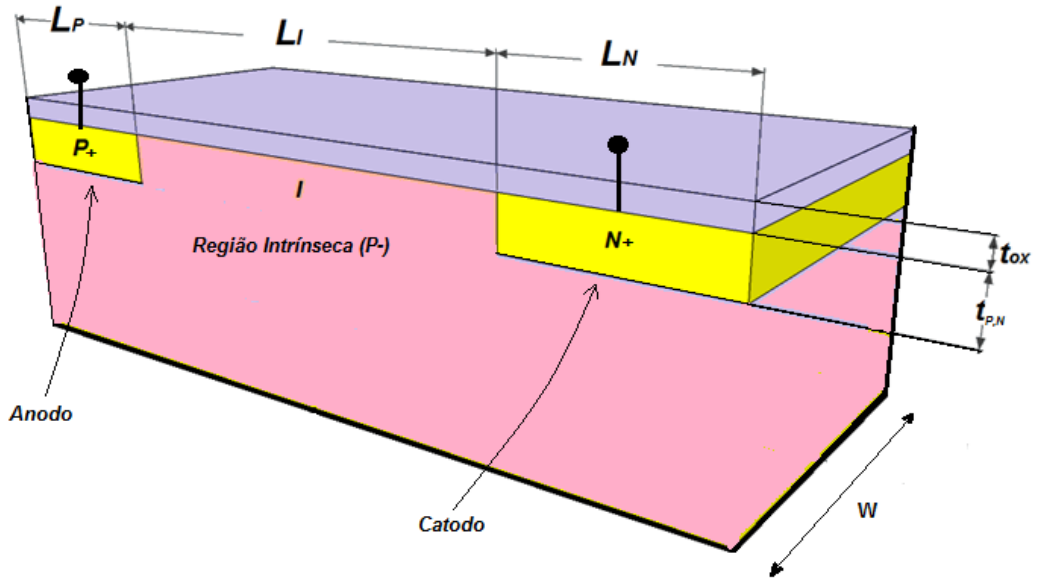


Fonte: Autor

7 RESULTADOS PARA SENSORES DE IMAGEM

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos pelos dispositivos em tecnologia CMOS para aplicação em sensores de imagem, sendo necessária sensibilidade em toda a faixa do espectro visível. Os fotodiodos apresentados neste item foram desenvolvidos integralmente para este trabalho, através da elaboração do leiaute e a fabricação na empresa *ON Semiconductor* em tecnologia AMI 0,35µm da através do *MOSIS Educational Program* (Mosis., 2015). Os fotodiodos apresentam um perfil de dopagem de P+ P- N+, sendo em constituídos de vários dedos (*multifinger*), sendo que cada *finger* será chamado de "m". Os principais parâmetros (concentrações de dopantes e dimensões importantes) podem ser vistos na Tabela 2. Um corte transversal de um dedo dos dispositivos pode ser visto na Figura 45.

Figura 45 – Corte transversal de um fotodiodo PIN em tecnologia CMOS



Fonte: Autor

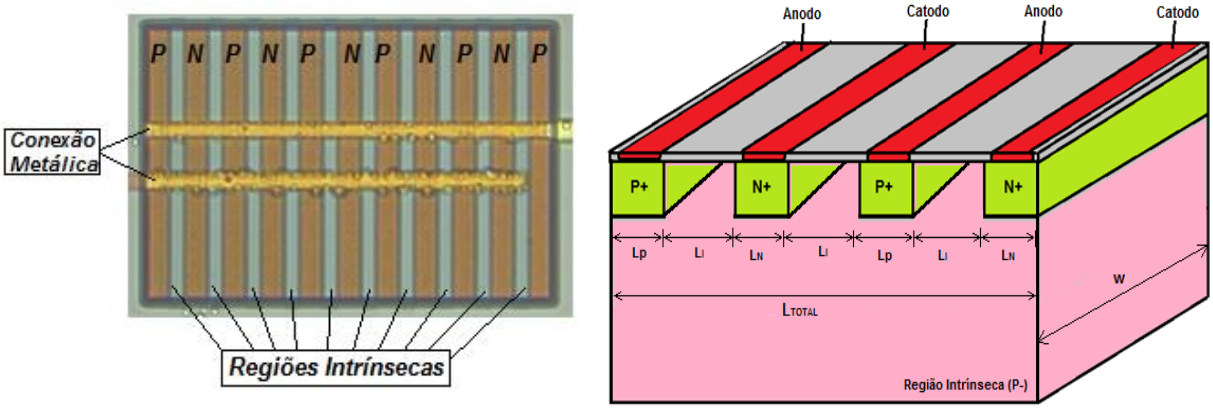
Tabela 2 – Principais dimensões e parâmetros dos dispositivos em tecnologia AMI 0,35µm.

Parâmetro	
Espessura do Óxido de Passivação, t_{ox}	13,8 nm
Concentração Intrínseca de Portadores, N_I	$6x10^{16}$ cm^{-3}
Concentração de Portadores da Região P+, N_A	$1x10^{19}$ cm^{-3}
Concentração de Portadores da Região N+, N_D	$1x10^{20}$ cm^{-3}
Largura do dispositivo, W	97,5 µm
Profundidade da região difundida, $t_{P,N}$	150 nm

Fonte: Autor

Os dispositivos em questão foram desenvolvidos em configuração *multifinger* ou multi-dedos, a fim de diminuir efeitos parasitários e aumentar sua eficiência, desta forma, foram fabricados cinco dispositivos com características diferentes, que são apresentados na Tabela 3 e uma foto real está apresentada na Figura 46-A, na qual é apresentado um dispositivo com dez dedos.

Figura 46 – Diodo PIN lateral A) Foto do dispositivo com 10 dedos B) Esquema do dispositivo multifinger.



A B

Fonte: Autor

A fim de esclarecer a configuração *multifinger*, a Figura 46-B contém um exemplo deste fotodiodo, o qual é composto por duas regiões de material P+ e duas de material N+ intercalados entre si. Os níveis de metais se encarregam de fazer a ligação entre estas regiões, sendo que há formação de três dedos, ou seja, m=3, o que equivale a dizer que há três regiões com comprimento "L_I" neste dispositivo.

Como pode ser observado através da Tabela 3, o comprimento total dos dispositivos (L_{TOTAL}) foi mantido constante, por isso, ao aumentar o comprimento da região intrínseca (L_I), a quantidade de dedos (m) diminui, mas a área total (A_T) é mantida constante.

Tabela 3 –Dispositivos multi-dedos em tecnologia AMI 0,35µm.

L_I (µm)	$L_{P,N}$ (µm)	L_{TOTAL} (µm)	m	Área Total A_T(µm^2)
5,75	6,5	129	10	14 x10^3
8,90	6,5	129	8	14 x10^3
11,00	6,5	129	7	14x10^3
14	6,5	129	6	14 x10^3
24,12	6,5	129	4	14x10^3

Fonte: Autor

O comprimento da região intrínseca (L_I) é um parâmetro chave no projeto de um diodo PIN (NOVO, GIACOMINI, *et al.*, 2013). Enquanto uma pequena região intrínseca pode ser desejada, com o objetivo de aumentar o aproveitamento de pares de elétrons-lacuna, reduzindo a sua recombinação, por outro lado, também aumentaria a corrente de escuro, devido ao aumento do número de dedos para uma determinada área fixa. Desta forma, o estudo da alteração deste parâmetro tão importante, se faz necessário para determinar o melhor leiaute a fim de atingir a máxima eficiência quântica.

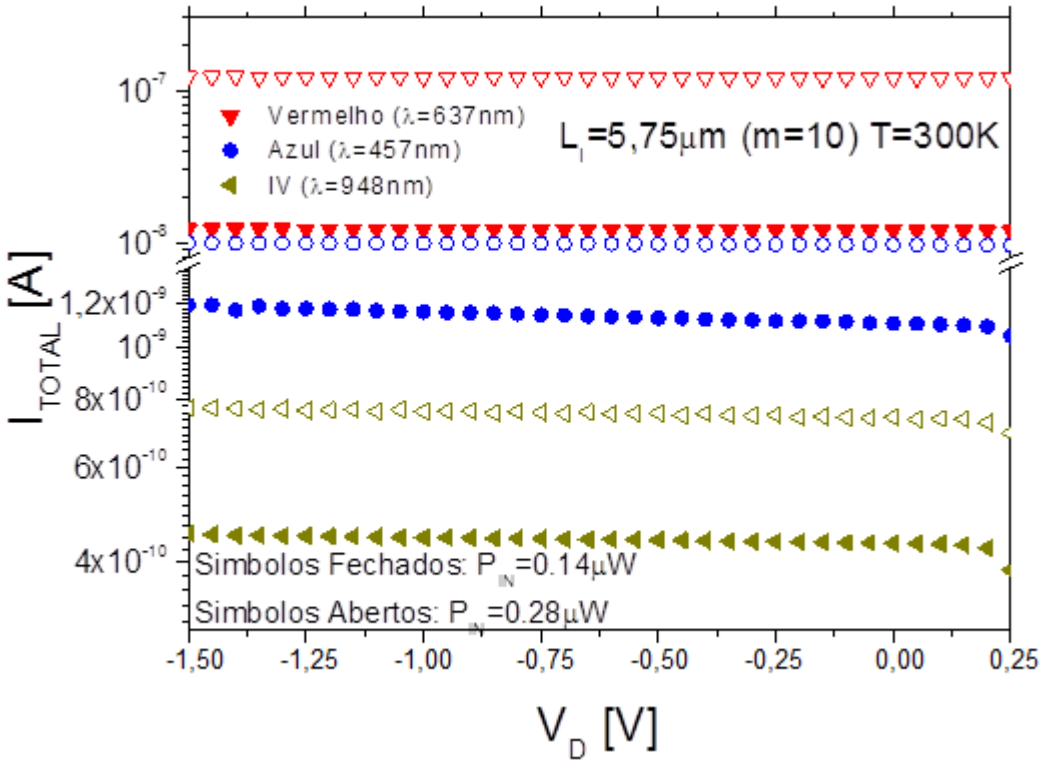
7.1 INFLUÊNCIA DA POTÊNCIA ÓPTICA INCIDENTE E DO COMPRIMENTO DE ONDA

A Figura 47 mostra a corrente total do diodo (I_{TOTAL}) em função da tensão aplicada ao anodo (V_D) sob a incidência de três comprimentos de onda diferentes, com duas intensidades de energia ópticas incidentes (P_{IN}) para o dispositivo com L_I = 5,75µm a T = 300 K. Os LEDs utilizados para a iluminação azul, vermelha e infravermelha (IV) tem um pico de intensidade respectivamente em 457nm, 637nm e 948nm de comprimento de onda e pode-se verificar que, com o aumento da potência da luz incidente, a corrente através do dispositivo aumenta diferentemente para cada comprimento de onda. Este aumento é mais pronunciado para a luz vermelha já que sensores de luz à base de silício apresentam maiores profundidades de penetração para altos comprimentos de onda. No entanto, a diferença, embora perceptível, não é muito pronunciada.

Sabe-se que quanto maior o comprimento de onda, mais baixa é a corrente total devido à menor energia do fóton (SZE, 1981), desta forma, era esperado que o nível de corrente produzido pelo azul fosse o maior de todos (AFZALIAN, 2006), mas não foi o que se verificou, já que a radiação é absorvida na superfície do material, fazendo com que haja alta influência da recombinação de superfície, que é a região onde a periodicidade das ligações é interrompida, e onde o contato com outros materiais é feito. Portanto, somente os fotoportadores que foram gerados a no máximo um comprimento de difusão (L_{dif}) de distância da RDD podem contribuir para a corrente fotogerada antes de se recombinar (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002). Já no caso do IV, quase toda a radiação eletromagnética é transmitida através do substrato devido à longa profundidade de penetração de silício para um comprimento de onda longo, o que resulta em um nível de corrente reduzido. Estes dispositivos operam com tensão de polarização de forma que a junção esteja reversamente polarizada, a fim de aumentar a região de depleção (RDD). Isso significa que

quanto mais negativa for a tensão V_D, maior será a região de depleção e maior será a corrente fotogerada. O tamanho da região de depleção é um parâmetro muito importante em aplicações ópticas, já que ela apresenta uma baixa taxa de recombinação de portadores, por isso, os fotoportadores gerados fora da região de depleção, onde o campo elétrico é baixo, sofrem com a alta taxa de recombinação e, portanto, não podem contribuir adequadamente com a corrente fotogerada.

Figura 47 – Corrente total entre anodo e catodo em função da tensão de anodo para diferentes potências ópticas incidentes com m=10, iluminado com luz vermelha, azul e infra-vermelho (IV) (experimental).



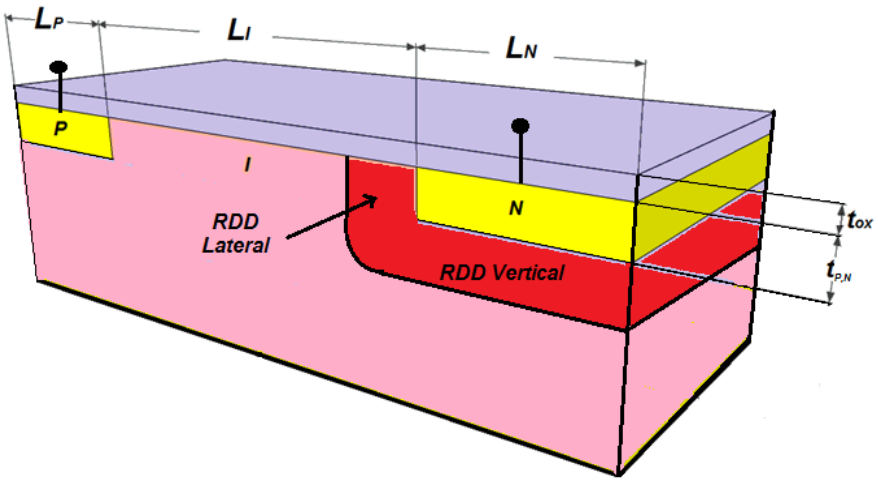
Fonte: Autor

Além do fato da variação da profundidade de penetração, outra característica dos fotodiodos PIN é importante na comparação de correntes produzidas por diferentes comprimentos de onda, que é a localização da região de depleção, a qual pode ser observada na Figura 48.

Nestes dispositivos, a região de depleção pode ser dividida em duas regiões: a região de depleção lateral (formada dentro da região intrínseca) e a região de depleção vertical (formada abaixo da junção). Como os baixos comprimentos de onda são absorvidas muito próximos à superfície, eles atingem apenas a RDD lateral e, por isso, o nível de corrente do

azul ficou abaixo do vermelho, que, por sua vez, sofre menor recombinação por atingir a RDD vertical, que é mais extensa.

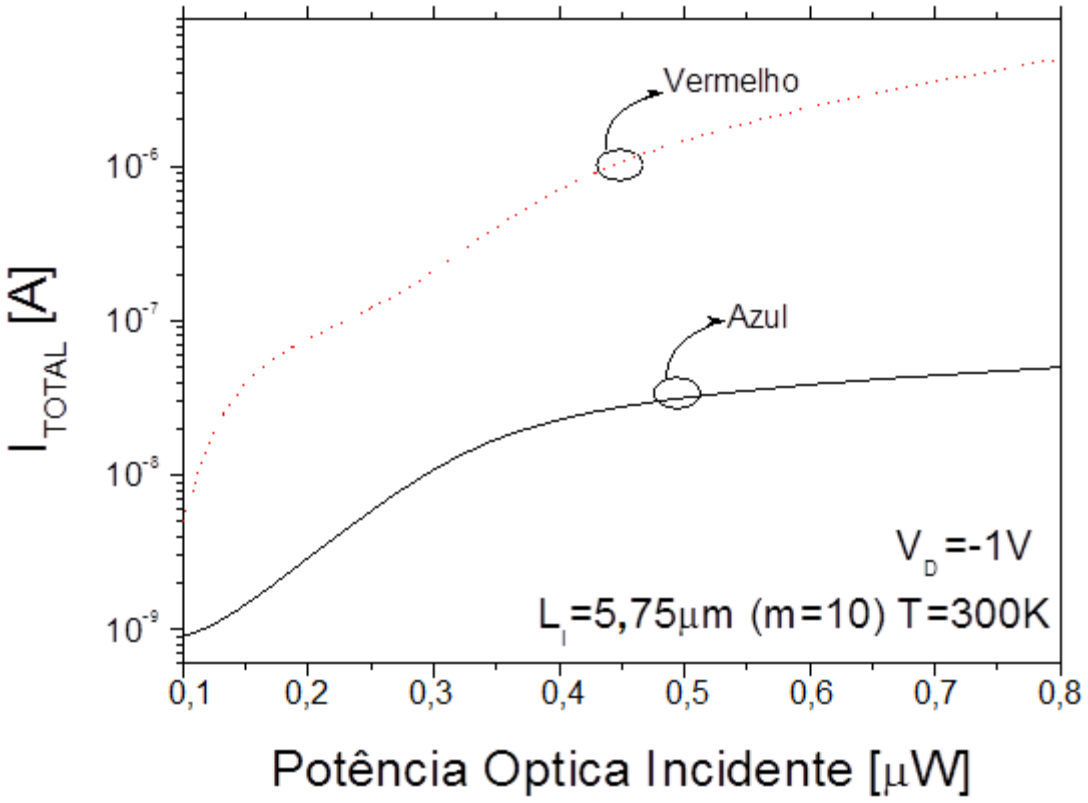
Figura 48 – A região de depleção em fotodiodos PIN CMOS



Fonte: Autor

À medida que o comportamento desses dispositivos pode ser controlado através da iluminação incidente, é interessante estudar a sua interdependência. Para este fim, a Figura 49 mostra como a corrente total varia em função da potência óptica incidente (para luz vermelha e luz azul). Aqui, a maior variação de I_{TOTAL} em relação à potência óptica foi apresentada pela luz vermelha, já que um aumento de P_{IN} de 0,1μW para 0,8μW produz um aumento na corrente de 1000 vezes, enquanto que, para o azul, este aumento é de apenas 55 vezes. Mais uma vez este efeito é dado pela presença da RDD vertical, o que torna o dispositivo mais sensível à variação da potência óptica incidente para a radiação eletromagnética de comprimento de onda mais longo (vermelho).

Figura 49 – Corrente total em função da potência óptica incidente com m=10, iluminado com luz azul e vermelha (experimental).

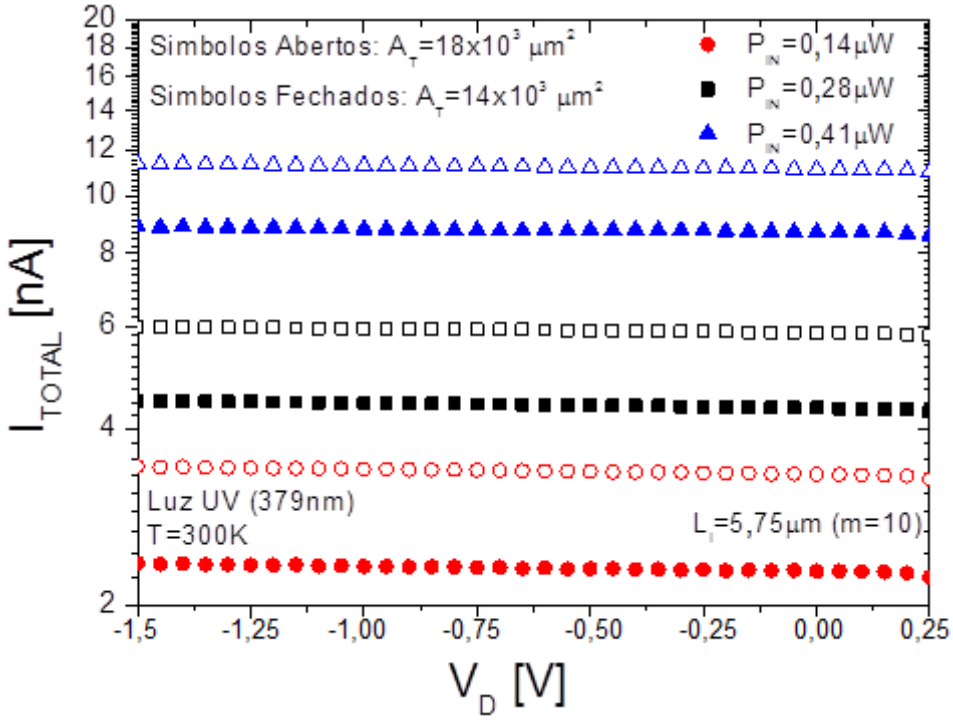


Fonte: Autor

Uma vez que a profundidade de penetração no silício é extremamente pequena, para a faixa de UV (SHI, NITHIANOV, *et al.*, 2012), é importante que a região de depleção do fotodiodo comece tão perto da superfície quanto possível (CANDA, NIHTIANOV, *et al.*, 2009), por isso os dispositivos com configuração laterais são preferenciais ao se comparar com dispositivos convencionais, como o diodo vertical. Deste modo, a Figura 50 mostra a corrente total do dispositivo multifinger PIN com 10 dedos em função de V_D para λ =379nm e três potências ópticas incidentes diferentes. Nesta figura também é possível verificar a curva de corrente para dois dispositivos distintos em termos de área total (A_T), mas com o mesmo número de dedos, ou seja, estes fotodiodos foram construídos com o mesmo comprimento da região intrínseca, e portanto o mesmo número de dedos, mas com diferentes comprimentos das regiões altamente dopadas ($L_{P,N}$). Um dos diodos tem área total igual a 18000 μm^2 com $L_{P,N}$= 10 μm e o outro 14000 μm^2 com $L_{P,N}$= 6,5 μm. O diodo com área maior produziu um nível de corrente mais elevado devido ao aumento da área fotossensível para as três intensidades ópticas. Outro parâmetro importante que deve ser levado em conta no projeto de dispositivos ópticos é o seu fator de forma (FF), que representa o percentual da área

ópticamente ativa em relação à área total do dispositivo. Apesar de ter maior área, o diodo com a A_T = 18000 μm^2 tem menor fator de forma (FF) (cerca de 35%), uma vez que apresenta maior $L_{P,N}$, (que são regiões cobertas por metal e, portanto, inativas ópticamente), enquanto o diodo com A_T de 14000 μm^2 tem fator de forma (cerca de 45%). Entretanto, a maior corrente foi apresentada pelo dispositivo com maior área, resultado da maior taxa de geração de portadores.

Figura 50 – Corrente total em função da tensão de anodo para diferentes potências ópticas incidentes com m=10, iluminado com luz UV para dispositivos com áreas diferentes (experimental).



Fonte: Autor

7.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA QUÂNTICA TOTAL

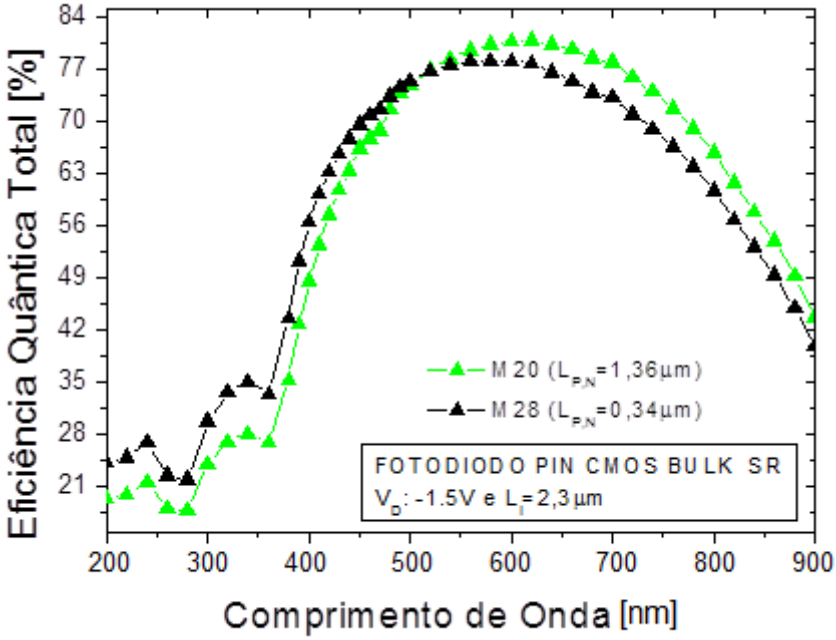
A fim de verificar a influência das regiões altamente dopadas P+ e N+ com mais profundidade do que nos permitiria os dispositivos fabricados, foram feitas simulações no *software* Atlas de fotodiodos CMOS com as mesmas características tecnológicas dos diodos reais e com o comprimento da região intrínseca de 2,3μm [conforme se utiliza comercialmente (AFZALIAN, 2006)] porém alterando o comprimento das regiões altamente dopadas de $L_{P,N}$=1,36μm para 0,34μm. A fim de fazer uma comparação mais fiel, a área total

foi mantida constante, e, portanto, o número de dedos passou de 20 para 28. Esta comparação pode ser visualizada através da Figura 51, a qual mostra a eficiência quântica total para os dois fotodiodos CMOS em função do comprimento de onda da radiação incidente. É importante salientar que não é necessária a normalização por número de dedos, já que os dispositivos apresentam a mesma área fotossensível (AFZALIAN, 2006).

Conforme já foi comentado, a eficiência quântica total (EQ_T) é definida como sendo a razão entre a corrente de anodo realmente fotogerada (I_{FG}) e a máxima corrente que poderia ter sido gerada se todos os fótons tivessem sido convertidos em fotoportadores (SZE, 1981). Por isso, quanto maior a corrente fotogerada, maior será a eficiência quântica total. No simulador *Atlas*, a eficiência quântica é calculada através de uma função do módulo *Luminous*. Pode-se observar que o comportamento dos dispositivos é alterado para comprimentos de onda maiores que 470nm, ou seja, até este valor de λ, o dispositivo com maior número de dedos (m28) apresentou a maior eficiência, já para λ maiores que 470nm, o dispositivo com 20 dedos superou a eficiência do anterior. Este efeito pode ser explicado como se segue: a radiação luminosa com comprimento de onda abaixo de 470nm não consegue atingir a região de depleção vertical, pois é absorvida antes de atingir esta profundidade do silício, por isso, somente a RDD lateral contribui para a separação dos fótons. Como pode ser percebido através da Figura 52-A, o dispositivo com menor comprimento $L_{P,N}$ possui mais dedos (m=28), sendo que cada dedo possui uma região de depleção lateral (dx) de 234nm (Equações 34 e 35 para V_D=-1,5V), por isso, este dispositivo apresentará o valor de região de depleção lateral igual a 28 vezes dx (ou seja, 28 x 234nm=6,55µm). Já o dispositivo com menor comprimento $L_{P,N}$ (Figura 52-B) possui menor quantidade de dedos (m=20), e, por isso, apresentará menor região de depleção lateral, ou seja, apresentará 20 vezes dx (20 x 234nm= 4,68 µm). Então pode-se concluir que até 470nm de comprimento de onda, a eficiência é diretamente proporcional ao tamanho da região de depleção lateral dos dispositivos, a qual, por sua vez, é proporcional à quantidade de dedos.

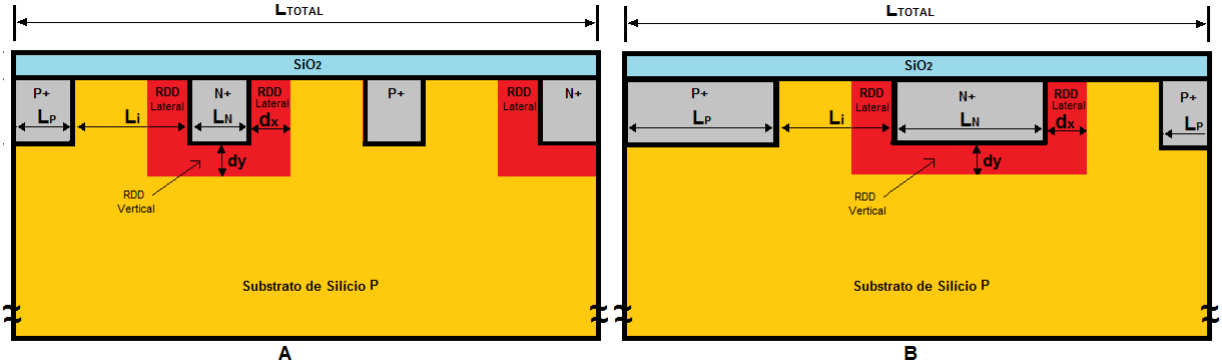
Em contrapartida, este comportamento se inverte para lambda maior que 470nm, pois a radiação eletromagnética já consegue atingir a RDD vertical (dy), que é maior para dispositivos com maior comprimento $L_{P,N}$, já que a RDD vertical é formada abaixo da região altamente dopada do tipo N.

Figura 51 – EQ_T em função de λ para o fotodiodo PIN CMOS BULK com diferentes $L_{P,N}$ (simulado)



Fonte: Autor

Figura 52 – Corte transversal esquemático de um diodo PIN CMOS a) Com $L_{P,N}$=0,34µm (m=28); B) Com $L_{P,N}$=1,36µm (m=20).

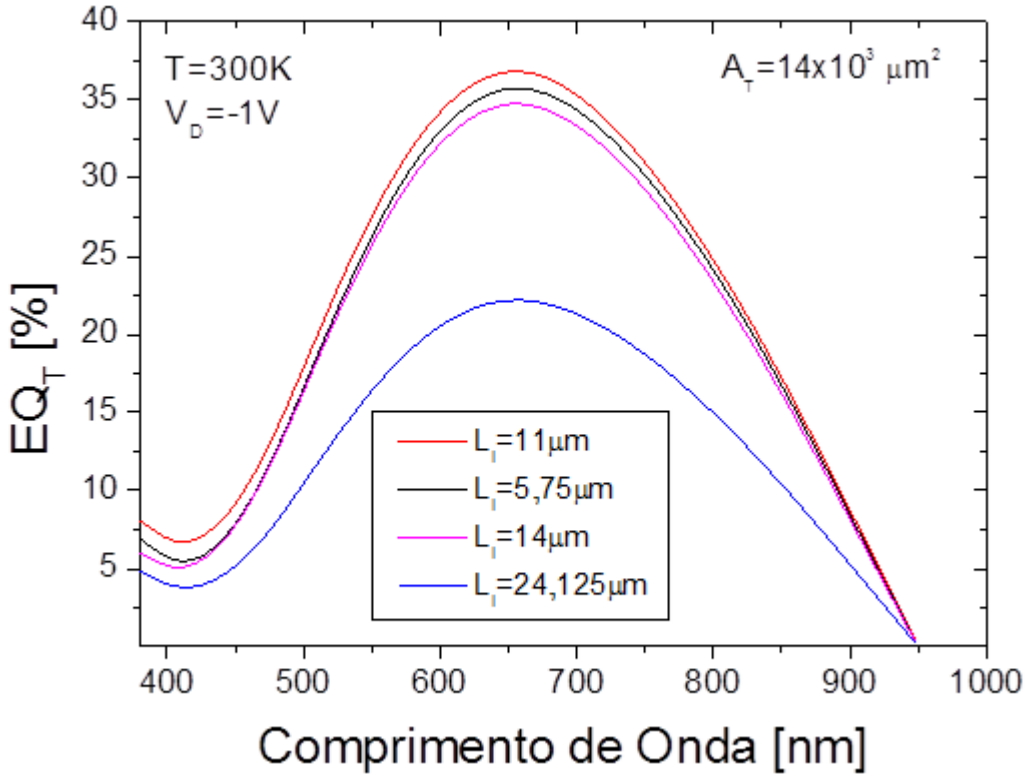


Fonte: Autor

A Figura 53 mostra a EQ_T para quatro dispositivos com diferentes valores de L_I em função do comprimento de onda da radiação incidente, sendo que a maior EQ_T de 37% foi atingida pela radiação eletromagnética de comprimento de onda de 650 nm com L_I = 11µm. Isto é devido ao efeito de profundidade de penetração e a ação de ambas as regiões de depleção laterais e verticais. Para comprimentos de onda mais elevados do que 950nm, a eficiência quântica é muito baixa, porque o silício torna-se transparente aos comprimentos de

onda mais elevados, devido à energia de fótons ser menor do que a energia da banda proibida de silício, o que significa que a radiação é transmitida quase que inteiramente e não absorvida. Para luz com λ menor do que 400 nm, pode ser observado um aumento na EQ_T, provavelmente por causa do índice de refração de SiO_2 que poderá refletir uma pequena porcentagem da potência óptica incidente. Ainda observando a Figura 53, pode-se notar que o dispositivo com maior comprimento intrínseco apresentou a menor eficiência quântica de 22,3% para λ= 650nm. Isso se deve ao fato do fenômeno da recombinação de portadores ser elevada, já que o portador gerado terá que percorrer um longo caminho através da região intrínseca para alcançar os eletrodos e então contribuir com a fotocorrente.

Figura 53 – Eficiência quântica total em função do comprimento de onda para quatro dispositivos com mesma área total em T=300K (experimental).



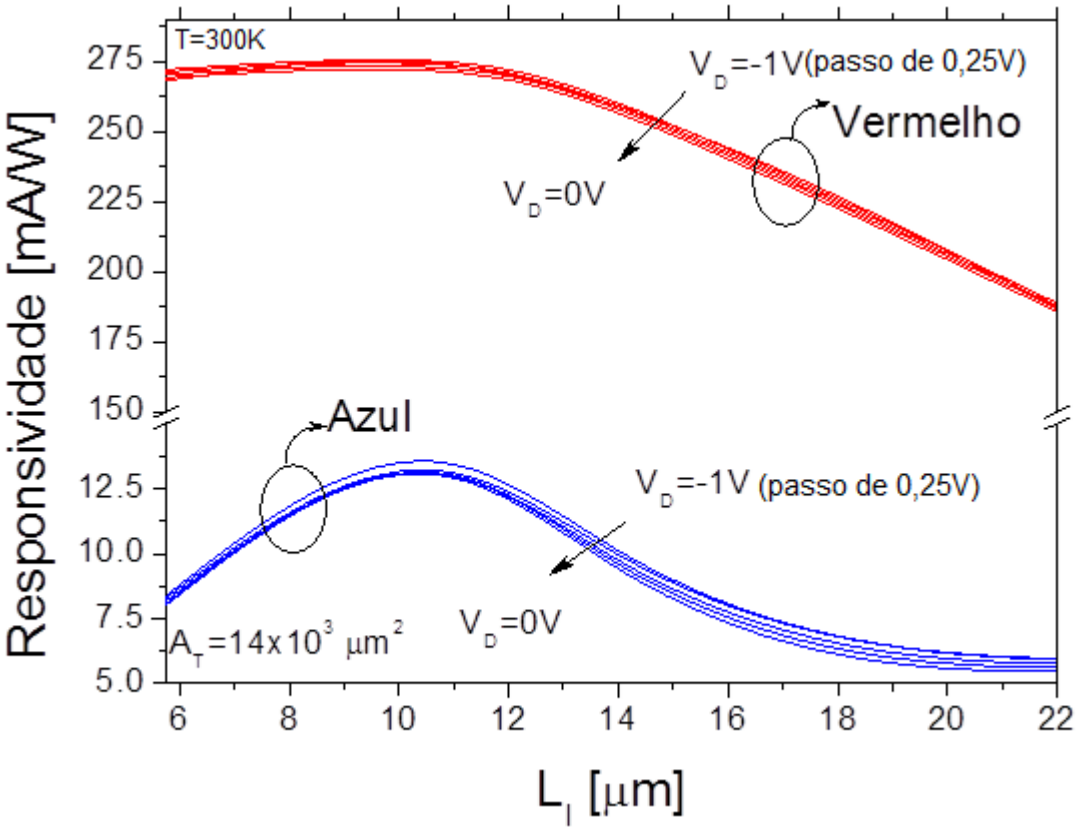
Fonte: Autor

7.3 ANÁLISE DA RESPONSIVIDADE

A responsividade de um fotodetector é definida como sendo a relação da corrente fotogerada (I_{FG}) e a potência óptica incidente (P_{IN}) (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002), dada pela equação (55) já vista no item 3.0 desta tese e pode ser observada na Figura 54 que mostra a responsividade dos fotodiodos em função de L_I para a

luz vermelha e azul em T=300K. Pode ser notado que a responsividade do azul é muito menor do que para a radiação de luz vermelha (cerca de 36 vezes menor), pois este comprimento de onda não atinge a região de depleção formada abaixo da junção (RDD vertical), somente a região de depleção formada na lateral da junção (RDD lateral). Além disso, a maior responsividade de 0,3 A / W e 0,0125 A / W para a luz vermelha e azul, respectivamente, foi apresentada para os dispositivos com L_I de 11µm. Pode-se concluir que a taxa de recombinação mais reduzida é apresentada para este comprimento de região intrínseca, e, portanto, existe um maior número de portadores que contribuem para a fotocorrente. Além disso, para dispositivos com L_I menor que 11 µm, a corrente cai, devido ao aumento da taxa de recombinação, porque existe uma maior região não-depletada dentro da região intrínseca. Isso acontece especialmente para a luz azul, devido à menor profundidade de absorção. No caso da luz vermelha, esta diminuição é menos significativa, uma vez que a radiação atinge a região de depleção vertical, além da lateral (SZE, 1981).

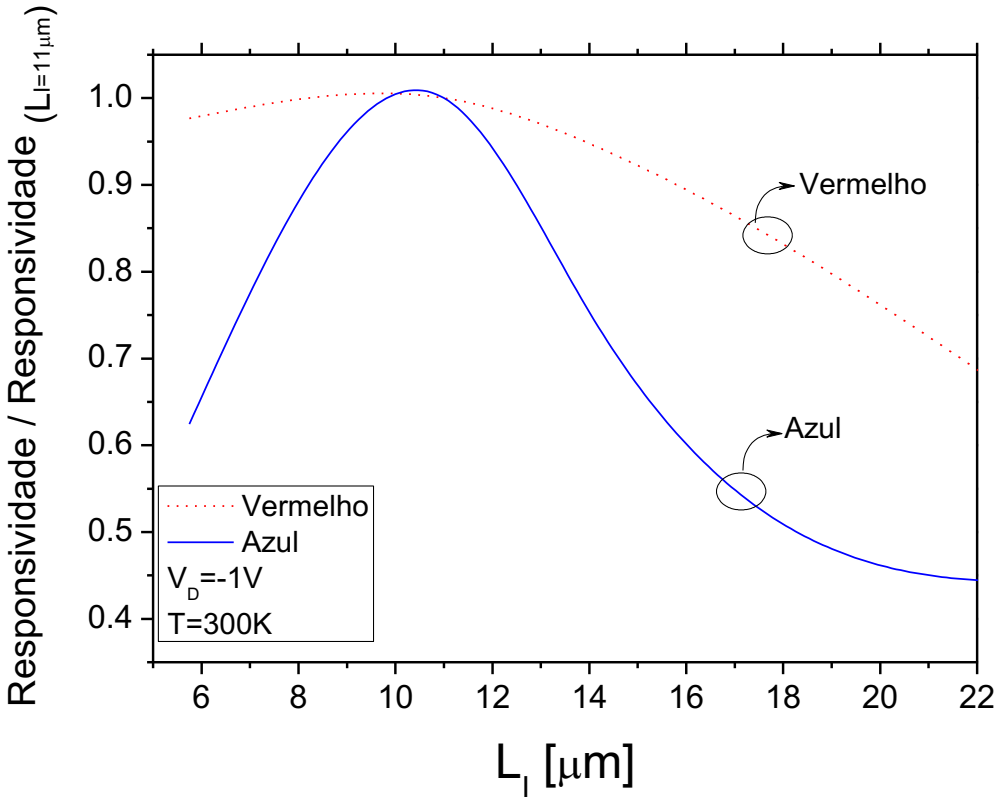
Figura 54 – Responsividade dos fotodiodos em função de L_I para a luz vermelha e azul em T=300K (experimental).



Fonte: Autor

Como já mencionado, a responsividade da radiação eletromagnética azul é mais afetada pela mudança L_I, e, a fim de deixar esta dependência mais visível, a Figura 55 mostra a responsividade normalizada pela responsividade do dispositivo com L_I = 11µm, tanto para o azul, quanto para o vermelho. É possível perceber que a radiação eletromagnética azul que está na faixa de 457nm de comprimento de onda tem uma dependência mais pronunciada com L_I, já que o pico da sua profundidade de absorção é de 130nm segundo (SZE, 1981) e o dispositivo tem 150nm de profundidade de região N+ e P+. Isso demonstra mais claramente o que já foi explicado anteriormente: que a máxima absorção do azul ocorre na região de depleção lateral, que é extremamente dependente da quantidade de dedos do dispositivo (AFZALIAN e FLANDRE, 2004).

Figura 55 – Responsividade normalizada dos fotodiodos em função de L_I para a luz vermelha e azul em T=300K (experimental).



Fonte: Autor

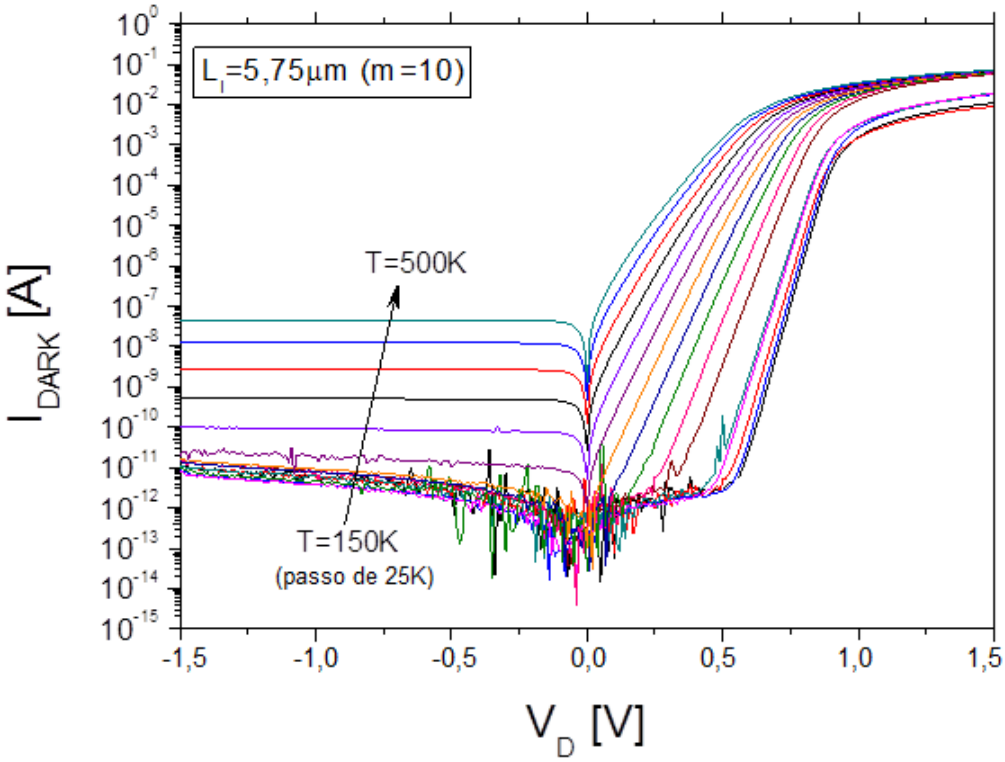
7.4 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Para semicondutores com pequenos valores de concentração intrínsecas (ni), tais como o silício, a corrente de geração é dominante na corrente de escuro para temperaturas mais baixas. No entanto, para as temperaturas mais altas, a corrente de difusão é dominante, uma vez que ni torna-se muito maior (SZE, 1981).

A fim de analisar a influência da temperatura na operação de fotodiodos PIN foram efetuadas medidas experimentais com temperatura variando de 150K a 500K, com passo de 25K. A corrente de escuro em função de V_D é apresentada na Figura 56, medida para o fotodiodo com L_I = 5,75µm e $L_{P,\ N}$ = 10µm (o comportamento dos outros dispositivos apresentam a mesma tendência). Como apresentado nesta figura, a elevação da temperatura, aumenta a corrente de escuro em quatro ordens de grandeza, como seria de se esperar, devido ao aumento da geração térmica de portadores (SOUZA, BULTEEL, *et al.*, 2011). Abaixo de 250K, entretanto, a corrente de escuro não pode ser vista claramente devido a limitações do aparato experimental, o qual não é capaz de medir níveis de corrente inferiores a décimos de pA.

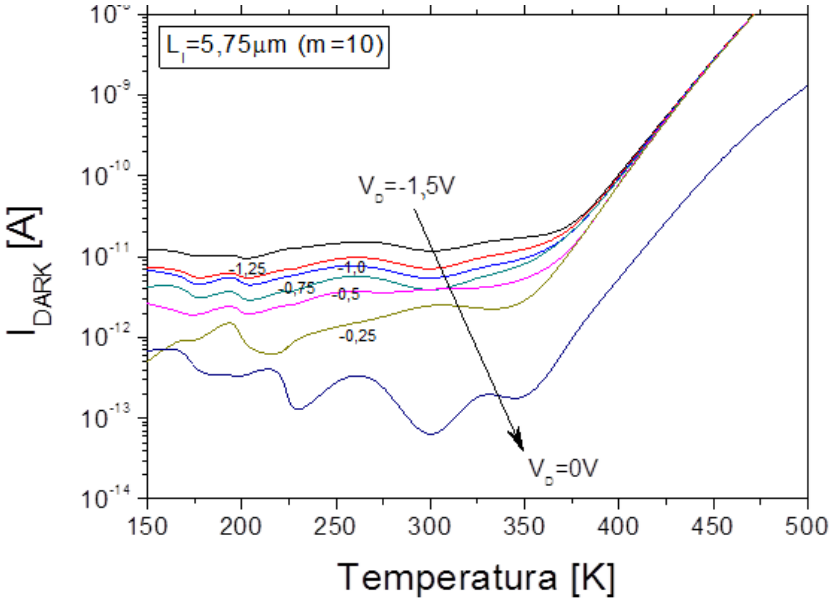
Para a operação do fotodetector, a corrente de escuro deve ser mantida tão pequena quanto possível, uma vez que atua como ruído. Além disso, para temperaturas mais elevadas, V_D praticamente não influencia a corrente de escuro quando o dispositivo é reversamente polarizado. No entanto, especialmente para temperaturas mais baixas, V_D altera I_{DARK}, como pode ser observado na Figura 57, onde a corrente de escuro do dispositivo com L_I = 5,75µm é representada graficamente em função da temperatura para V_D variando entre -1,5V a 0V, com passo de 0,25V. Tensões de anodo mais negativas produzem maior região de depleção e, consequentemente, maior corrente de escuro, devido à taxa de recombinação nesta região ser reduzida (BULTEEL; FLANDRE., 2009). Os resultados apresentados na Figura 57 também mostram que I_{DARK} reduz exponencialmente à medida que a temperatura é reduzida.

Figura 56 – Corrente de escuro em função de V_D para o dispositivo com L_I=5,75µm para várias temperaturas (experimental).



Fonte: Autor

Figura 57 – Corrente de escuro em função da temperatura para o dispositivo com L_I=5,75µm para vários valores de tensão de anodo (experimental).

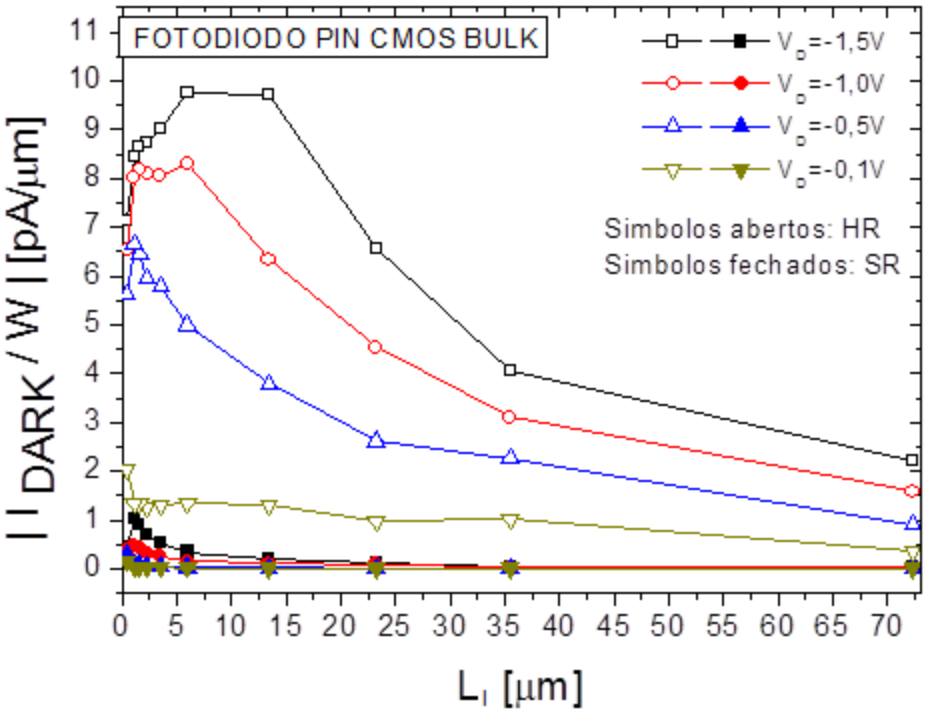


Fonte: Autor

Até este ponto, ficou evidenciado que o tamanho da região de depleção é muito significativo na operação dos fotodiodos e influencia diretamente a corrente de escuro. Por sua vez, o comprimento da região de depleção (dx) é influenciado pela concentração de dopantes da região intrínseca, por isso, foram feitas simulações com duas diferentes concentrações de dopantes da região intrínseca a fim de aprofundar o conhecimento sobre este parâmetro. A primeira concentração utilizada de N_I foi de $2x10^{12}cm^{-3}$ (a qual será chamada de HR- *high resistivity*) e; a segunda, $N_I=6x10^{14}cm^{-3}$ (a qual será chamada de SR- *standard resistivity*). Os valores da largura da região de depleção (dx) encontrados através das equações (34) e (35) foram de $dx_{(HR)}=38,3\mu m$ e $dx_{(SR)}=2,29\mu m$ para $V_D=-1,5V$.

A Figura 58 mostra a corrente de escuro normalizada por W para os fotodiodos PIN CMOS em função de L_I (a normalização por W é necessária já que se trata de uma curva obtida através de simulação). Pode-se observar que a corrente de escuro dos dispositivos SR é menor que aquela apresentada pelos HR, já que a sua região de depleção é menor.

Figura 58 – Corrente de escuro em função de L_I para os fotodiodos PIN CMOS BULK (simulado).



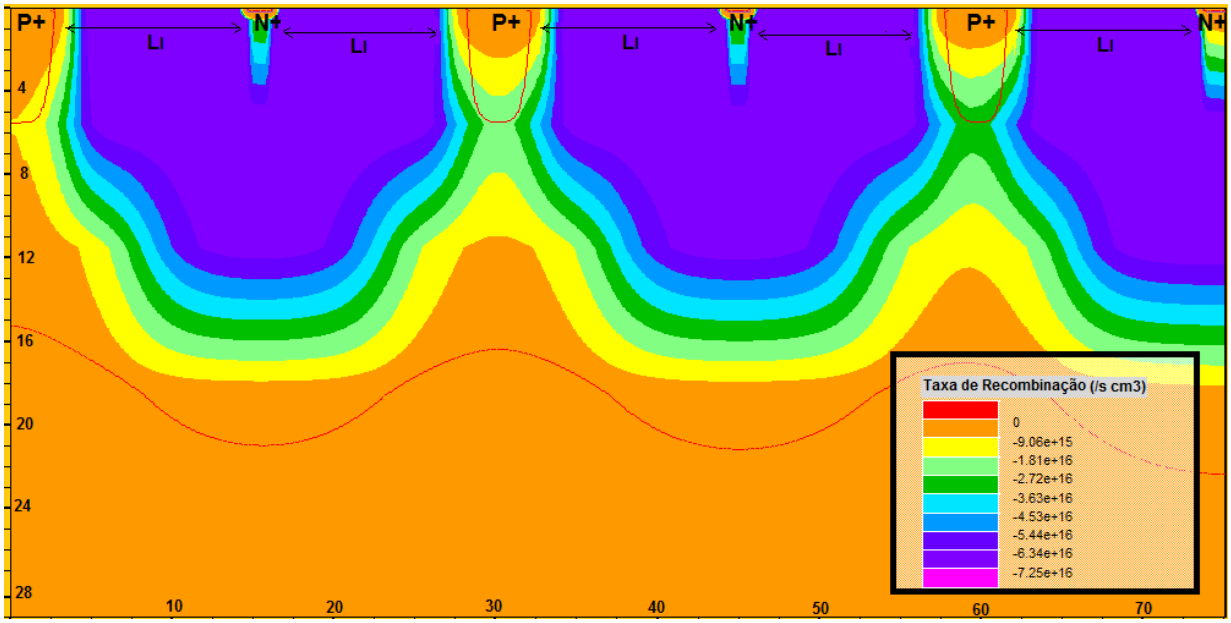
Fonte: Autor

Como a corrente de escuro é diretamente proporcional ao tamanho da região de depleção, é difícil prever o seu comportamento nos dispositivos CMOS em função de L_I, já que podem ser consideradas duas parcelas de RDD: a lateral e a vertical, sendo que esta última é muito influenciada pela quantidade de dedos do dispositivo (AFZALIAN, 2006), como pode ser observado nas Figuras 59 e 60.

A Figura 59 mostra a taxa de recombinação do fotodiodo PIN CMOS com 5 dedos e o contorno da sua região de depleção. Pode-se observar que a região com menor taxa de recombinação fica dentro da RDD (região azul) e que o tamanho da RDD é altamente influenciado pela quantidade de dedos e principalmente pela região P+. Esta mesma observação pode ser feita na Figura 60, que mostra a taxa de recombinação do fotodiodo PIN CMOS com 20 dedos, mostrando uma região de depleção com menor influência da região P+.

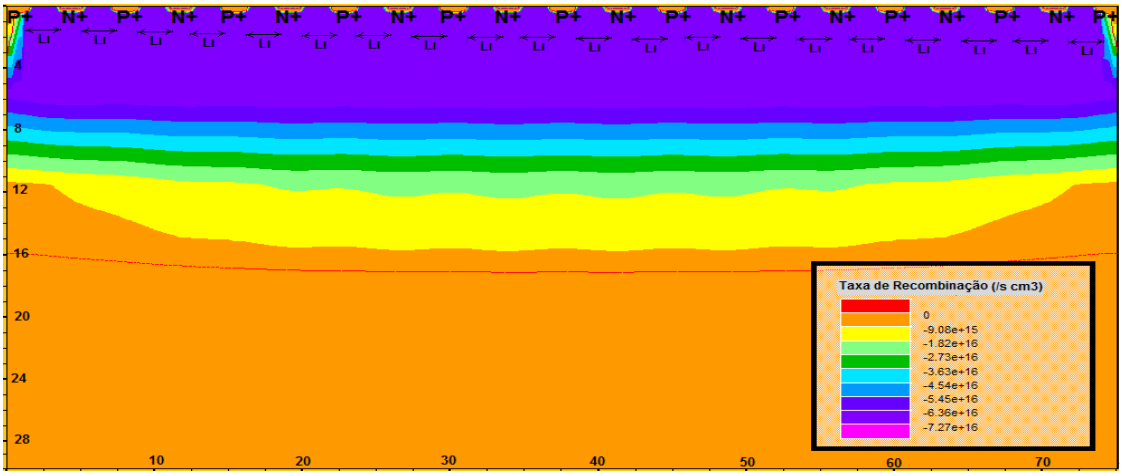
Desta forma, a predição do tamanho da RDD se torna inviável, visto que não é uma região uniforme, e sim, uma região sem formato definido.

Figura 59 – Corte lateral do fotodiodo PIN CMOS com 5 dedos (simulado).



Fonte: Autor

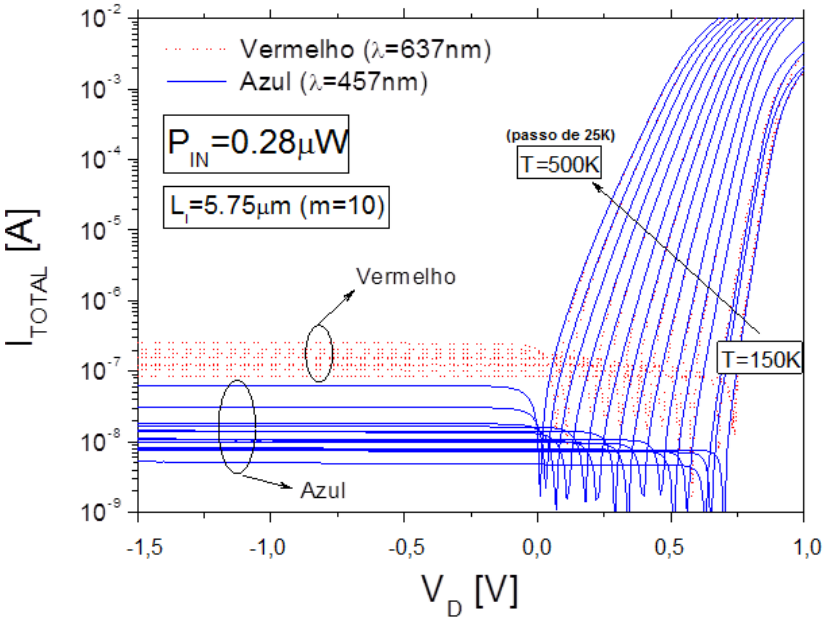
Figura 60 – Corte lateral do fotodiodo PIN CMOS com 20 dedos (simulado).



Fonte: Autor

Assim como a temperatura afeta a corrente de escuro, ela também afeta a corrente total do dispositivo ao ser iluminado. Este fato pode ser visualizado através da Figura 61, a qual mostra a corrente total do dispositivo com L_I=5,75µm em função da tensão de anodo para diferentes temperaturas. Novamente a geração térmica de portadores é responsável pelo aumento do nível de corrente tanto para o azul, quanto para o vermelho.

Figura 61 – Corrente total em função da tensão de anodo para diferentes temperaturas para o dispositivo com L_I=5,75µm (experimental).

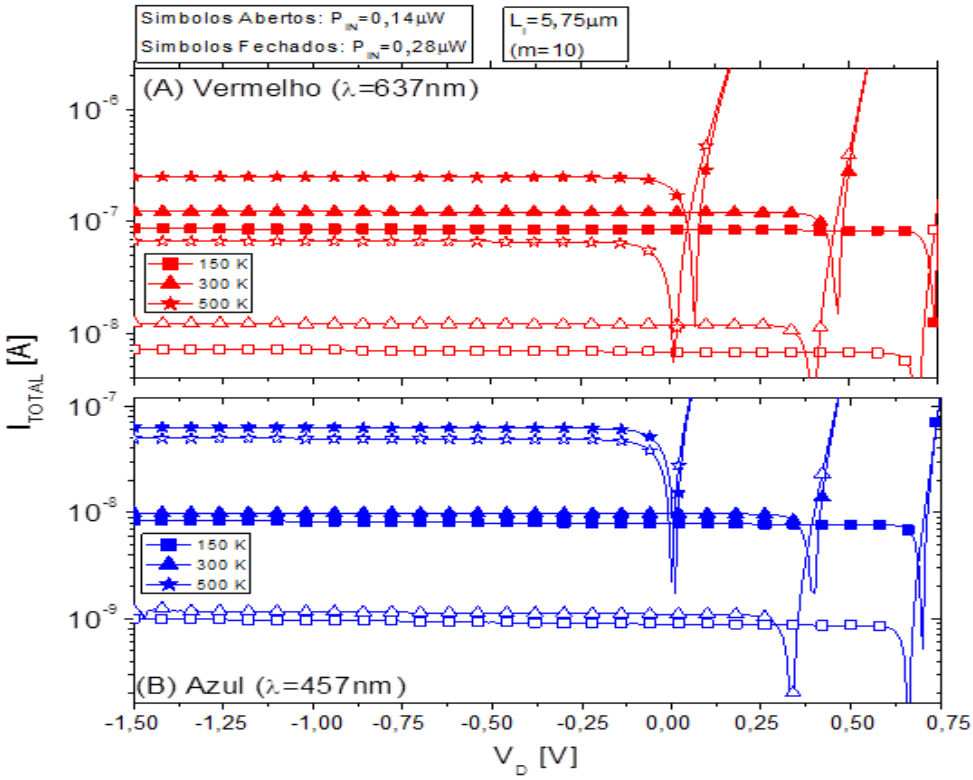


Fonte: Autor

Com o intuito de comparar a influência da potência óptica e do comprimento de onda incidente sobre o funcionamento dos fotodiodos sob diferentes temperaturas, a corrente total do diodo em função de V_D para a luz vermelha e azul é apresentada na Figura 62 (A) e (B), respectivamente. A maior potência óptica incidente produz níveis mais elevados de corrente, bem como, a temperatura mais elevada.

Além disso, o aumento de temperatura torna a influência da potência óptica incidente menos eficaz, especialmente para o azul. A partir dos resultados da Figura 62, a relação entre a corrente gerada com P_{IN} = 0,28µW e P_{IN} = 0,14µW, para T = 150, 300 e 500 K foi obtido e está apresentada na Tabela 4. Pode ser visto que, para temperaturas mais baixas, a relação entre as correntes dos diodos é maior. Este efeito é, provavelmente, um resultado do congelamento dos potadores (SOUZA, BULTEEL, *et al.*, 2011), o que aumenta a influência da potência óptica incidente. Além disso, a diminuição desta relação em alta temperatura pode ser atribuída ao aumento do nível de corrente de escuro conforme a temperatura é elevada, reduzindo o efeito da variação da potência óptica incidente.

Figura 62 – Corrente total em função da tensão de anodo para três diferentes temperaturas para o dispositivo com L_I=5,75µm A) Vermelho, B) Azul (experimental).



Fonte: Autor

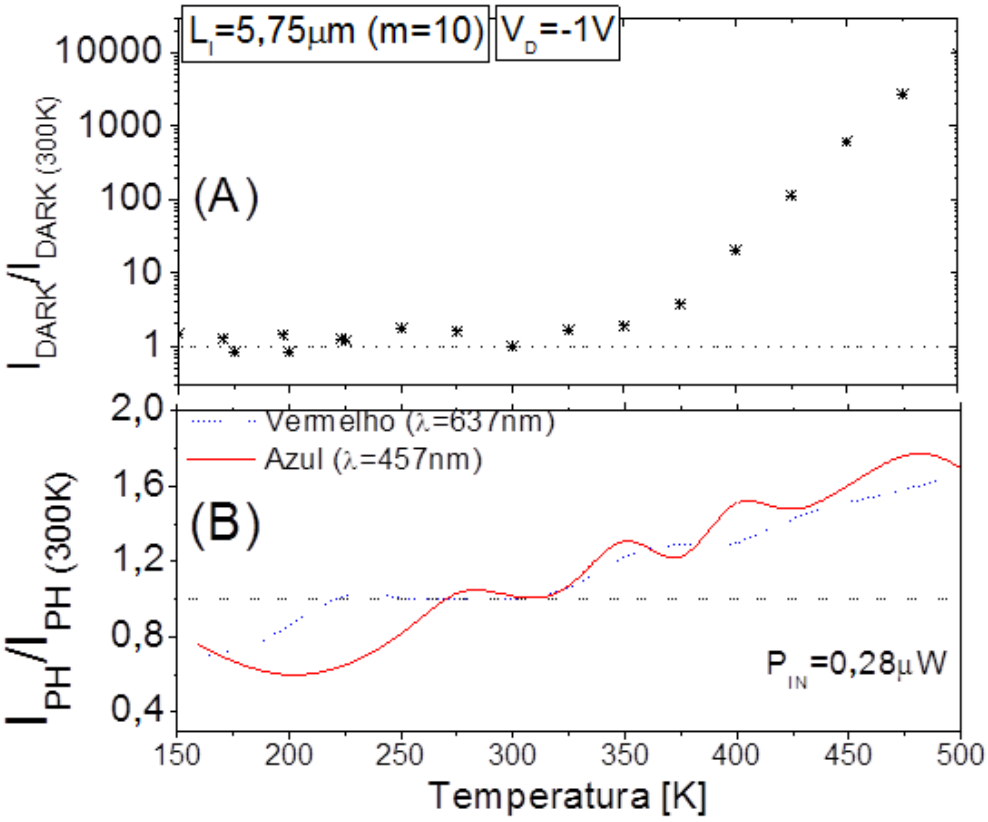
Tabela 4 – Razão das correntes obtidas com potência óptica incidente de 0,28µW em relação a potência de 0,14µW para o azul e vermelho (L_I= 5,75µm e V_D=-1V)

Temperatura (Kelvin)	***[$(I_{TOTAL})_{PIN=0.28\mu W}$ / $(I_{TOTAL})_{PIN=0.14\mu W}$] AZUL***	***[$(I_{TOTAL})_{PIN=0.28\mu W}$ / $(I_{TOTAL})_{PIN=0.14\mu W}$] VERMELHO***
150	9,32	12,07
300	8,54	10,32
500	1,27	3,75

Fonte: Autor

A fim de analisar as particularidades da corrente de escuro (I_{DARK}) e fotogerada (I_{FG}), sob variação da temperatura, a Figura 63- (A) e (B) mostram a corrente normalizada pela sua temperatura ambiente em função da temperatura para a corrente de escuro e fotogerada respectivamente. É possível verificar que I_{DARK} é mais afetada pelo aumento da temperatura e pode ser quase 10 mil vezes maior em comparação à sua temperatura ambiente para T=500K, enquanto I_{FG} é apenas 1,7 vezes maior comparando as mesmas temperaturas, tanto para o azul, quanto para o vermelho. A redução da corrente observada para temperaturas mais baixas pode ser o resultado do efeito do estreitamento de banda proibida, uma vez que, o efeito do BGN (*Band Gap Narrowing*) em regiões altamente dopadas se torna mais pronunciado com a diminuição da temperatura (LANYON e TUFT, 1979). Além disso, o aumento da corrente observada em temperaturas mais elevadas está relacionado à dependência do tempo de vida dos portadores com temperatura e a concentração de portadores (GALETI, MARTINO, *et al.*, 2008).

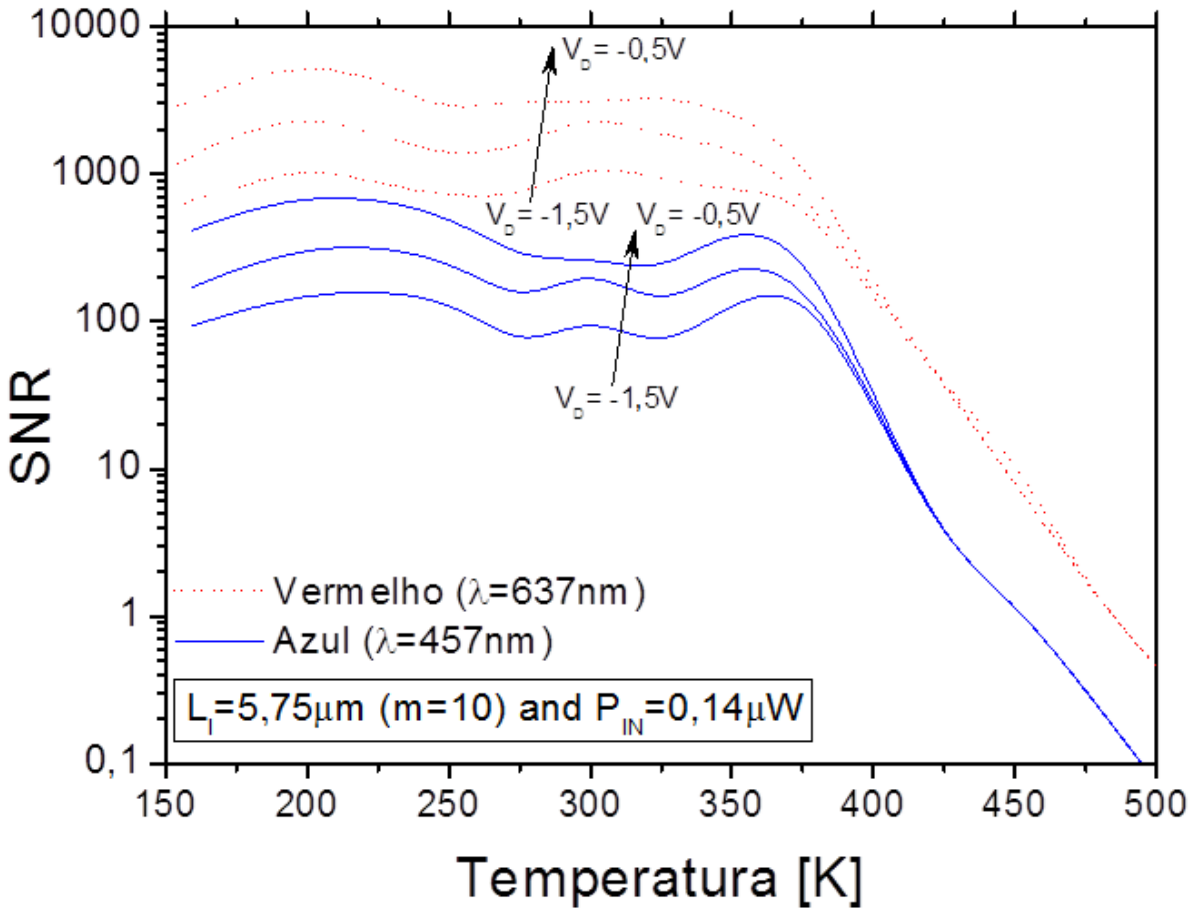
Figura 63 – Corrente normalizada pelo seu valor em temperatura ambiente em função da temperatura com V_D=-1V e L_I=5,75µm para: A) Corrente de escuro, B) Corrente fotogerada (experimental).



Fonte: Autor

Uma figura de mérito muito importante que define a sensibilidade do detector é a relação sinal ruído (SNR), a qual foi definida no item 4.3 como sendo a relação entre a corrente fotogerada e a corrente de escuro. O enorme aumento da corrente de escuro com a elevação da temperatura provoca uma forte redução na relação sinal-ruído como mostra a Figura 64, especialmente para maiores tensões reversas (<V_D). A SNR mostra a mesma tendência nas cores azul e vermelha e pode atingir o valor de 6000 para o vermelho e 700 para o azul em T=200 K. Ao aumentar a temperatura, há dois efeitos que contribuem para a queda da SNR, e, portanto, para o aumento da corrente de escuro. Pode-se dizer que estes dois efeitos são: elevação da geração térmica e o alargamento da região de depleção provocado pela maior tensão reversa do dispositivo.

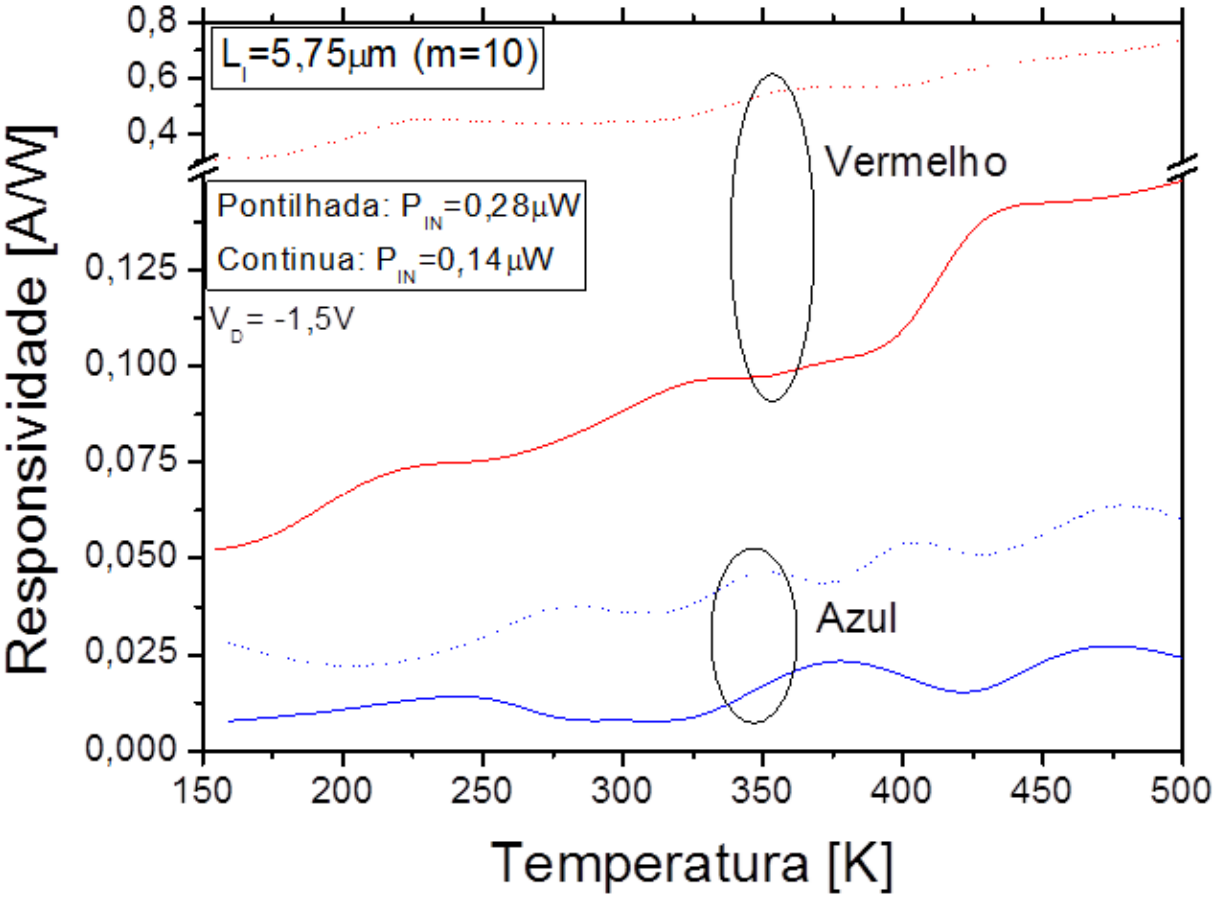
Figura 64 – Relação Sinal- Ruído (SNR) em função da temperatura para dois comprimentos de onda (azul e vermelho) (experimental).



Fonte: Autor

A Figura 65 mostra a responsividade em função da temperatura para a luz vermelha e azul com duas potências ópticas diferentes, V_D = -1,5V para o fotodiodo com L_I = 5,75μm e $L_{P,N}$ = 10μm . Neste caso, a responsividade fica mais elevada com maiores temperaturas, pois ela é diretamente proporcional à corrente total do dispositivo, a qual, por sua vez, depende da corrente de escuro. Além disso, o aumento da potência óptica incidente age no sentido de reduzir a responsividade, quer para o azul, quanto para o vermelho, pois ela é inversamente proporcional a este valor.

Figura 65 – Responsividade em função da temperatura para vermelho e azul com duas diferentes potências ópticas incidentes (experimental).



Fonte: Autor

7.5 RESULTADOS PARCIAIS PARA SENSORES DE IMAGEM

Até esse ponto foram analisados o comportamento e os principais parâmetros dos fotodiodos PIN utilizados para aplicações em sensores de imagem. Dessa forma, já é possível apresentar, neste item, os resultados obtidos mais relevantes para esses dispositivos.

Em primeiro lugar foi constatado que o aumento da potência óptica incidente produz maior variação na corrente gerada pelo comprimento da radiação luminosa na faixa do vermelho (λ=637nm), especialmente devido à presença da região de depleção vertical.

Outro importante resultado foi a verificação da dependência das figuras de mérito com o comprimento da região intrínseca. Esse fato leva à constatação de que a escolha de L_I deve ser feita com muito critério e, que para a tecnologia analisada, os melhores resultados foram obtidos para o dispositivo com L_I de 11µm.

Como foi mostrado no capítulo 4, a principal figura de mérito para sensores de imagem é a responsividade. Dessa forma, a seguir serão mostrados os principais resultados obtidos para o dispositivo em questão ao ter sua temperatura alterada. É importante mencionar que havia uma lacuna na comunidade científica no que diz respeito a esse tipo de análise em função da tempertura e é o que este trabalho tenta sanar.

A responsividade de um fotodiodo lateral de sílicio com L_I de 20µm já apresentada pela comunidade científica em (LUNARDI, 2015) no ano de 2015 atingiu 0,58 A/W para a radiação eletromagnética na faixa do vermelho e em (WOODWARD; KRISHNAMOORTHY, 1999) o dispositivo atingiu 0,04 A/W para o azul (ambos em temperatura ambiente). Já neste trabalho, o fotodiodo PIN com L_I de 11µm atingiu 0,45 A/W para o vermelho e 0,035 A/W para o azul em temperatura ambiente, ficando aquém dos resultados já publicados. Entretanto, em altas temperaturas (T=500K), o dispositivo atingiu 0,77 e 0,052 A/W para o vermelho e azul, respectivamente, o que representa um aumento de 41% para o vermelho e 33% para o azul. No entanto, em baixa temperatura (T=150K), há uma queda na responsividade, sendo R=0,32 A/W para o vermelho e R=0,027 A/W para o azul.

8 RESULTADOS PARA SENSORES UTILIZADOS EM APLICAÇÕES ESPECÍFICAS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos pelos dispositivos em tecnologia SOI CMOS utilizados em aplicações específicas que exigem alta sensibilidade na faixa de UV. Entre estas aplicações, pode-se citar: detecção e medidas de concentração de raios UV, medidas de DNA e proteína, detecção de chama (sistema anti-incêndio), concentração e medidas de gases na atmosfera, leitura de dados ópticos como Blue-ray, etc. É importante mencionar que, para esses tipos de aplicação, além de fornecer alta relação sinal-ruídos, os dispositivos devem apresentar alta eficiência quântica.

No item 8.1 serão apresentados os resultados obtidos para o fotodiodo SOI em tecnologia de 2µm da UCL e no item 8.2 serão apresentados os resultados obtidos para o fotodiodo SOI em tecnologia de 0,13µm da ST Microelectronics.

8.1 DISPOSITIVOS SOI EM TECNOLOGIA DE 2µM

Os fotodiodos utilizados neste item foram desenvolvidos e fabricados na Universidade Católica de Louvain na Bélgica em tecnologia de 2µm. São dois dispositivos diferentes (L_I=8µm e L_I=9µm) e as suas dimensões e principais parâmetros estão descritos na Tabela 5.

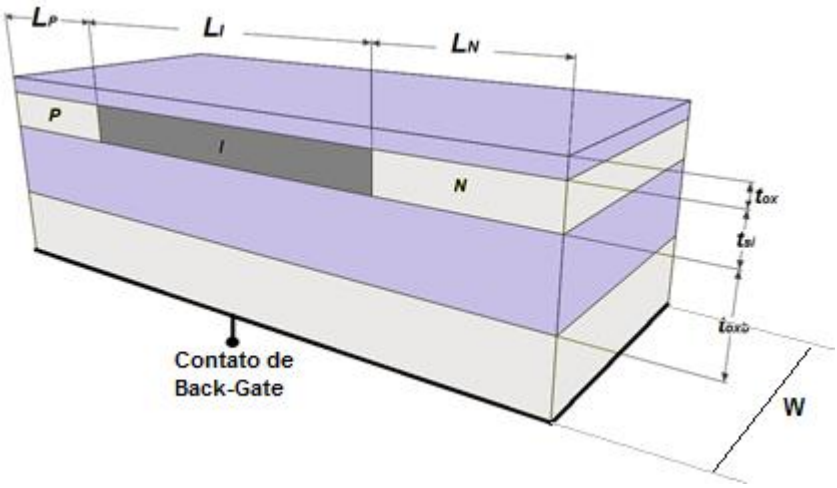
Tabela 5 – Principais parâmetros do fotodiodo SOI em tecnologia 2µm da UCLouvain

Parâmetro	Valores
Espessura de Silício, tsi	80nm
Espessura do Óxido Enterrado, toxb	390nm
Espessura do Óxido de Passivação, tox	280nm
Concentração de dopantes da região intrínseca, N_I	$1x10^{15}cm^{-3}$
Concentração de dopantes da região P+ , N_A	$1x10^{20}cm^{-3}$
Concentração de dopantes da região N+, N_D	$4x10^{20}cm^{-3}$
Largura do dispositivo, W (L_I=8µm)	14.5mm
Largura do dispositivo, W (L_I=9µm)	55.0mm
Área Total, A_T (L_I=8µm)	$0.25mm^2$
Área Total, A_T (L_I=9µm)	$1mm^2$
Comprimento das regiões P e N, L_P e L_N	9µm

Fonte: Autor

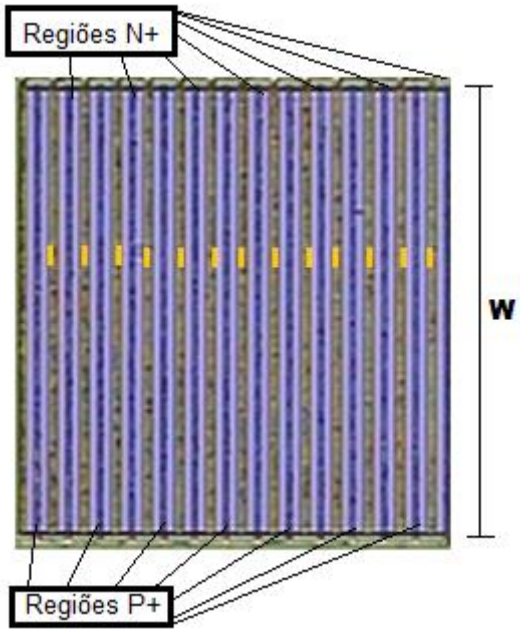
A Figura 66 mostra um esquemático de um dedo do fotodiodo SOI e a Figura 67 mostra uma fotografia deste dispositivo com 13 dedos, no qual as regiões intrínsecas estão identificadas pela letra I em laranja, intercaladas pelas regiões N+ e P+ na cor azul.

Figura 66 – Esquemático do fotodiodo PIN SOI



Fonte: Autor

Figura 67 – Fotografia do fotodiodo PIN SOI



Fonte: Autor

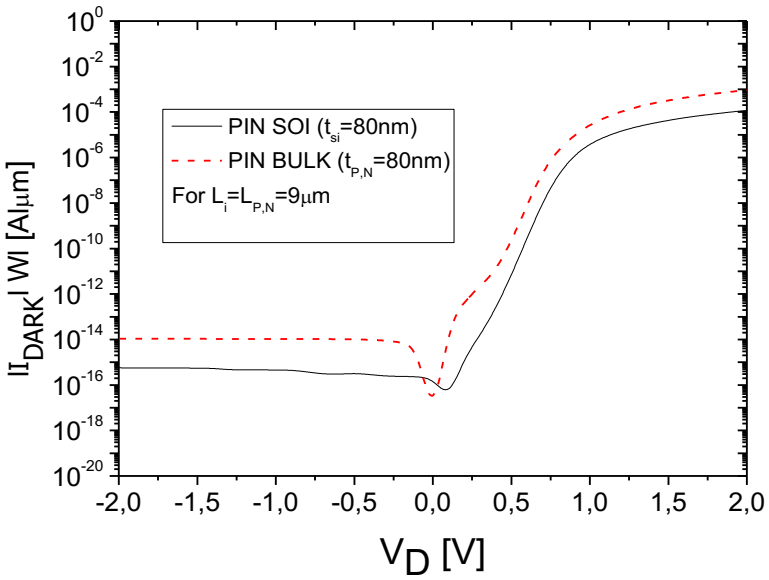
8.1.1 Comparação entre dispositivos BULK e SOI

Para iniciar a análise foram feitas simulações no software Atlas a fim de comparar a performance do dispositivo SOI com o BULK CMOS convencional, já tratado no item 8.

A Figura 68 mostra a corrente de escuro em função de V_D para o fotodiodo PIN com tecnologia CMOS SOI e também para o fotodiodo PIN CMOS BULK considerando os mesmos parâmetros de processo, apenas alterando a espessura das regiões P e N para 80nm, a fim de igualá-la a espessura do filme de silício da tecnologia SOI. Desta forma, a região de depleção lateral dos dois dispositivos tem o mesmo tamanho, já que, segundo as equações 34 e 35, a espessura da região de depleção depende da concentração de dopantes, da tensão reversa de polarização e do potencial interno, os quais são idênticos em ambos os dispositivos. Assim, é claramente notado o efeito do substrato de silício no dispositivo BULK, já que ele apresenta maior corrente de escuro do que o fotodiodo SOI, devido à presença da região de depleção vertical, na qual, há o aumento da geração térmica de portadores, o que aumenta a corrente de escuro. Já no dispositivo SOI, não há formação da região de depleção vertical, devido à presença do óxido enterrado.

A utilização dos dispositivos PIN laterais permite a integração dos fotodetectores com o circuito CMOS, portanto é importante conhecer o comportamento destes dispositivos em tecnologias mais avançadas, que possuem a espessura das regiões P+, N+ menores (no caso BULK) ou a espessura do filme de silício menor (no caso SOI). Desta forma, foram feitas simulações para a tecnologia BULK com os valores de $L_{P,N}$ de 170nm (seguindo a tecnologia XO035 da XFAB descrita em (XFAB MIXED-SIGNAL FOUNDRY EXPERTS, 2012)) e para $L_{P,N}$=80nm (seguindo a tecnologia FC025 da XFAB descrita em (XFAB MIXED-SIGNAL FOUNDRY EXPERTS, 2012)). Para os dispositivos SOI, foram feitas simulações para t_{SI}=40nm (seguindo a tecnologia de 150nm da OKI Semicondutores descrita em (DOMAE e AL, 2008)) e para t_{SI}=15nm (seguindo a tecnologia de 65nm do IMEC descrita em (AUGENDRE e AL, 2005)). Os comprimentos, a concentração de dopantes, e as espessuras dos óxidos foram mantidas iguais as da simulação inicial.

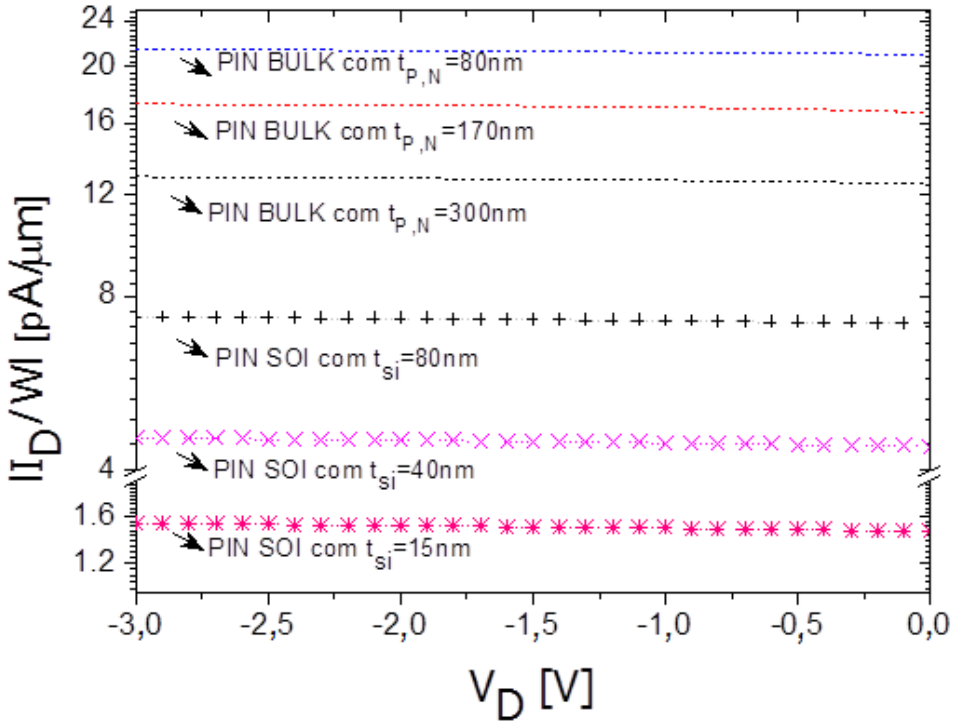
Figura 68 – Módulo da corrente de escuro em função de V_D para o diodo PIN em tecnologia SOI e BULK. (simulado)



Fonte: Autor

A Figura 69 apresenta a corrente fotogerada em função de V_D para diferentes tecnologias com radiação luminosa de 400nm de comprimento de onda. Os resultados simulados mostram que ao diminuir a espessura do filme de silício para a tecnologia CMOS SOI, a corrente fotogerada diminui, em consequência da redução da quantidade de fótons absorvidos, já que há diminuição da espessura da RDD lateral. Para os dispositivos da tecnologia CMOS BULK, ao diminuir a espessura das regiões P,N, diminui-se também a espessura da região de depleção lateral, tal como nos dispositivos SOI. Em contrapartida, a corrente fotogerada aumenta, pois a proximidade da RDD vertical em relação à superfície aumenta, portanto acrescendo consideravelmente a absorção de fótons que se contrapõe a diminuição da espessura da RDD lateral.

Figura 69 – Corrente fotogerada em função da tensão aplicada para fotodiodo PIN CMOS SOI e BULK com diferentes $t_{P,N}$ e t_{SI} para iluminação de λ=400nm. (simulado)



Fonte: Autor

Impurezas doadoras e aceitadoras são comumente introduzidas ao semicondutor para aumentar a concentração de elétrons ou de lacunas, os quais modificam as propriedades físicas dos semicondutores. Nos fotodiodos PIN, alterar a concentração de impurezas da camada intrínseca, que na verdade, é uma região P fracamente dopada, significa alterar a largura da região de depleção. Através da equação 59, obtida de (MARTINO, PAVANELLO e VERDONCK, 2003), a largura da região de depleção total (d) é igual à largura da região de depleção do lado menos dopado, que no caso dos dispositivos simulados é o lado P (região intrínseca), dado por d_P.

$$d = dp = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{si}(V_{BI} - V_D)}{qN_I}} \tag{45}$$

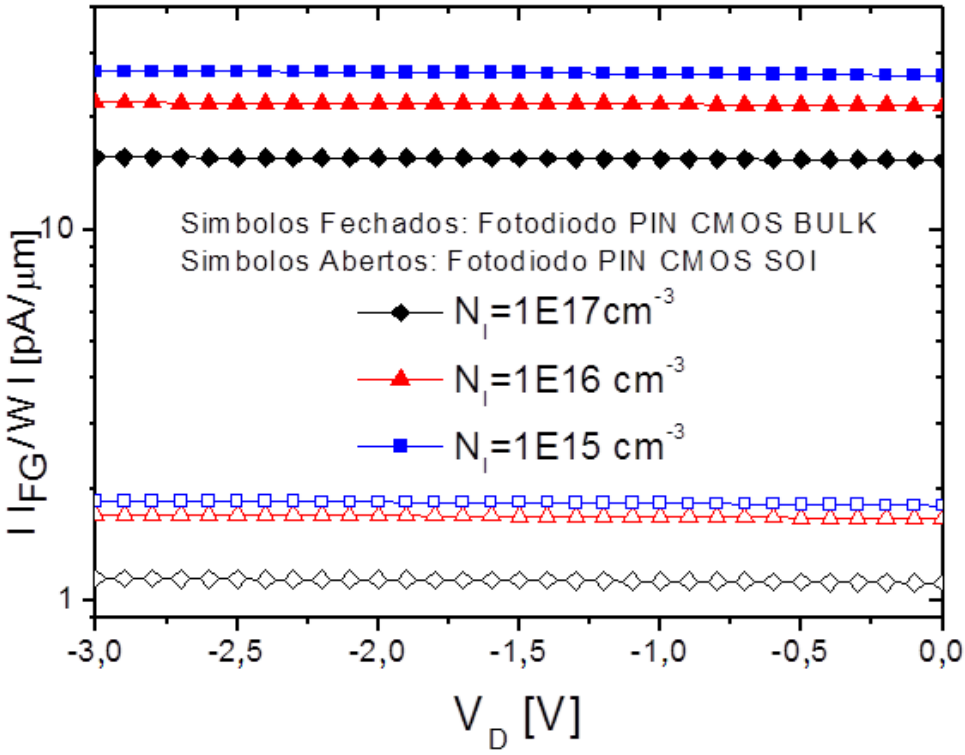
Tabela 6 – Comprimentos da região de depleção em função de N_I

N_I (cm^{-3})	d (nm)
$1x10^{15}$	1350
$1x10^{16}$	440
$1x10^{17}$	140

Fonte: Autor

Na Tabela 6 são mostrados os comprimentos da região de depleção lateral de acordo com a concentração de dopantes da região intrínseca (para o dispositivo cujas dopagens são: N_A=$1x10^{20}cm^{-3}$ e N_D=$4x10^{20}cm^{-3}$). É observável que, quanto maior a concentração N_I, menor será o comprimento da região de depleção lateral, portanto, a fotocorrente irá diminuir (conforme mostra a Figura 70). Obviamente, o fotodiodo BULK possui ainda a região de depleção vertical, por isso, sua fotocorrente apresenta valores maiores que o SOI.

Figura 70 –Corrente fotogerada em função de V_D para fotodiodos PIN CMOS SOI e BULK com λ=400nm e diferentes valores de N_I. (simulado)



Fonte: Autor

8.1.2 Estruturas multi-camadas

Conforme foi visto no item 2.4, nos meios homogêneos a propagação da luz é retilínea e quando um raio atinge a interface que separa dois meios distintos, uma fração da potência do raio incidente (P_{IN}) é refletida (P_R) como se pode verificar na Figura 6. Há também uma parte da potência que é transmitida (P_T), e uma terceira fração que é absorvida (P_A).

A razão entre a potência refletida e a potência incidente é chamada de refletividade (*R*) e é dependente do comprimento de onda incidente, das espessuras dos meios e dos seus índices de refração (ZÍLIO, 2000).

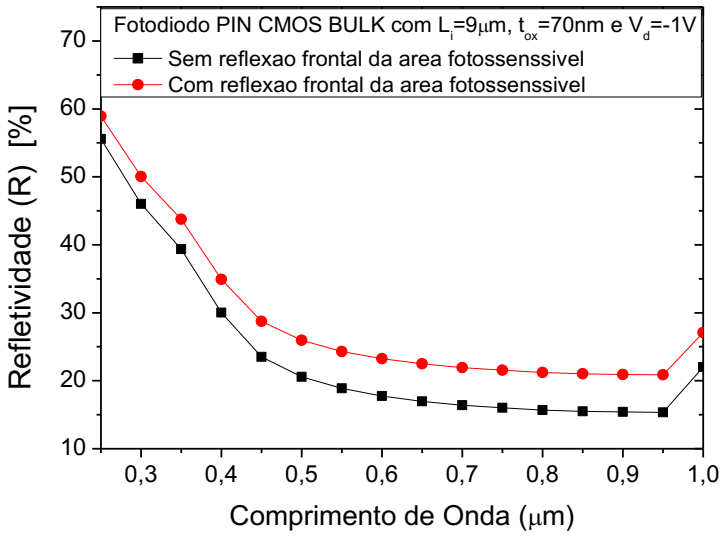
A refletividade total do dispositivo é mostrada na Figura 71 para o fotodiodo PIN CMOS BULK em duas situações, considerando reflexão frontal e desconsiderando qualquer tipo de reflexão na área fotossensível. É importante salientar que nas áreas cobertas por metal (eletrodos), a reflexão pode ser considerada de 100%, pois o metal é um material opaco (não permite a refração da luz) (ZÍLIO, 2001), portanto, a refletividade mostrada na Figura 71 é a total do dispositivo, considerando a área fotossensível e a área não-fotossensível (metal).

Pode-se notar que a refletividade aumenta nos casos onde a reflexão na primeira interface é considerada, por diminuir a fração da luz que é aproveitada no dispositivo.

Para comprimentos de onda abaixo de 500nm, a refletividade é bastante afetada pela reflexão interna, chegando a atingir praticamente 60%. Já para comprimentos de onda acima de 550nm, a refletividade praticamente se mantém constante e é basicamente afetada pela reflexão da área não fotossensível (metal).

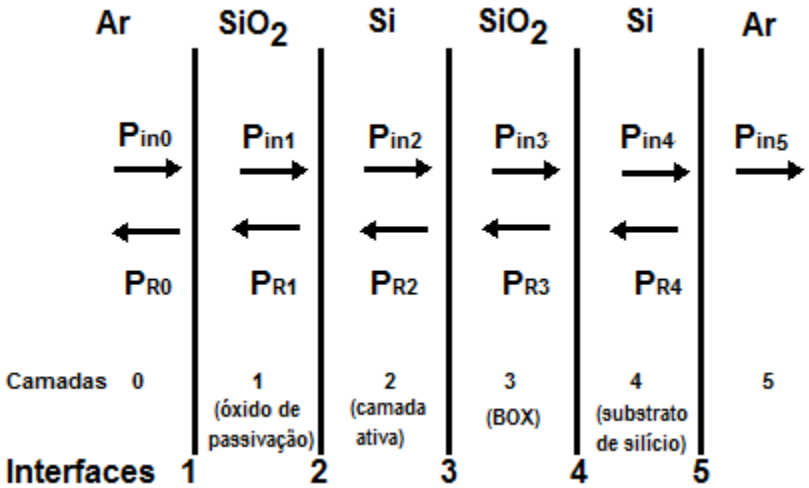
Entretanto, o fenômeno da reflexão não ocorre somente na interface frontal, mas em cada interface que divide dois meios distintos, devido à diferença dos índices de refração, sendo uma parte transmitida e outra refletida. Desta forma, mesmo desconsiderando a reflexão frontal, a refletividade do dispositivo não é zero, pois é necessário considerar as reflexões internas. Este fenômeno conhecido como efeito de cavidade ressonante (AFZALIAN, 2006), permite que uma parte do raio luminoso incidente cruze várias vezes a mesma camada de material, permitindo maior absorção, conforme mostra a Figura esquemática 72 para uma estrutura SOI. Pode-se identificar, nessa figura, cinco interfaces distintas, sendo que a primeira interface é aquela que divide o ar da primeira camada de isolante (óxido de passivação), a segunda interface divide o óxido de passivação e a camada de silício ativa, a terceira interface divide a camada de silício ativa e o óxido enterrado (BOX), a quarta interface divide o BOX e o substrato de silício e a quinta e última interface divide o substrato de silício e o ar atmosférico.

Figura 71 – Refletividade do fotodiodo PIN CMOS BULK em função de λ para diferentes reflexões (simulado)



Fonte: Autor

Figura 72 – Estrutura multi-camada de um dispositivo SOI



Fonte: Autor "adaptado de" (AFZALIAN, 2006)

A radiação luminosa refletida em uma interface pode ser absorvida no meio que já havia trafegado, por exemplo, a radiação luminosa que foi refletida pela interface 3 (P_{R2}) pode ser absorvida na camada de silício, diminuindo assim a refletividade total da estrutura, podendo aumentar portanto, a fração absorvida do dispositivo.

A potência absorvida em uma interface i pode ser calculada pela equação 60 segundo a ref. (AFZALIAN, 2006).

$$P_{Ai} = P_{Ti} - P_{T(i+1)} \tag{46}$$

A equação 60, portanto, indica que a potência absorvida por um meio em uma dada interface (P_{Ai}) é a diferença entre as potências transmitidas por esta interface (P_{Ti}) e a seguinte [$P_{T(i+1)}$].

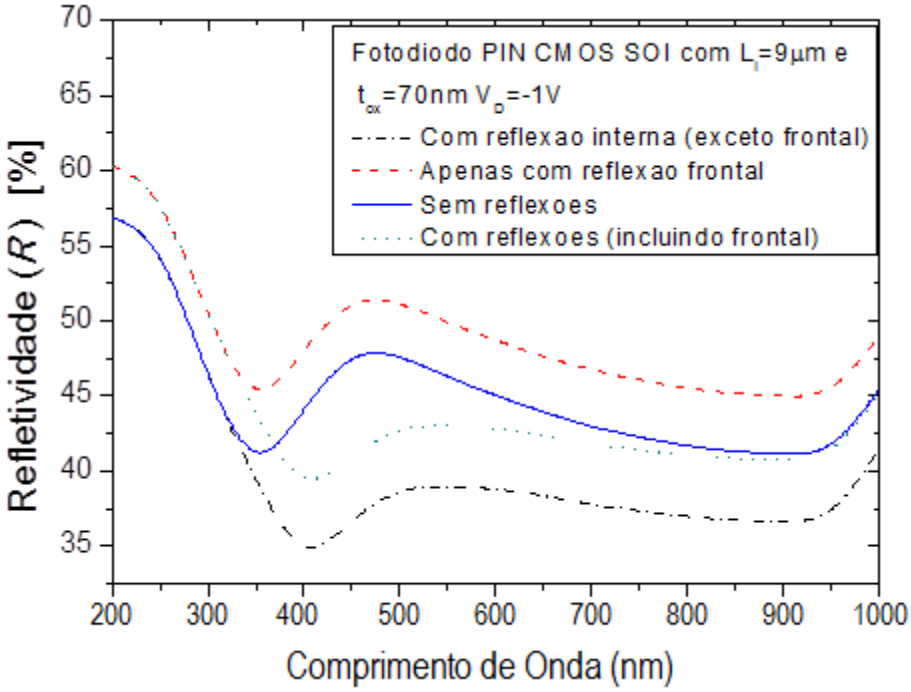
Tendo em vista o efeito de cavidade ressonante, pode-se observar que a menor refletividade e, portanto, a maior absorção, é dada para o caso onde é considerado apenas as reflexões internas conforme mostra a Figura 73. Nesta Figura, foi simulado um fotodiodo CMOS SOI com diferentes situações de reflexões.

Para comprimentos de onda menores que aproximadamente 390nm, apenas a reflexão frontal causa diferença na refletividade, visto que a radiação luminosa com até este comprimento de onda não alcança as demais interfaces e, portanto, não sofre reflexões dentro do dispositivo. Obviamente, quando é considerada a reflexão frontal, o percentual de refletividade aumenta já que uma menor parte da potência óptica incidente é transmitida para as demais interfaces.

Já para λ maior que 390nm, a reflexão interna entre as interfaces produz diferenças na refletividade, sendo a maior refletividade obtida quando apenas há reflexão frontal, podendo chegar a mais de 50% para λ=470nm. E a menor refletividade é obtida quando apenas a reflexão interna é considerada, chegando a 35% para comprimentos de onda de 400nm.

Pode-se resumir que a reflexão frontal é prejudicial ao funcionamento do dispositivo, pois diminui a fração da potência incidente que pode ser aproveitada para a geração de portadores, entretanto, a reflexão entre as interfaces internas do fotodiodo é favorável ao aumento da fotocorrente, já que pode aumentar a fração da potência absorvida.

Figura 73 – Refletividade do fotodiodo PIN CMOS SOI em função de λ para diferentes reflexões (simulado)



Fonte: Autor

8.1.3 Influência da quantidade de dedos

A fim de prever o comportamento de dispositivos multidedos SOI, foram simuladas estruturas com diferentes configurações seguindo a tecnologia FC025 da XFAB para os fotodiodos CMOS BULK (XFAB MIXED-SIGNAL FOUNDRY EXPERTS, 2012) e a tecnologia ST013 da ST Microeletrônica (ST Microelectronics) para os fotodiodos SOI.

As Figuras 74 e 75 mostram, respectivamente, a estrutura multi-finger CMOS BULK (já havia sido mostrada no item 8.1) e CMOS SOI utilizadas.

A Tabela 7 mostra as principais dimensões dos dispositivos simulados com a quantidade de dedos (m), a qual é proporcional à quantidade de regiões intrínsecas. O comprimento total dos dispositivos (L_{TOTAL}) foi mantido praticamente constante, por isso, ao aumentar o comprimento da região intrínseca (L_I), a quantidade de dedos diminui.

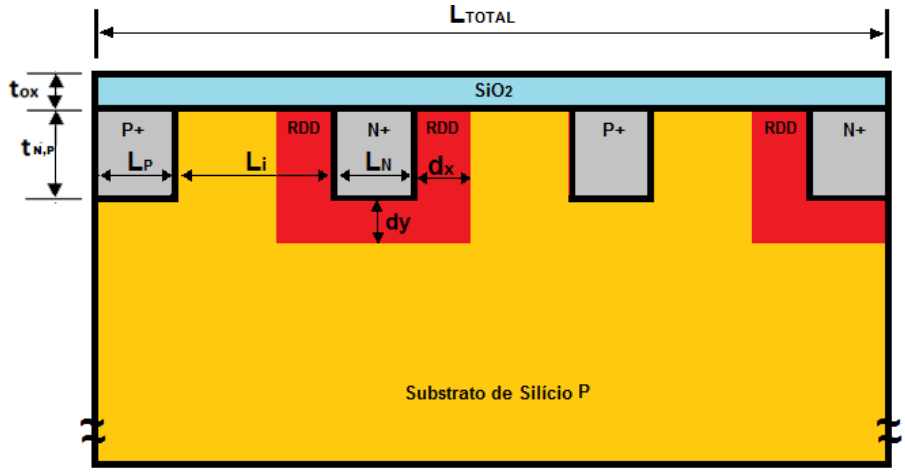
A concentração de dopantes das regiões N^+ e P^+ foram consideradas $N_{N+}=4x10^{20}cm^{-3}$ e $N_{P+}=1x10^{20}cm^{-3}$. Foram utilizadas duas concentrações de substrato (P-), sendo a primeira (N_I) de $2x10^{12}cm^{-3}$ (a qual será chamada de HR) e; a segunda, $N_I=6x10^{14}cm^{-3}$ (a qual será chamada de SR), as quais, já foram utilizadas no item 8.1.

Tabela 7 – Principais dimensões dos dispositivos multi-finger

m	L_I (µm)	$L_{P,N}$ (µm)	L_{TOTAL} (µm)	L_{FOTO}/L_{TOTAL} (%)
1	72,3	1,36	75,02	96,4
2	35,5	1,36	75,08	94,6
3	23,2	1,36	75,04	92,8
5	13,4	1,36	75,16	89,1
10	6	1,36	74,96	80,0
15	3,5	1,36	74,26	70,7
20	2,3	1,36	74,56	61,7
25	1,6	1,36	75,36	53,1
30	1,1	1,36	75,16	43,9
40	0,48	1,36	74,96	25,6

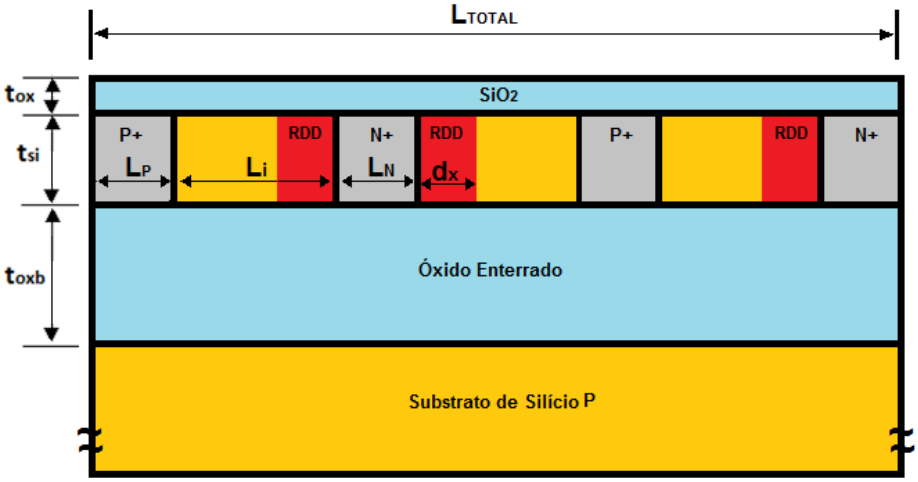
Fonte: Autor

Figura 74 – Figura esquemática de um fotodiodo PIN CMOS BULK com 3 dedos



Fonte: Autor

Figura 75 – Figura esquemática de um fotodiodo PIN CMOS SOI com 3 dedos



Fonte: Autor

A região de depleção de um dispositivo Multi-Finger é formada entre a junção da região N^+ com a região intrínseca (P^-). Em contrapartida, a região L_I pode estar totalmente depletada ou não. Ou seja, para $dx \geq L_I$, a região intrínseca estará totalmente depletada.

Na Tabela 8 estão calculados os valores de dx para as duas concentrações de dopantes dos dispositivos utilizando as equações (34) e (35), considerando V_D=-1,5V.

Tabela 8 –Valores da RDD dos dispositivos multi-finger

$dx_{(HR)}$	38,3µm
$dx_{(SR)}$	2,29µm

Fonte: Autor

Com os valores de dx, pode-se verificar que, dependendo da quantidade de dedos do dispositivo e consequentemente, do comprimento L_I, a região intrínseca pode estar totalmente depletada ou não.

Este fato pode ser visualizado através da Figura 76, a qual mostra a eficiência quântica total para o fotodiodo CMOS SOI em função de L_I.

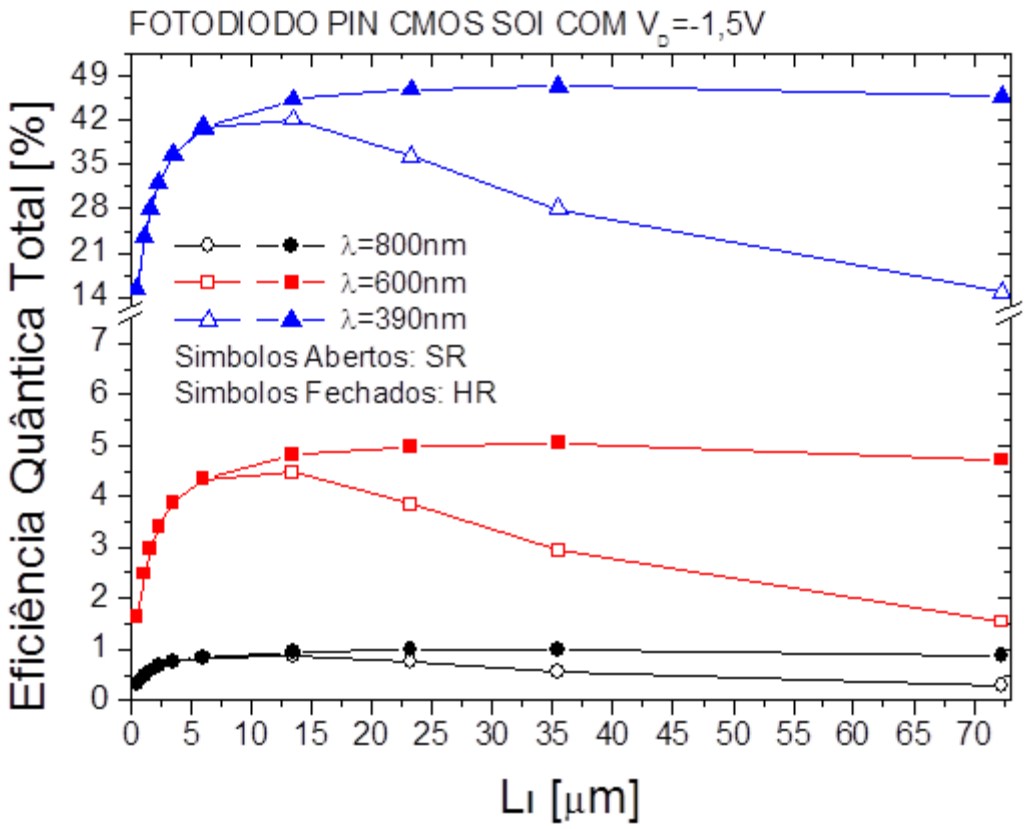
Conforme já foi comentado, a eficiência quântica total (EQ_T) é definida como sendo a razão entre a corrente de anodo realmente fotogerada (I_{FG}) e a máxima corrente que poderia ter sido gerada se todos os fótons tivessem sido convertidos em fotoportadores (SZE, 1981). Por isso, quanto maior a corrente fotogerada, maior será a eficiência quântica total.

A maior eficiência quântica total foi obtida para o menor comprimento de onda devido à profundidade de penetração da radiação luminosa ser menor. Enquanto para λ=800nm, a eficiência quântica total não chega a 1%, tendo em vista que a maior parte dos fotoportadores gerados no substrato não tem chance de difundir para a RDD.

No caso dos fotodiodos HR, o único dispositivo cuja região intrínseca não é totalmente depletada é o dispositivo que apresenta um único dedo (m=1 ou L_I=72,3µm). Já no caso dos demais dispositivos (de m=2 a m=40), a região intrínseca está totalmente depletada.

Este fato pode ser observado através da Figura 76 para os dispositivos HR (considerando mesma área total para todos os dispositivos), pois a eficiência quântica total aumenta conforme o L_I aumenta. Isso se deve a dois fatores: o primeiro é que a região fotossensível (L_{FOTO}/L_{TOTAL}) aumenta conforme aumenta o L_I, o que pode ser visto na Tabela 7, por isso a quantidade absorvida de radiação é maior, consequentemente aumentando a fotocorrente. O segundo fator é relativo ao aumento do tamanho da região de depleção de todo o dispositivo, o qual pode ser visualizado na Tabela 9.

Figura 76 – Eficiência quântica total de um fotodiodo PIN CMOS SOI em função de L_I para três comprimentos de onda. (simulado)



Fonte: Autor

Tabela 9 –Valores da RDD total dos dispositivos multi-finger

m	$L_{I\ (\mu m)}$	$dx_{total\ (HR)}$ (µm)	$dx_{total\ (SR)}$ (µm)
1	72,3	38,3	2,29
2	35,5	71	4,58
3	23,2	69,6	6,87
5	13,4	67	11,45
10	6	60	22,9
15	3,5	52,5	34,35
20	2,3	46	45,8
25	1,6	40	40
30	1,1	33	33
40	0,48	19,2	19,2

Fonte: Autor

Os símbolos $dx_{total(HR)}$ e $dx_{total(SR)}$ determinam o comprimento total da região de depleção. Por exemplo, para o fotodiodo HR com cinco dedos (m=5), há cinco regiões intrínsecas de comprimento L_I=13,4µm, sendo o valor obtido de região de depleção

$dx_{(HR)}$=38,3µm. Como o valor de $dx_{(HR)}$ é maior que L_I, a região intrínseca estará totalmente depletada e o valor da RDD em cada dedo será exatamente o valor de L_I. Como há cinco dedos, o comprimento total da região de depleção deste dispositivo será de cinco vezes o valor de L_I, portanto, $dx_{total\ (HR)}$=67µm.

Por isso, ao observar a Figura 76, pode-se notar que a eficiência quântica do dispositivo HR aumenta com o aumento de L_I, pois o valor de $dx_{total(HR)}$ aumenta, fazendo que uma maior quantidade de fotoportadores contribuam para a fotocorrente. Este fenômeno não é observado no dispositivo com um único dedo, onde a eficiência quântica é menor, pois há uma diminuição de $dx_{total(HR)}$, já que a região intrínseca não está totalmente depletada, fazendo com que este dispositivo sofra do fenômeno de recombinação e os pares elétron-lacuna gerados fora da região depletada, e que se originaram a uma distância maior do que um comprimento de difusão (L_{dif}) não possam alcançar a RDD antes da recombinação.

Já para os fotodiodos SR, a região intrínseca estará totalmente depletada desde que L_I seja no máximo 2,29µm (que é o valor de $dx_{(SR)}$), ou seja, para fotodiodos com L_I de 0,48 a 2,3µm. Desta forma, como estão totalmente depletados, o valor de dx_{total} é igual tanto para os fotodiodos SR quanto para HR, e por isso, eles apresentam a mesma eficiência quântica total.

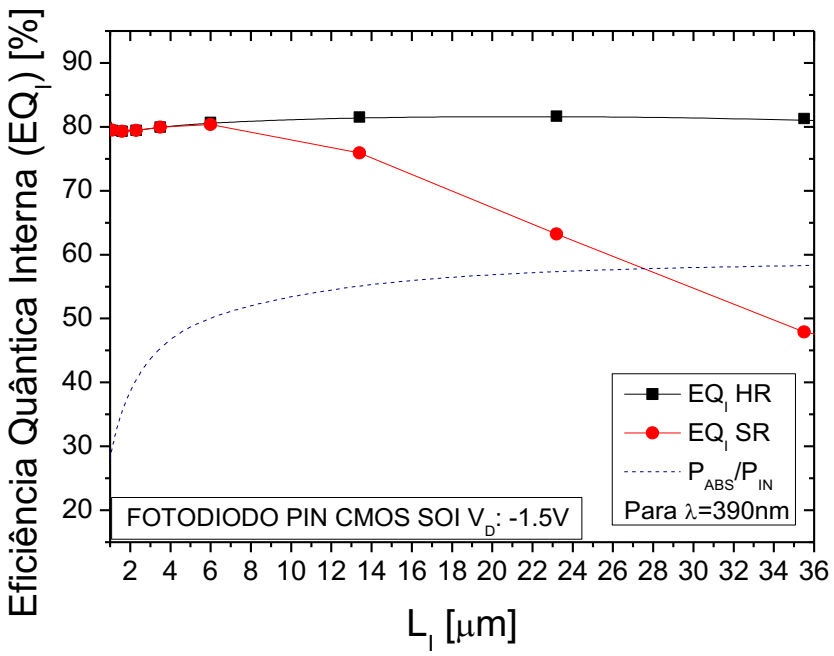
Porém os fotodiodos SR com L_I de 3,5µm e 6µm apresentam a mesma eficiência quântica total que os fotodiodos HR, mesmo tendo regiões de depleção total diferentes ($dx_{total(HR)} \neq dx_{total(SR)}$). Isso se deve ao fato de a região não depletada (L_I-$dx_{(SR)}$) destes dispositivos ser pequena o bastante para que a recombinação seja desprezível, ou seja, toda a região intrínseca pode ser considerada depletada e portanto, estes dois dispositivos apresentam eficiência quântica idêntica aos HR's. Outra conclusão obtida é de que o comprimento da região não depletada seja menor que o comprimento de difusão dos portadores, por isso, eles não sofrem recombinação.

Quando o comprimento da região intrínseca dos fotodiodos SR se torna igual ou maior a 13,4µm; a eficiência quântica cai devido ao fenômeno de recombinação que acontece fortemente na região não depletada. Portanto, através da Figura 76, o comprimento de difusão dos portadores minoritários para esta tecnologia (no caso, elétrons) pode ser estimado, pois entre o intervalo de L_I= 6 a 13,4µm, o fenômeno da recombinação começa a ser observado, por isso L_{dif} deve estar entre 3,71µm (6-2,29) e 11,11µm (13,4-2,29).

O comprimento de difusão dos elétrons também pode ser estimado através da Figura 77, a qual mostra a eficiência quântica interna dos fotodiodos PIN CMOS SOI para as duas concentrações de dopantes (HR e SR).

Conforme já foi visto no capítulo 4, a eficiência quântica interna é aquela que leva em consideração apenas as perdas por recombinação (KNITTL, 1976). Fato este que é claramente notado na Figura 77 visto que a partir de L_I= 6µm, a EQ_I dos dois dispositivos passa a ser diferente, caindo para o SR, fazendo com que sua eficiência quântica interna se reduza a praticamente 50% do seu valor inicial (de 80 para 47%). Devido a este fato é possível chegar à mesma conclusão sobre o comprimento de difusão dos elétrons.

Figura 77 – Eficiência quântica interna e PABS/PIN de um fotodiodo PIN CMOS SOI em função de LI. (simulado)



Fonte: Autor

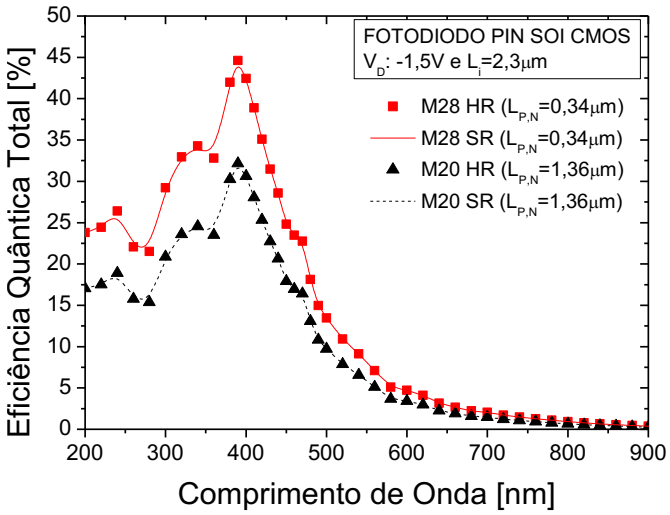
Ainda na Figura 77 é possível observar a relação entre a potência luminosa absorvida pelo dispositivo em relação a incidente, que é igual para ambos os dispositivos. Esta relação segue a proporção da relação L_{FOTO}/L_{TOTAL} contida na Tabela 7, ou seja, é maior para dispositivos com maiores comprimentos intrínsecos.

A fim de verificar a influência das regiões altamente dopadas P+ e N+, foram simulados fotodiodos em SOI com o comprimento da região intrínseca de 2,3µm, porém alterando o comprimento das regiões altamente dopadas de $L_{P,N}$=1,36µm para 0,34µm. Assim como foi feito para o dispositivo BULK. Como o comprimento total dos dispositivos foi mantido constante, o número de dedos passou de 20 para 28.

A Figura 78 mostra que a eficiência quântica total do fotodiodo com 28 dedos é maior que a eficiência para o dispositivo com 20 dedos. Isso se deve ao fato de eles terem diferentes valores de dx_{total}, sendo que, como tem maior número de dedos, o dispositivo com m=28 terá maior dx_{total}, por isso apresentará maior fotocorrente e, portanto, maior eficiência quântica (sendo $dx_{total\ (m=28)}$= 64,4µm e $dx_{total\ (m=20)}$= 46µm).

Além disso, a mudança da concentração de dopantes da região intrínseca não causa efeito na eficiência quântica pelo fato de tanto os dispositivos HR, quanto os SR apresentarem a região intrínseca totalmente depletada. Esta mesma curva já foi apresentada no item 8.1.2 para os dispositivos BULK na Figura 51, a qual apresentou diferente comportamento devido à presença da RDD vertical.

Figura 78 – EQ_T em função de λ para o fotodiodo PIN CMOS SOI com diferentes $L_{P,N.}$ (simulado)



Fonte: Autor

A Figura 79 mostra a corrente de escuro dos dispositivos CMOS SOI, que é a corrente de fuga quando o dispositivo está reversamente polarizado, mas não está exposto à luz. Conforme já foi dito, a corrente de escuro é devido à geração térmica de pares elétron- lacuna dentro da região de depleção, pois acima de T=0K, os elétrons podem adquirir energia suficiente para "saltar" para a banda de condução devido as vibrações da rede cristalina.

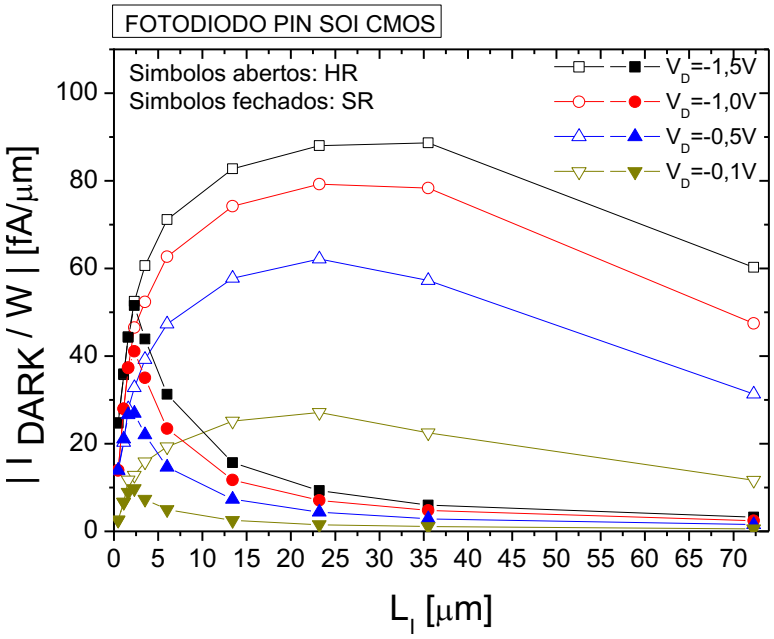
Como a corrente de escuro é proporcional a região de depleção, pois a contribuição das regiões fora da RDD é de fato várias ordens de magnitude menor (AFZALIAN, 2006), portanto I_{DARK} será proporcional ao comprimento total da região de depleção (dx_{total}). Os valores de dx_{total} foram apresentados na Tabela 9. Para os fotodiodos HR, o maior dx_{total} é

apresentado quando o L_I é de 35,5µm, sendo a maior sua corrente de escuro da Figura 79 (para V_D=-1,5V). No caso SR, o maior dx_{total} é apresentado quando o L_I é de 2,3µm, portanto a maior corrente de escuro é obtida com este valor de L_I.

Pode-se observar também que a corrente de escuro aumenta conforme a tensão de polarização se torna mais reversa, fazendo com que a RDD seja maior.

Os fotodiodos SR e HR com comprimentos de região intrínseca menores ou iguais a 2,3µm apresentam a mesma corrente de escuro, já que estão totalmente depletados e, portanto, o comprimento das suas regiões de depleção é igual.

Figura 79 – Corrente de escuro em função de L_I para os fotodiodos PIN CMOS SOI (simulado)



Fonte: Autor

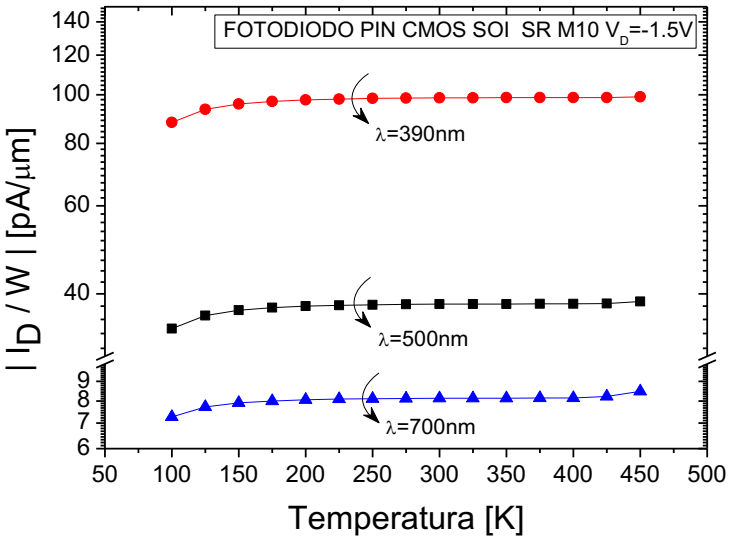
8.1.4 Efeito da variação da temperatura

Com o propósito de avaliar o desempenho dos fotodiodos em operação em uma grande faixa de temperatura, foram feitas simulações variando a temperatura de operação dos dispositivos de 100K a 400K, pois as aplicações mencionadas podem fazer com que a temperatura de operação varie dentro dessa faixa (AFZALIAN, 2006).

A corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI é mostrada na Figura 80 em função da temperatura de operação para três comprimentos de onda diferentes. É importante mencionar que, mesmo tendo a mesma potência óptica, os três comprimentos de onda geraram

fotocorrentes diferentes. Isso se deve ao fato da diferença de energia entre elas, como pode ser visto através da equação (28), onde a energia da radiação luminosa é maior para menores comprimentos de onda. Desta maneira, a fotocorrente gerada por λ=390nm foi a maior, pois apresenta a maior energia, e por λ=700nm foi a menor, pois apresenta a menor energia.

Figura 80 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI em função da temperatura para diferentes comprimentos de onda (simulado).



Fonte: Autor

Além disso, a espessura do filme de silício também influencia na absorção da luz incidente, fazendo com que haja diferentes quantidades de fotoportadores contribuintes para a fotocorrente. Na curva apresentada esta diferença é de aproximadamente 14 vezes entre o comprimento de onda de 390nm e 700nm.

Pode-se observar também que há uma redução da corrente dos dispositivos para temperaturas muito baixas, pois o fenômeno Band Gap Narrowing (BGN) se torna mais pronunciado com a redução da temperatura (LANYON e TUFT, 1979). Este fenômeno se dá através do aumento da largura da faixa proibida (E_g) em baixas temperaturas, fazendo com que seja necessária maior energia para geração do par elétron- lacuna, portanto, diminuindo a fotocorrente.

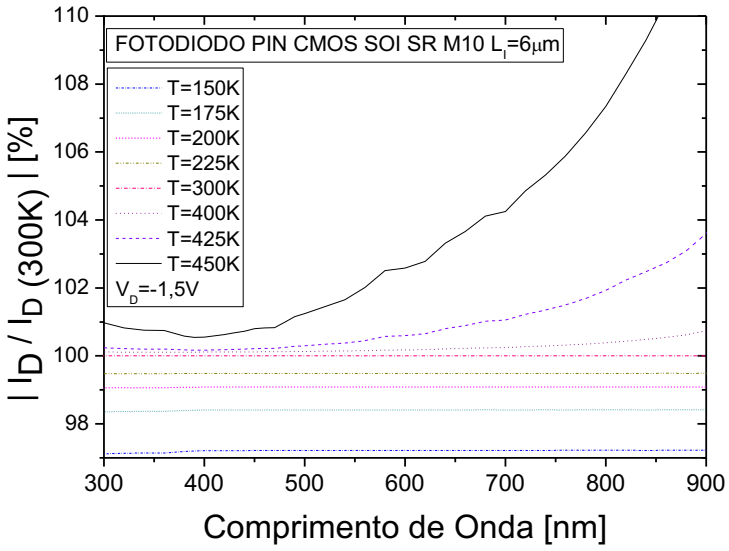
Para temperaturas altas, pode ser observado um aumento na corrente total do dispositivo principalmente devido ao aumento da geração térmica de elétrons (corrente de escuro).

A Figura 81 mostra a corrente do fotodiodo PIN CMOS SOI normalizada pelo seu valor em temperatura ambiente em função do comprimento de onda. Pode-se observar que para temperaturas maiores do que 400 Kelvin, o dispositivo torna-se mais sensível ao comprimento de onda da radiação incidente, ou seja, há um aumento mais evidenciado em relação a sua corrente em temperatura ambiente, para comprimentos de onda maiores.

Este fato está relacionado ao aumento da fração absorvida da luz para altos comprimentos de onda em altas temperaturas (AFZALIAN, 2006).

Já para baixas temperaturas, a redução da corrente do dispositivo devido ao BGN é praticamente constante em toda a faixa de λ simulada.

Figura 81 – Corrente total do fotodiodo normalizada pelo seu valor em temperatura ambiente em função de λ, para o fotodiodo PIN CMOS SOI em diferentes temperaturas. (simulado)



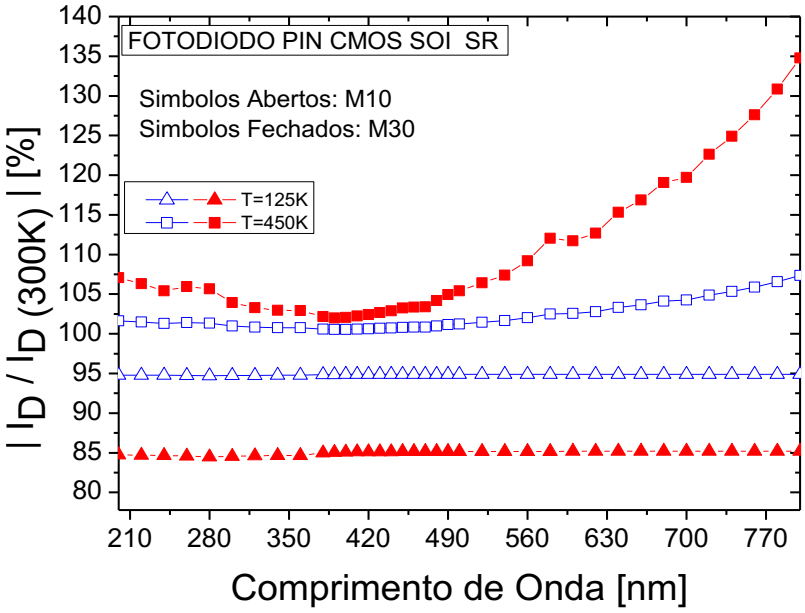
Fonte: Autor

A Figura 82 também mostra a corrente normalizada do fotodiodo PIN CMOS SOI em função de λ para duas configurações, a primeira com m=10 e a segunda com m=30.

Em baixas temperaturas (T=125K), a redução da corrente é mais pronunciada para o dispositivo com 30 dedos, pois o efeito do aumento da largura da faixa proibida (BGN) é mais pronunciado nas regiões de alta concentração de dopantes, ou seja, nas regiões P+ e N+ (anodo e catodo). O dispositivo com 30 dedos possui uma quantidade de regiões N+ e P+ maior que o dispositivo com dez dedos, fazendo com que o BGN seja mais pronunciado, o que causa uma redução mais acentuada da corrente em relação à temperatura ambiente.

A fim de demonstrar a alteração de E_g, a largura da faixa proibida em função da dimensão x do dispositivo (largura do dispositivo) foi plotada na Figura 83. Para temperatura de 100K, a largura da faixa proibida é maior nas três regiões do fotodiodo (N+/P-/P+) em relação à 300K. Além disso, a maior diferença em E_g é obtida para a maior concentração, que no caso, é a região N+ (diferença de 4,1% de 100 para 300K).

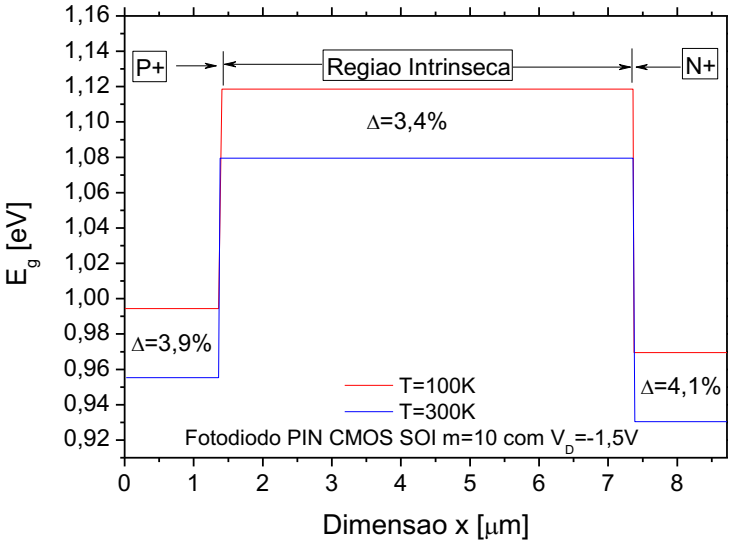
Figura 82 – Corrente total do fotodiodo normalizada pelo seu valor em temperatura ambiente em função de λ, para o fotodiodo PIN CMOS SOI com m=10 e m=30 (simulado)



Fonte: Autor

Para temperatura de 450K, o maior aumento de corrente em relação à 300K foi obtido para o dispositivo com 30 dedos, conforme pode ser observado na Figura 82. Este fato é devido ao maior comprimento da região de depleção total (dx_{total}) obtido neste dispositivo, fazendo com que haja maior geração térmica, o que aumenta a corrente de escuro, consequentemente aumentando a corrente total do dispositivo.

Figura 83 – Largura da faixa proibida em função de x para duas temperaturas no dispositivo PIN CMOS SOI SR m10. (simulado)



Fonte: Autor

8.1.5 Resultados experimentais do fotodiodo PIN SOI em tecnologia de 2µm.

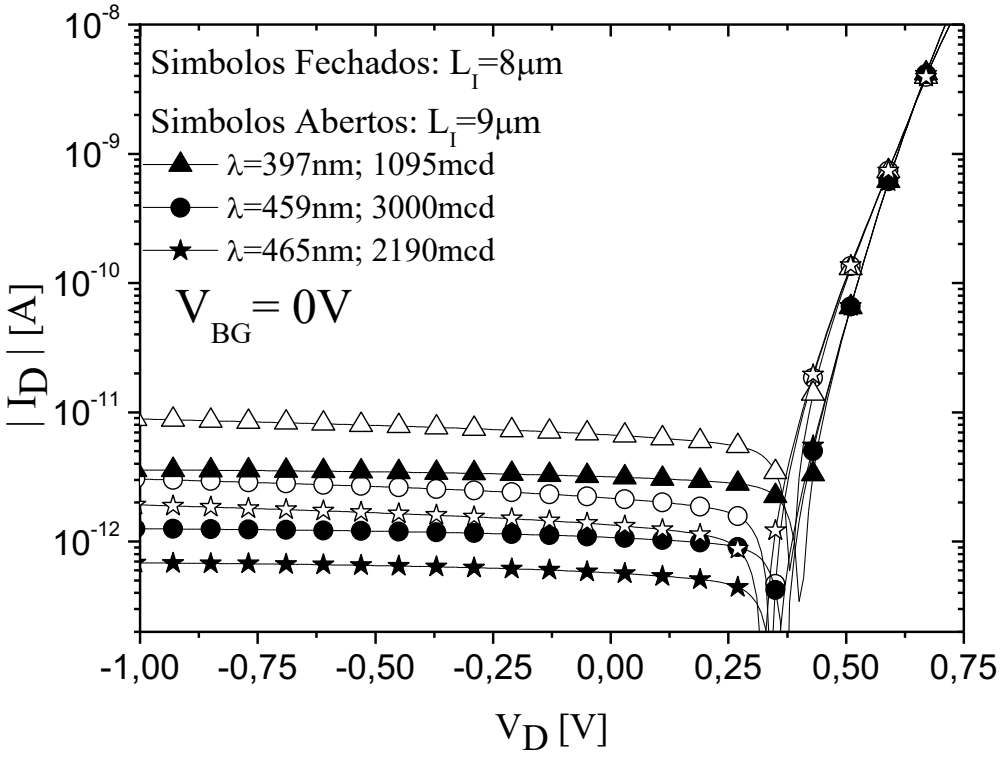
Tendo em vista todos os resultados já discutidos através de simulação nos itens anteriores, este capítulo será dedicado à análise dos resultados experimentais do fotodiodo multifinger fabricado em tecnologia de 2µm cujos parâmetros já foram mostrados na Tabela 5.

Estes dispositivos possuem um terminal chamado de *back-gate*, o qual permite polarizar o substrato do dispositivo localizado abaixo do BOX. A variação da polarização deste terminal, também chamado de porta traseira, modifica a disponibilidade de portadores no filme de silício (AFZALIAN, 2006). Atualmente, a comunidade científica têm dado bastante importância à essa análise, inclusive com desenvolvimento de modelos matemáticos incluindo nas equações de corrente dos diodos, os efeitos da polarização do *back-gate*, como mostrado em 2017 por Andrei Schmidt em (ANDREI, STEFAN, *et al.*, 2017). Assim sendo, neste trabalho foi analisado o efeito da polarização do terminal de porta-traseira a fim de obter a maior eficiência quântica dos dispositivos.

A corrente total (I_D), em função da tensão aplicada ânodo (V_D), é apresentada na Figura 84 sob a incidência de diferentes comprimentos de onda e intensidades ópticas para dois dispositivos com L_I=8µm e L_I=9µm com V_{BG}=0V. Embora os três comprimentos de onda tenham diferentes intensidades luminosas, vê-se claramente que, quanto maior o

comprimento de onda, mais baixa é a corrente fotogerada, devido à energia do fóton ser menor (SZE, 1981). Além disso, a corrente reversa mostrou ser maior no diodo com L_I=9μm uma vez que tem maior área fotossensível, na verdade, 4,28 vezes maior do que o diodo com L_I=8μm.

Figura 84 – Corrente total em função de V_D para dois dispositivos com diferentes comprimentos de onda em T=300K. (experimental)



Fonte: Autor

Como foi dito anteriormente, a influência da tensão de *back-gate* (V_{BG}) é muito importante no desempenho dos fotodiodos, uma vez que altera o modo de operação (inversão, acumulação ou deplecção) do filme de silício (AFZALIAN, 2006). Na Figura 85 (A), a corrente do fotodiodo é apresentada em função de V_{BG}, quando iluminado por luz UV de λ=397nm e potência óptica incidente (P_{IN}) de 0,55μW à temperatura ambiente. Quando o filme é polarizado em regime de acumulação (V_{BG} <-3V), há uma diminuição da corrente, relacionada com a diminuição da mobilidade dos elétrons e o aumento da recombinação, devido a uma maior concentração de lacunas. Uma vez que a região intrínseca é polarizada em regime de depleção lateral (aumentando V_{BG}), a corrente aumenta abruptamente, o que significa que a recombinação de portadores é menor. Este comportamento, que dá origem a um pico no nível de corrente no modo de depleção tem sido extensivamente estudado para

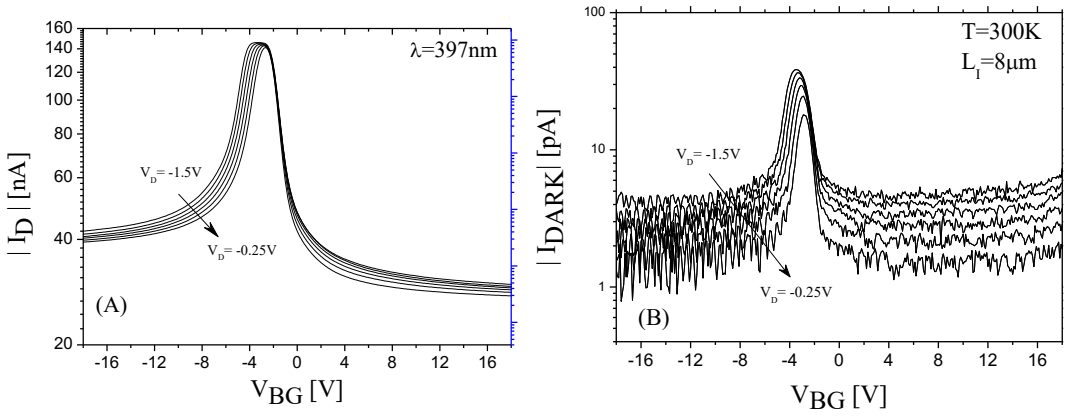
diodos com terminal de porta, ou *gated diodes* em (RUDENKO, RUDENKO e AL., 2004). Além disso, para V_{BG}>0V, polarizando o filme de silício em inversão, o comportamento da camada intrínseca muda, passando a agir como N-, sendo assim, há um perfil da camada de silício igual a P+/N-/N+ e os portadores responsáveis pela deriva são os minoritários, no caso, as lacunas, e não mais os elétrons (AFAZALIAN; FLANDRE, 2007). Por isso a corrente em inversão é mais baixa que a de acumulação, pois a mobilidade dos elétrons é maior que a das lacunas (SZE, 1981).

Também é possível ver na Figura 85 (A), que a tensão que produz acumulação no filme de silício é alterada conforme a tensão de anodo diminui.

A corrente de escuro mostrada na Figura 85 (B) é cerca de três ordens de grandeza menor do que a fotocorrente e é principalmente devida à corrente de difusão, a qual é composta por portadores majoritários, e essa é a razão pela qual a mudança de V_{BG} produz o resultado oposto em comparação com a fotocorrente (no regime de inversão a corrente é mais alta do que na acumulação). Outra observação é que a densidade de carga fixa na interface Si-SiO_2 é provavelmente a razão para o deslocamento da curva em V_{BG} = 0V.

Como mencionado anteriormente, em algumas aplicações, os fotodiodos são expostos a altas temperaturas, que afetam o seu desempenho, assim como a polarização de *back-gate*. Desta forma, a Figura 86 apresenta a corrente de escuro e a fotocorrente do diodo com L_I= 8µm. Ao comparar a corrente de escuro com a fotocorrente, pode-se observar que o aumento da temperatura aumenta a corrente de escuro (I_{DARK}) em várias ordens de magnitude, como resultado do aumento da geração térmica de elétrons (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002). Por outro lado, além de apresentar valores mais elevados, a corrente reversa do fotodiodo sob iluminação não é tão fortemente dependente da temperatura, e o aumento de I_D com temperaturas mais elevadas está relacionado com a dependência do tempo de vida do portador com a temperatura, tal como explicado em (SOUZA, BULTEEL, *et al.*, 2011).

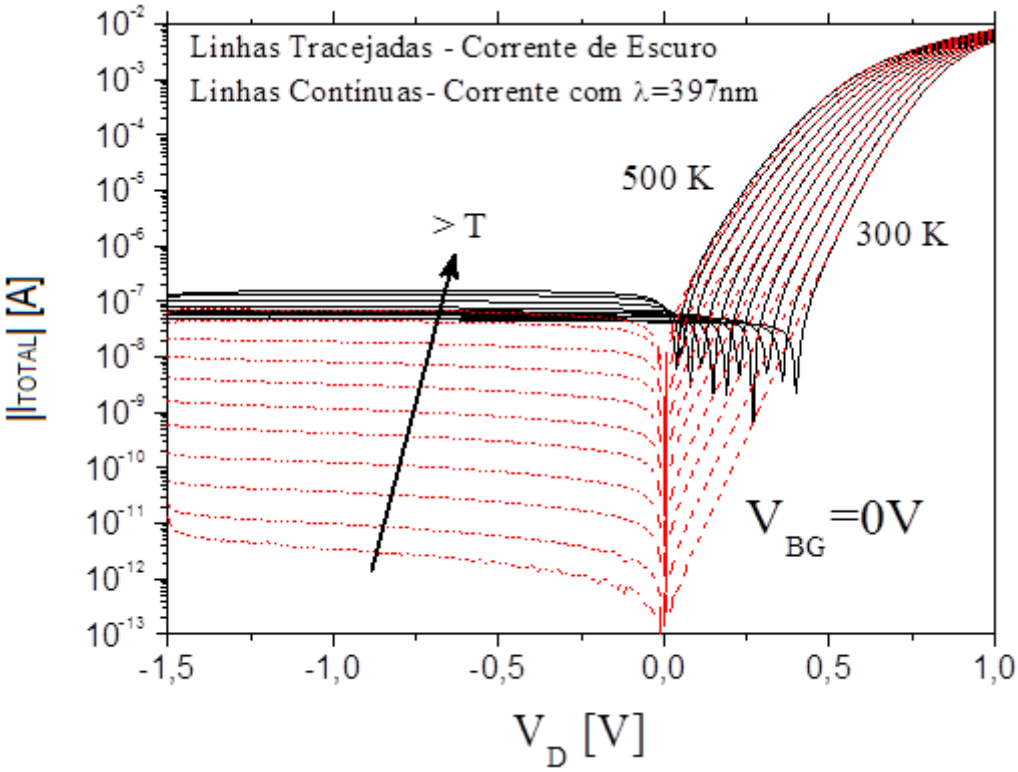
Figura 85 – Corrente total em função de V_D para: A) Dispositivo iluminado com λ=397nm e B) Dispositivo sem iluminação em T=300K. (experimental)



(A) (B)

Fonte: Autor

Figura 86 – Corrente de escuro e fotocorrente sob iluminação UV, medida em diferentes temperaturas, com λ=397nm, com V_{BG}=0V para L_I=8μm. (experimental)



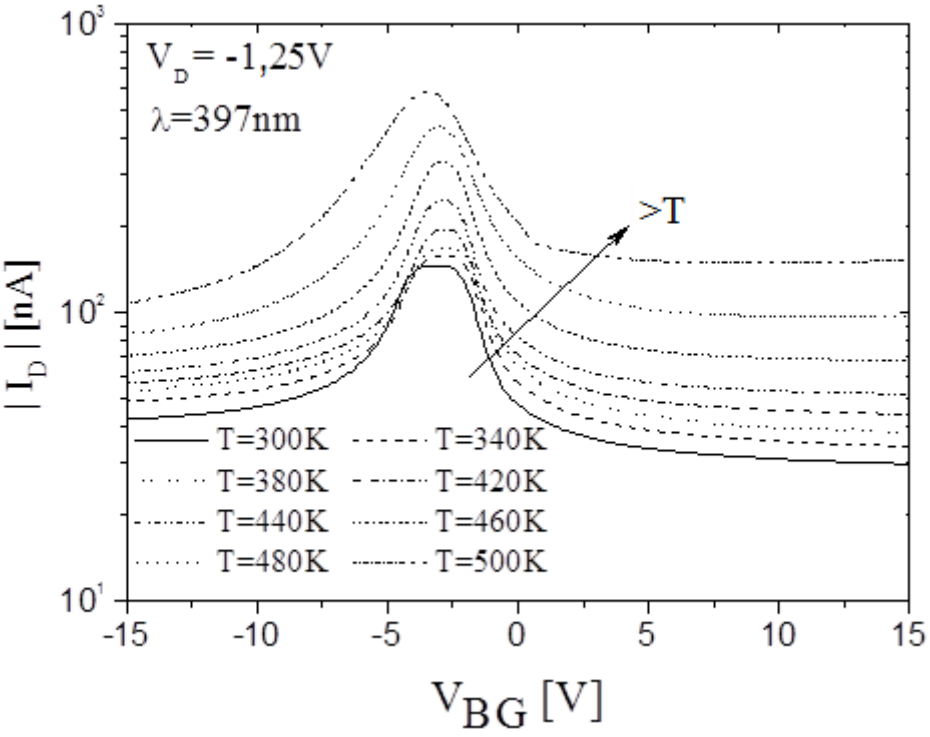
Fonte: Autor

A Figura 87 mostra a corrente do dispositivo em função da polarização de *back-gate* para diferentes temperaturas, de modo a permitir a análise combinada de ambos os efeitos da variação de temperatura e V_{BG}. Mais uma vez os três modos de operação distintos estão presentes independentemente da temperatura. Além disso, é possível verificar que a corrente

de inversão é menor do que a de acumulação para temperaturas inferiores a 460 K. No entanto, para temperaturas mais elevadas (T> 460K), a corrente de inversão torna-se maior do que a de acumulação. Este fato é explicado da seguinte forma: a corrente total do dispositivo pode ser aproximada pela soma da corrente de difusão e a de geração (corrente deriva) (SZE, 1981). Para temperaturas suficientemente elevadas (T> 460K para o dispositivo estudado), a corrente de difusão terá uma influência forte, uma vez que há um grande aumento da concentração intrínseca (ni). Além disso, a componente de difusão é constituída por portadores majoritários, que, em inversão, são elétrons, que têm mobilidade mais elevada, resultando em uma maior corrente.

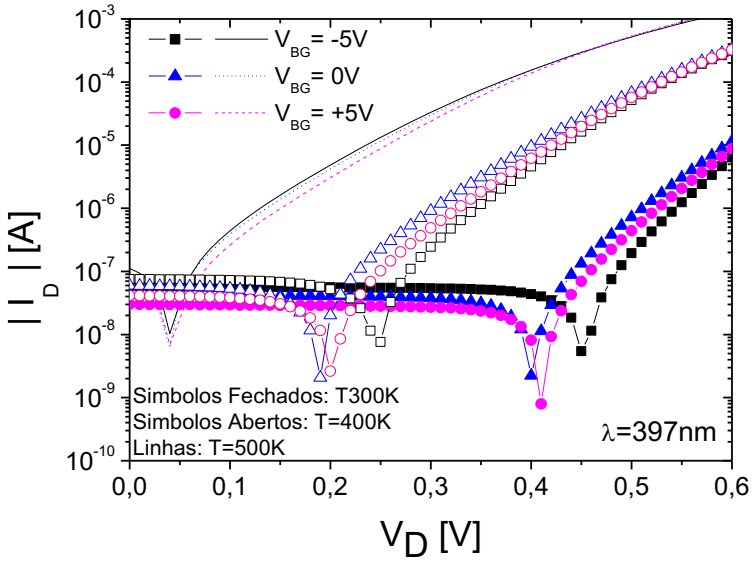
A fim de mostrar mais claramente a variação da concentração intrínseca (ni) com a temperatura, a corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI, em função de V_D para diferentes tensões de porta traseira e diferentes temperaturas, é mostrada na Figura 88. Conforme a temperatura é aumentada, a corrente é maior, devido principalmente ao já mencionado fato do aumento da geração térmica. Entretanto, a principal característica deste gráfico é que a temperatura é responsável pela variação do potencial de junção, pois o valor de n_i é alterado. Desta forma, quanto maior a temperatura, maior é o valor de n_i, resultando em V_{BI} menores.

Figura 87 – Corrente total do fotodiodo PIN SOI sob iluminação UV em função de V_{BG}, medida em diferentes temperaturas, com λ=397nm, para L_I=8μm. (experimental)



Fonte: Autor

Figura 88 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI iluminado com λ=397nm em função de V_D (experimental).

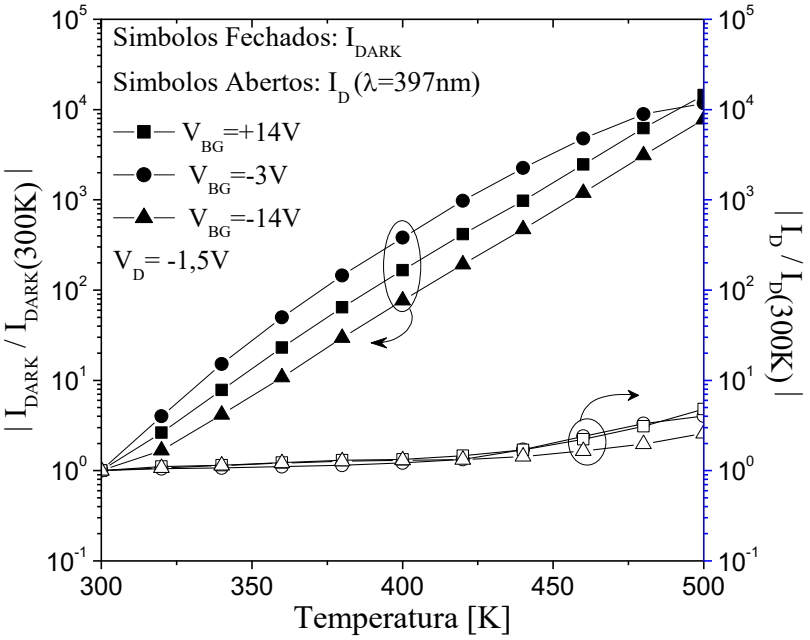


Fonte: Autor

Além da temperatura, a tensão de polarização de porta traseira modifica o potencial de junção também, como pode ser observado na mesma Figura 88. Tomando a situação com V_{BG}=0V como referência, há um V_{BI} maior para V_{BG}=-5V, devido ao aumento da concentração de lacunas (já que V_{BI} é dependente de N_A). Similarmente para V_{BG}=+5V, a concentração de elétrons é maior, por isso também há um aumento em V_{BI}, já que N_D é maior.

De acordo com os resultados observados na Figura 89, conforme a temperatura é diminuída, a corrente de escuro se torna menos sensível a esta redução, principalmente abaixo de 400K, devido à menor geração térmica de portadores. Adicionalmente, a geração térmica é mais pronunciada dentro da região de depleção, onde há uma menor taxa de recombinação de portadores graças à presença de cargas fixas (SZE, 1981). Como resultado, a corrente de escuro tem seu valor máximo, para V_{BG}=-2V, quando o filme de silício está em depleção lateral. Para a temperatura de 500K, a corrente de difusão predomina sobre a corrente de deriva, conforme já foi mencionado. Já a corrente total tem uma variação máxima de até 5 vezes para T=500K, enquanto a corrente de escuro varia quase 16000 em relação ao seu valor em temperatura ambiente.

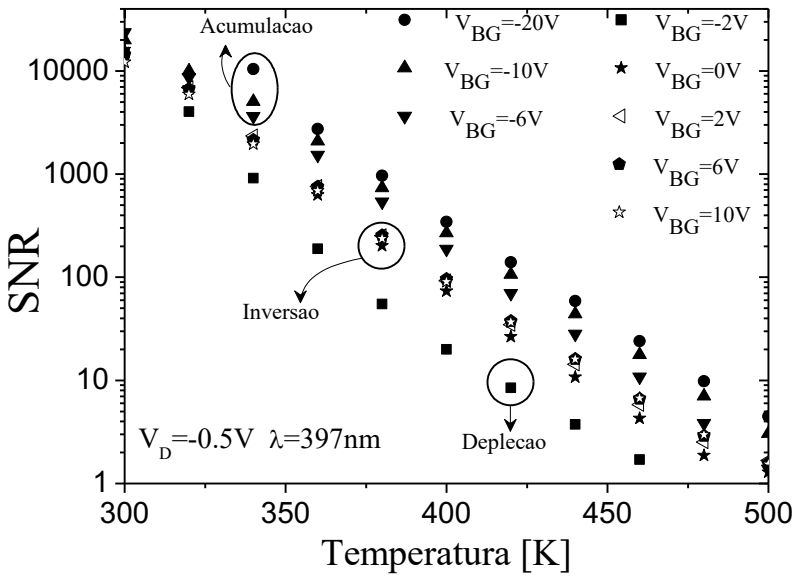
Figura 89 – Corrente de escuro e corrente total normalizada pelo seu valor em 300K em função da temperatura. (experimental)



Fonte: Autor

A Figura 90 apresenta a relação sinal ruído (também conhecida como IDR-*illuminated to dark ratio*) em função da temperatura, para diferentes valores V_{BG} e pode-se observar que o maior IDR é obtido para temperaturas mais baixas, principalmente devido à diminuição da corrente de escuro com a menor geração térmica de portadores.

Figura 90 – Relação sinal-ruído em função da temperatura para várias tensões de *back-gate*. (experimental)

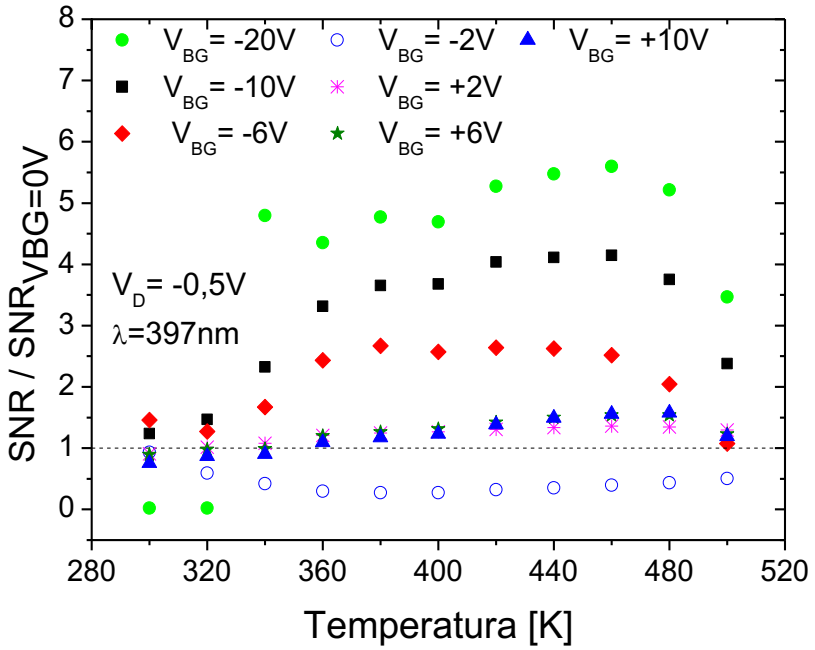


Fonte: Autor

Além disso, no que diz respeito à tensão de *back-gate*, o IDR aumenta, conforme V_{BG} é mais negativo, de tal modo que o filme de silício está polarizado em acumulação. No entanto, o fotodiodo mostra um IDR inferior com V_{BG} de -2V, no modo de operação de depleção. Na inversão (V_{BG} positivo), o IDR praticamente não varia com a alteração de V_{BG} .

A melhoria da relação sinal-ruído é muito importante para os fotodiodos, uma vez que aumenta a sua sensibilidade para o sinal óptico incidente, de modo que a corrente fotogerada é claramente distinguível da corrente de escuro. A fim de melhorar a observação desta figura de mérito, a Figura 91 mostra a relação sinal-ruído do fotodiodo PIN SOI normalizada em função do seu valor para V_{BG}=0V. Pode ser observado que a maior SNR é obtida com valores de polarização de porta traseira mais negativas (V_{BG}=-20V), de tal forma que o filme de silício estará em acumulação. Entretanto, para baixas temperaturas, a SNR normalizada tende a 1, o que significa que sua variação é menor para temperaturas baixas.

Figura 91 – Relação sinal-ruído normalizada pelo seu valor com V_{BG}=0V, em função da temperatura para V_D=-0,5V (experimental)

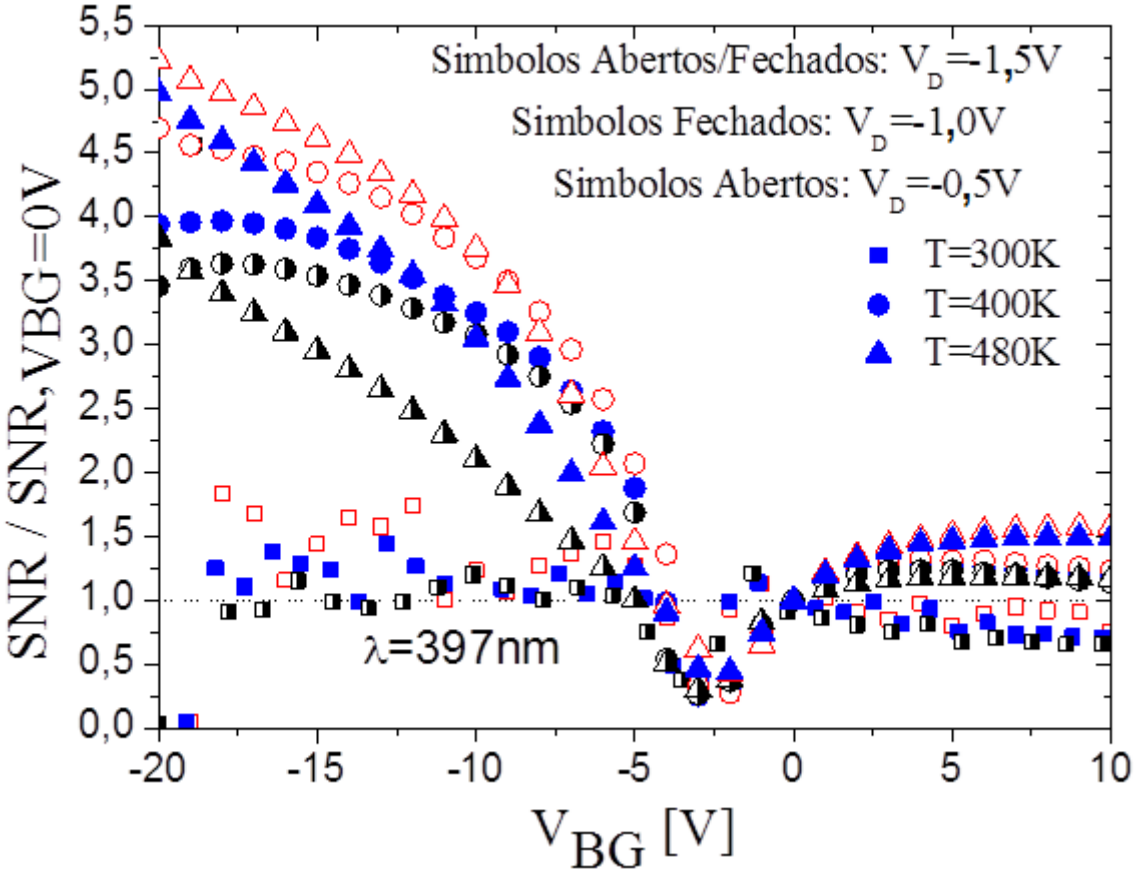


Fonte: Autor

A Figura 92 mostra a relação sinal-ruído normalizada pelo seu valor com V_{BG} de 0V, em três temperaturas de operação diferentes e tensão de anodo. Esta curva mostra que, ao diminuir a tensão de *back-gate* para -20 V, a proporção de SNR torna-se 5 vezes maior que a de V_{BG} = 0V. No entanto, para V_{BG} positivo (modo de operação de inversão), a proporção de

SNR é menos sensível à variação de temperatura e V_{BG}. No que diz respeito à tensão de anodo, a relação sinal-ruído é aumentada conforme V_D é elevado, sendo que este fato está relacionado com a diminuição da corrente de escuro. Finalmente, é importante verificar que pode-se alcançar a maior relação sinal-ruído normalizada (5,2) para T = 480K com V_D de -0,5V no modo de acumulação.

Figura 92 – Relação sinal-ruído normalizada pelo seu valor com V_{BG}=0V, em função de V_{BG} para três temperaturas de operação (experimental)



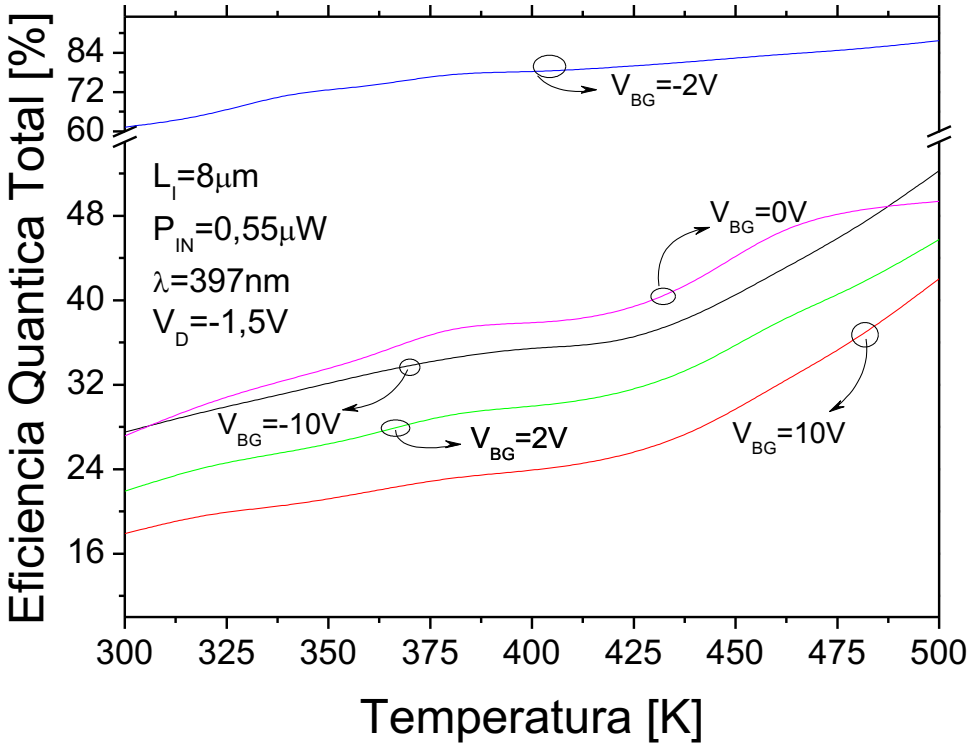
Fonte: Autor

A eficiência quântica total (EQ_T) em função da temperatura é apresentada na Figura 93 para diferentes tensões de porta traseira. Conforme já foi dito anteriormente, a EQ_T é definida como a relação entre a corrente fotogerada (que é a corrente total do diodo menos a corrente de escuro) e a corrente máxima que seria gerada se não houvesse nenhum tipo de perda. Esta eficiência aumenta com a elevação da temperatura, conforme a Figura 93, independentemente dos valores de V_{BG}. Com efeito, a maior EQ_T de 86% foi obtida no modo de operação de depleção (V_{BG} =-2V) e para T = 500K. Isto é devido ao aumento da fotocorrente gerada para temperaturas mais elevadas. Este comportamento sugere que há um aumento na quantidade de

potência absorvida em altas temperaturas, o qual pode estar relacionado quer a uma redução do comprimento de absorção, ou a uma espécie de avalanche ou multiplicação de portadores como explicado em (AFZALIAN, 2006).

A fim de tornar esta questão mais clara e quantitativa, a Tabela 10 mostra os valores comparativos de fotocorrente, corrente de escuro, relação sinal-ruído e eficiência quântica normalizada pelo seu valor com T = 300K para P_{IN} de 0,55μW. Pode ser visto que o aumento na proporção da eficiência no modo de inversão (V_{BG} = + 20V) está relacionada especialmente com o aumento da fotocorrente. Por outro lado, o aumento em relação SNR no modo de acumulação (V_{BG} = -20V) está relacionado principalmente com a diminuição da corrente de escuro.

Figura 93 – Eficiência quântica total em função da temperatura para diferentes valores de V_{BG} para o dispositivo com L_I=8μm; V_D=-1,5V, λ=397nm e P_{IN}=0,55μW. (experimental)



Fonte: Autor

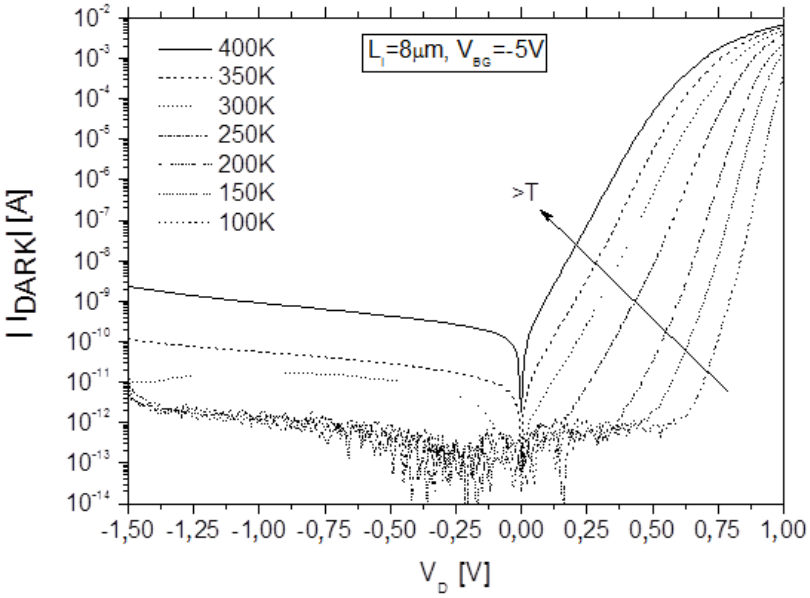
Tabela 10 – Razão de (SNR_{500K}/SNR_{300K}); ($EQ_{T\ 500K}$/ $EQ_{T\ 300K}$); ($I_{PH\ 500K}/I_{PH\ 300K}$); ($I_{DARK\ 500K}/I_{DARK\ 300K}$), para L_I=8μm, V_D=-1,5V, λ=397nm e P_{IN}=0,55μW

Parâmetro	**V_{BG}= -20V**	**V_{BG}=0V**	**V_{BG}=+2V**	**V_{BG}= +20V**
SNR_{500K}/SNR_{300K}	12×10^{-3}	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,074 \times 10^{-3}$	$0,27 \times 10^{-3}$
$EQ_{T\ 500K}$/ $EQ_{T\ 300K}$	1,6	1,81	1,43	3,64
$I_{FG\ 500K}/I_{FG\ 300K}$	2,11	3,55	1,7	5,18
$I_{DARK\ 500K}/I_{DARK\ 300K}$	145	17410	18050	13371

Fonte: Autor

A análise da operação dos fotodetectores em baixas temperaturas também é importante, já que há uma série de efeitos a serem considerados, conforme já discutido no item 3.6. Desta forma, foram feitas medidas experimentais em temperaturas criogênicas a fim de verificar a alteração no comportamento dos diodos. A corrente de escuro em função da tensão de anodo (V_D) é apresentada na Figura 94 para uma polarização de *back-gate* de 5V. Embora a diminuição da temperatura diminua a corrente de escuro (I_{DARK}), devido à redução da geração térmica de portadores (STREEMAN e BANERJEE, 2000), ela também aumenta o potencial interno de junção (V_{BI}) (SZE, 1981), de modo que a polarização direta tenha início com tensões maiores.

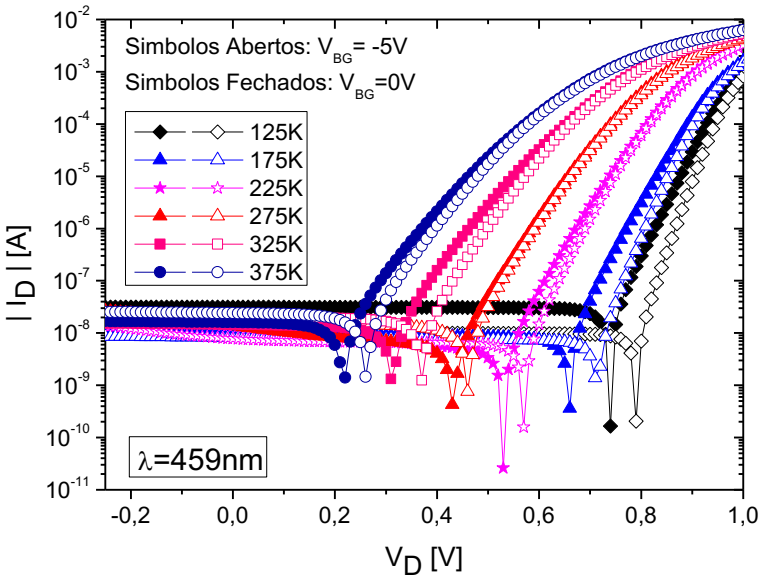
Figura 94 – Corrente de escuro em função da tensão de anodo medida em diferentes temperaturas para V_{BG}=-5V. (experimental)



Fonte: Autor

Além da temperatura, a tensão de porta traseira também modifica o potencial interno de junção, como pode ser visto na Figura 95, onde o fotodiodo foi iluminado com um comprimento de onda de 459 nm para dois valores de V_{BG} diferentes. Para V_{BG} de -5V, a concentração de lacunas no filme de silício aumenta, resultando em um V_{BI} maior.

Figura 95 – Corrente fotogerada em função da tensão de anodo medida em diferentes temperaturas para dois valores de V_{BG}=-5V. (experimental)

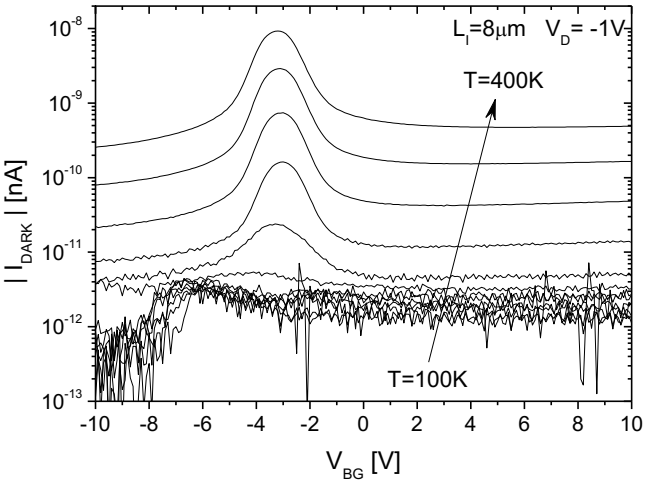


Fonte: Autor

A Figura 96 mostra a corrente de escuro em função de V_{BG} para o dispositivo com comprimento intrínseca de 8μm e V_D=-1V. Uma vez mais, os diferentes modos de funcionamento são claramente vistos e a geração térmica de portadores é a responsável pelo aumento no nível da corrente em temperaturas mais elevadas. Uma importante observação pode ser feita para temperaturas inferiores a 150 K: a relação entre as correntes de inversão e acumulação é mais elevada em comparação com a relação fornecida para temperaturas mais altas. Este comportamento é causado pelo aumento considerável no tamanho da região de depleção devido à ionização parcial, o que leva à redução da concentração intrínseca (ni) para temperaturas mais baixas e também o consequente aumento no potencial de Fermi (φ_F).

Como pode ser visto na Figura 97, que mostra a corrente do fotodiodo sob iluminação de 397 nm de comprimento de onda em função de V_{BG}, medidos a diferentes temperaturas, há uma variação insignificante no nível de corrente comparando o modo de depleção e inversão a T=100K. A maior região de depleção faz com que o dispositivo provavelmente haja como totalmente depletado em 100K, o que resulta em um nível de corrente quase constante (PAVANELLO, MARTINO, *et al.*, 2005). Este resultado deve-se à redução considerável do nível de concentração intrínseca (ni) e ao congelamento dos portadores.

Figura 96 – Corrente de escuro em função da tensão de porta traseira medida em diferentes temperaturas para V_D=-1V. (experimental)

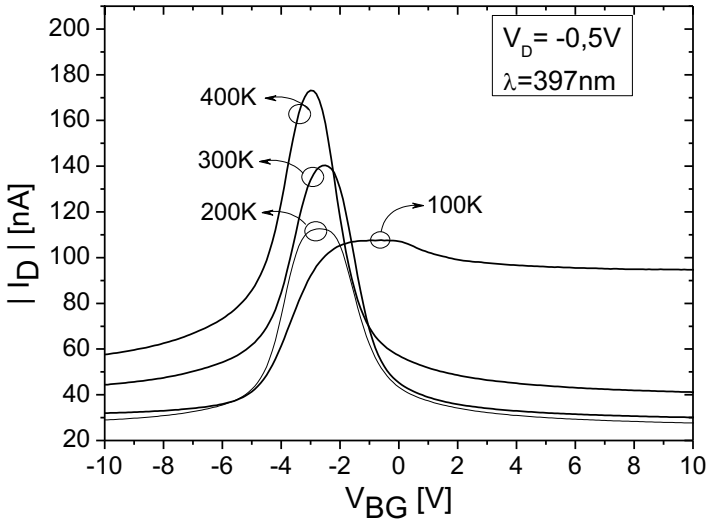


Fonte: Autor

A fim de tornar este problema mais evidente e quantitativo, a tabela 11 mostra a razão da fotocorrente produzida por V_{BG}=+10V (inversão) em relação ao V_{BG}=10V (acumulação), bem como a corrente de escuro. Pode ser visto que, quando a temperatura é reduzida de 400 K a 100 K, a relação da corrente de escuro diminui de 2,12 para 1,18, enquanto que a razão da

fotocorrente sobe de 0,66 a 2,96 devido ao alargamento da região de depleção. Estes resultados são muito importantes, uma vez que são os parâmetros básicos quando para se obter a eficiência quântica e a relação sinal-ruído do dispositivo (NOVO, 2014).

Figura 97 – Corrente de escuro em função da tensão de porta traseira medida em diferentes temperaturas para V_D=-1V. (experimental)



Fonte: Autor

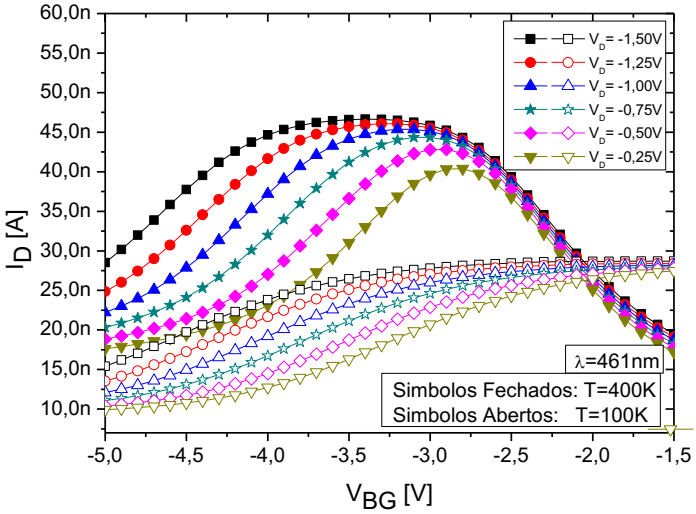
Tabela 11 – Razão da fotocorrente e corrente de escuro para V_{BG}=+10V e V_{BG}=-10V

Temperatura [Kelvin]	$I_{VBG=+10V}/I_{VBG=-10V}$	
	I_{PH}	I_{Dark}
100	2,96	1,18
200	0,95	1,23
300	0,67	1,27
400	0,66	2,12

Fonte: Autor

A Figura 98 mostra a corrente do fotodiodo sob iluminação para diversos valores de V_D. A diminuição de V_D dificulta a acumulação, requerendo um V_{BG} mais negativo. Vale a pena mencionar que o mesmo comportamento foi obtido para toda a gama de temperaturas de 100K a 400K.

Figura 98 – Corrente fotogerada em função da tensão de porta traseira medida em duas temperaturas para diferentes valores de $V_{D.}$ (experimental)

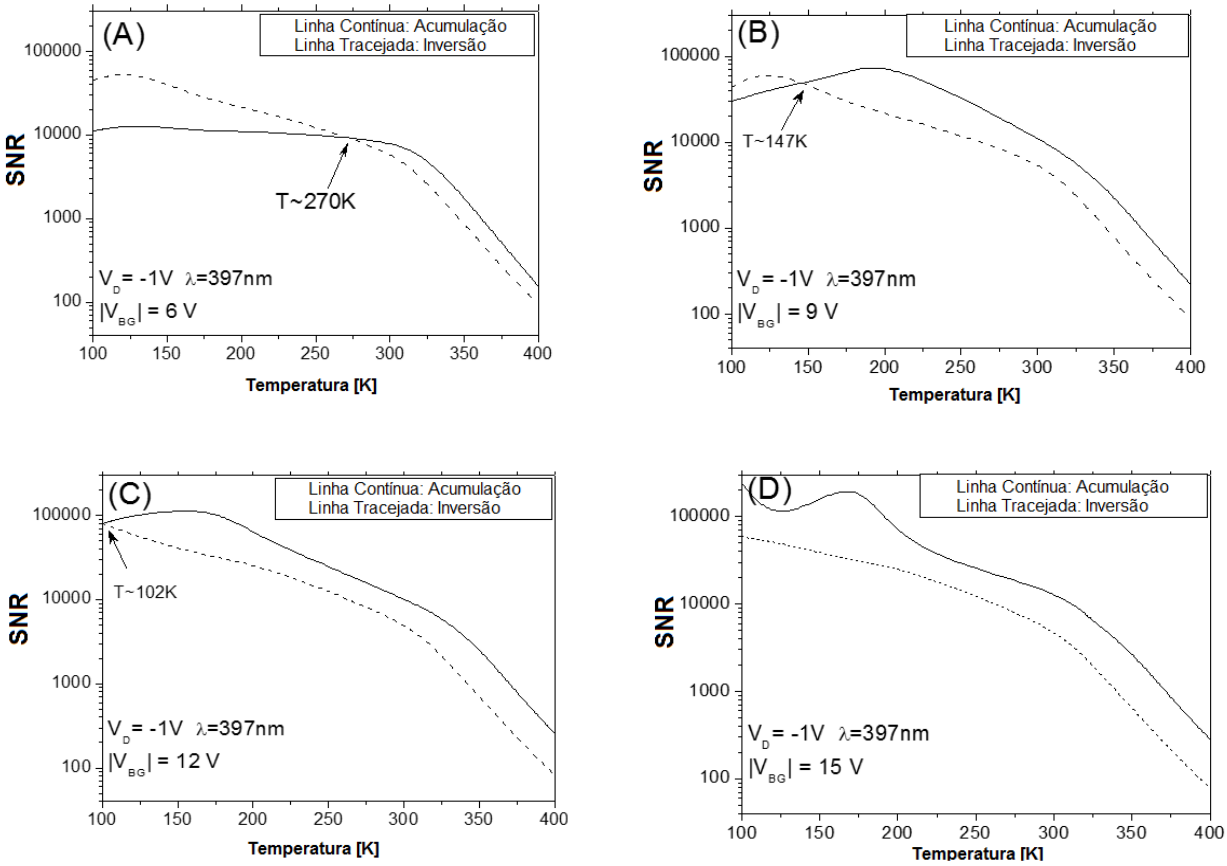


Fonte: Autor

A Figura 99 apresenta a SNR em função da temperatura, para diferentes valores V_{BG} e λ=397nm. Pode-se observar que a maior SNR é obtida para temperaturas mais baixas, de forma independente de V_{BG}, principalmente devido à diminuição da corrente de escuro por causa da redução da geração térmica de portadores. Em geral, quanto ao modo de operação, dois comportamentos diferentes ocorreram, um para temperaturas mais baixas, que mostra uma relação sinal-ruído maior no modo de inversão e o outro para temperaturas mais elevadas, que mostra mais elevada SNR no modo de acumulação.

As curvas mostram um ponto de transição, em que existe uma mudança na tendência. Como pode ser visto na Figura 99 (A), para temperaturas inferiores a 270K, a maior SNR foi obtida no modo de inversão (V_{BG} = + 6V), enquanto que para temperaturas superiores a 270K, a SNR mais elevada foi obtida no modo de acumulação (V_{BG} = -6V). As Figuras 9 (B) e (C) mostram o mesmo comportamento, entretanto a transição ocorreu aproximadamente com T=147K e T=102K, respectivamente. Para $|V_{BG}|$=15V, o modo de acumulação apresentou maior SNR em toda a gama de temperatura como mostrado na Figura 9 (D).

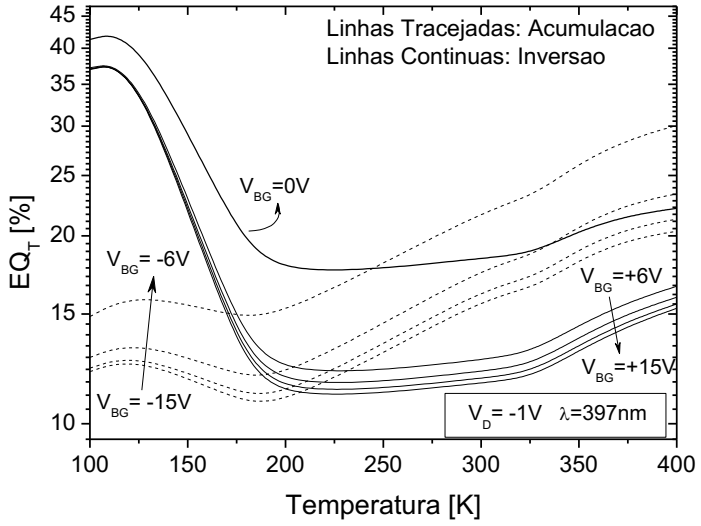
Figura 99 – Relação sinal-ruído em função da temperatura com λ=397nm, medida para: A) $|V_{BG}|$=6V; B) $|V_{BG}|$=9V; C) $|V_{BG}|$=12V e D) $|V_{BG}|$=15V (experimental)



Fonte: Autor

Como pode ser visto na Figura 100, para temperaturas acima de 200 K, a elevação da eficiência quântica com a temperatura é mais elevada, independentemente dos valores V_{BG}, principalmente devido ao aumento da fotocorrente, relacionado com a dependência da profundidade de penetração com a temperatura (GALETI, MARTINO, *et al.*, 2008), conforme já foi abordado neste trabalho através da Figura 93. Além disso, a redução da eficiência em temperaturas mais baixas, no modo de acumulação, pode ser associada ao efeito estreitamento do *bandgap* (BGN), uma vez que este efeito se torna mais pronunciado com a redução da temperatura (LANYON e TUFT, 1979). Por outro lado, para temperaturas inferiores a 200K e valores positivos V_{BG}, pode ser observado um aumento em EQ_T principalmente devido ao alargamento na região de depleção e do aumento da mobilidade (PAVANELLO, MARTINO, *et al.*, 2005).

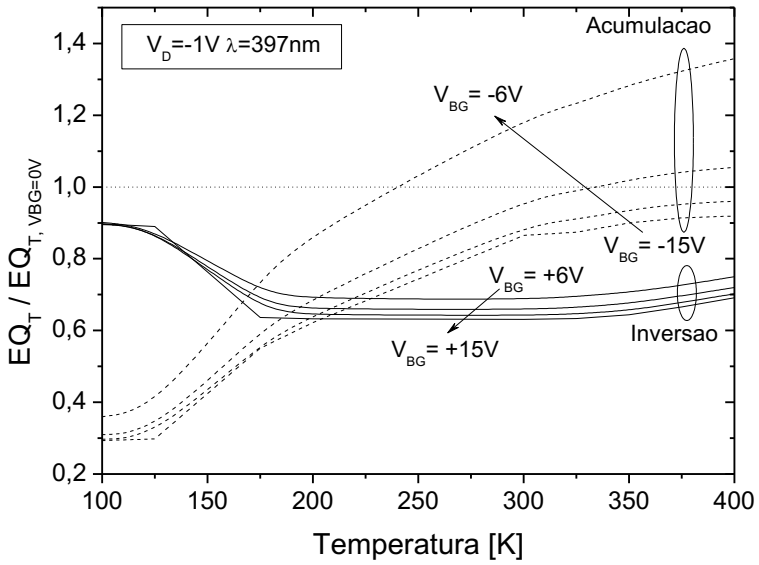
Figura 100 – Eficiência quântica total em função da temperatura para diferentes modos de operação. (experimental)



Fonte: Autor

Na Figura 101 é apresentada a eficiência quântica total normalizada por V_{BG} de 0V, medido com diferentes tensões de porta traseira. No modo de acumulação existe uma forte variação de EQ_T com a temperatura. Por essa razão, a razão entre EQ_T polarizado com um determinado V_{BG} e EQ_T com V_{BG} = 0V pode variar de 0,3 a 100K até 1,35 a 400K de temperatura.

Figura 101 – Eficiência quântica total em função da temperatura para diferentes modos de operação. (experimental)



Fonte: Autor

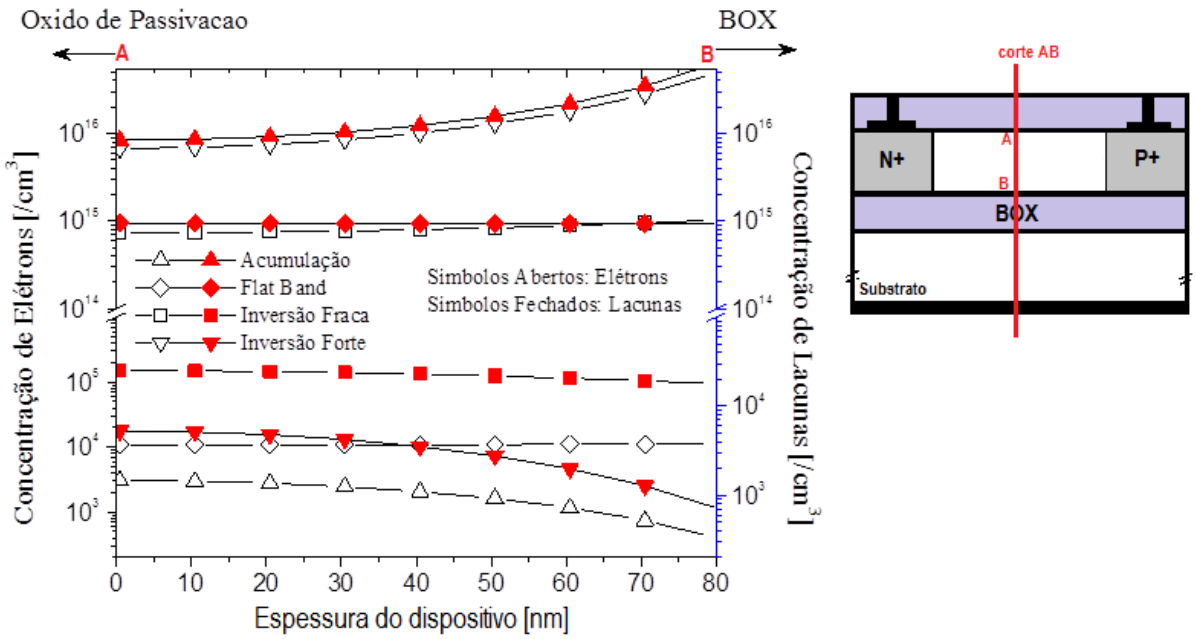
8.1.6 Análise da operação de fotodiodos SOI para tecnologias mais avançadas através de simulação.

Com o objetivo de investigar os fenômenos físicos relacionados com os resultados experimentais observados e estender a análise para tecnologias mais avançadas, como por exemplo, dispositivos com espessura de silício mais reduzida, foram desenvolvidas simulações numéricas com o software Atlas. Todos os dispositivos foram simulados considerando uma transição brusca da concentração de dopantes no limite entre a região P e N. Uma fonte de iluminação de UV (400nm) foi considerada, e a intensidade de potência do feixe óptico é de 0,1 mW/cm^2.

A Figura 102 mostra a mudança nas concentrações de elétrons e lacunas produzida pelos diferentes valores de V_{BG}. Nesta figura mostra-se um corte na estrutura do dispositivo no sentido da espessura (profundidade de silício) exatamente no meio da região intrínseca, onde se encontra em primeiro lugar, o óxido de passivação, em seguida, a região intrínseca, depois o BOX e, em seguida, o substrato de silício formando um capacitor MOS. Quando a polarização de porta traseira é tal que há acumulação de lacunas no filme de silício, uma concentração mais elevada do que a inicial de $1x10^{15}$ portadores por cm^3 pode ser observada. Do mesmo modo, na condição de faixa plana, os valores da concentração de elétrons e lacunas são iguais aos seus valores originais e constantes ao longo da espessura do filme. Finalmente, na inversão fraca e forte com valores mais elevados de V_{BG}, a concentração de elétrons torna-se maior do que o de lacunas (NOVO, 2014). Estas alterações nas concentrações de portadores são responsáveis pelos diferentes comportamentos do dispositivo, dependendo de $V_{BG.}$

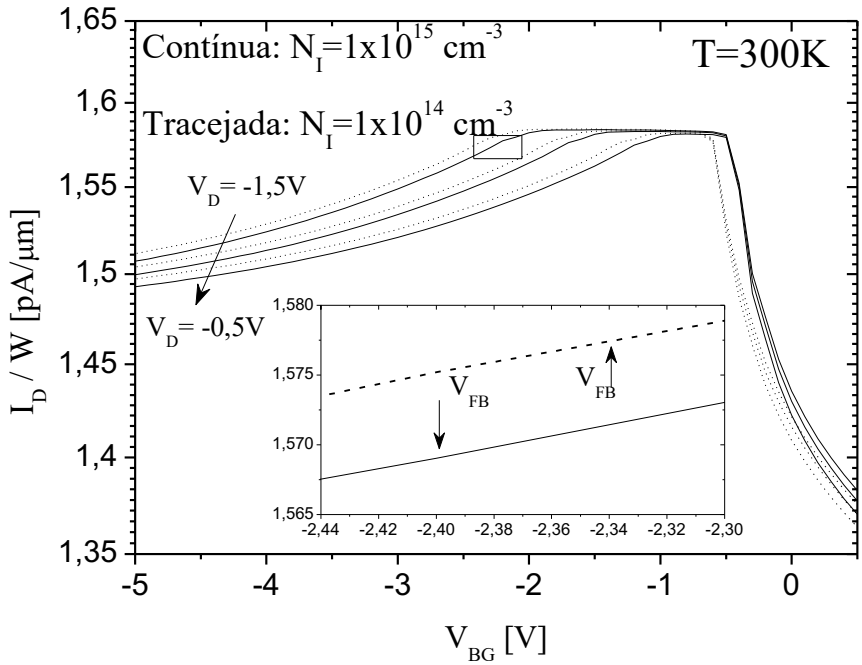
As curvas de corrente em função da polarização de porta traseira, semelhante às apresentadas na Figura 85 foram simuladas para duas tensões de anodo e diferentes concentração de portadores da região intrínseca (N_I) (Figura 103). É possível verificar que para V_{BG} menor do que a tensão de faixa plana (V_{FB}), a corrente cai, e este ponto de queda depende dos valores de N_I e V_D. Para maiores valores de N_I, o potencial de Fermi da camada de silício (ϕ_F) é mais elevado também, o que explica a redução do V_{FB}. Além disso, a tensão de faixa plana V_{FB} é alterada pela tensão de anodo, já que o potencial aplicado à região intrínseca é alterado também. No entanto, a tensão de limiar da estrutura capacitiva inerente a este dispositivo (que pode ser observado quando o dispositivo começa a operar no modo de inversão) praticamente não se altera com o $V_{D,}$ devido à diminuição da carga de depleção, que compensa o aumento de V_{FB} (SZE, 1981).

Figura 102 – Concentração de elétrons e lacunas em função da profundidade de silício para diferentes valores de V_{BG}, em T=300K e V_D=-1V no escuro. (simulado)



Fonte: Autor

Figura 103 – Fotocorrente normalizada em função de V_{BG} para diferentes concentrações intrínsecas e V_D com λ=400nm, T=300K e L_I=8µm. (simulado)

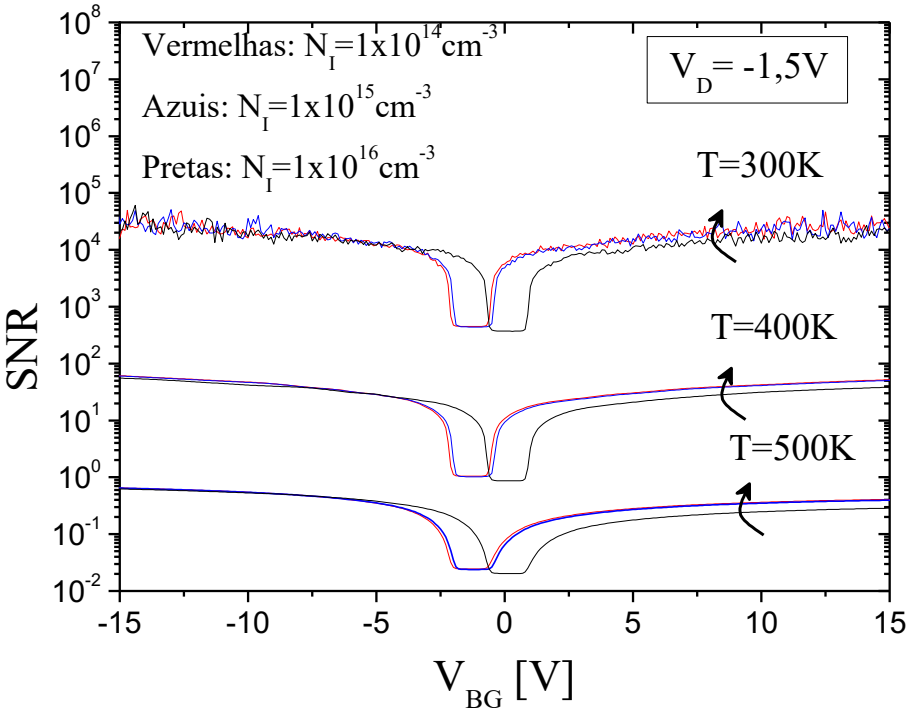


Fonte: Autor

A relação sinal-ruído é fortemente influenciada pela temperatura como pode ser observado na Figura 104, onde é mostrada a SNR em função de V_{BG} para três temperaturas diferentes. À

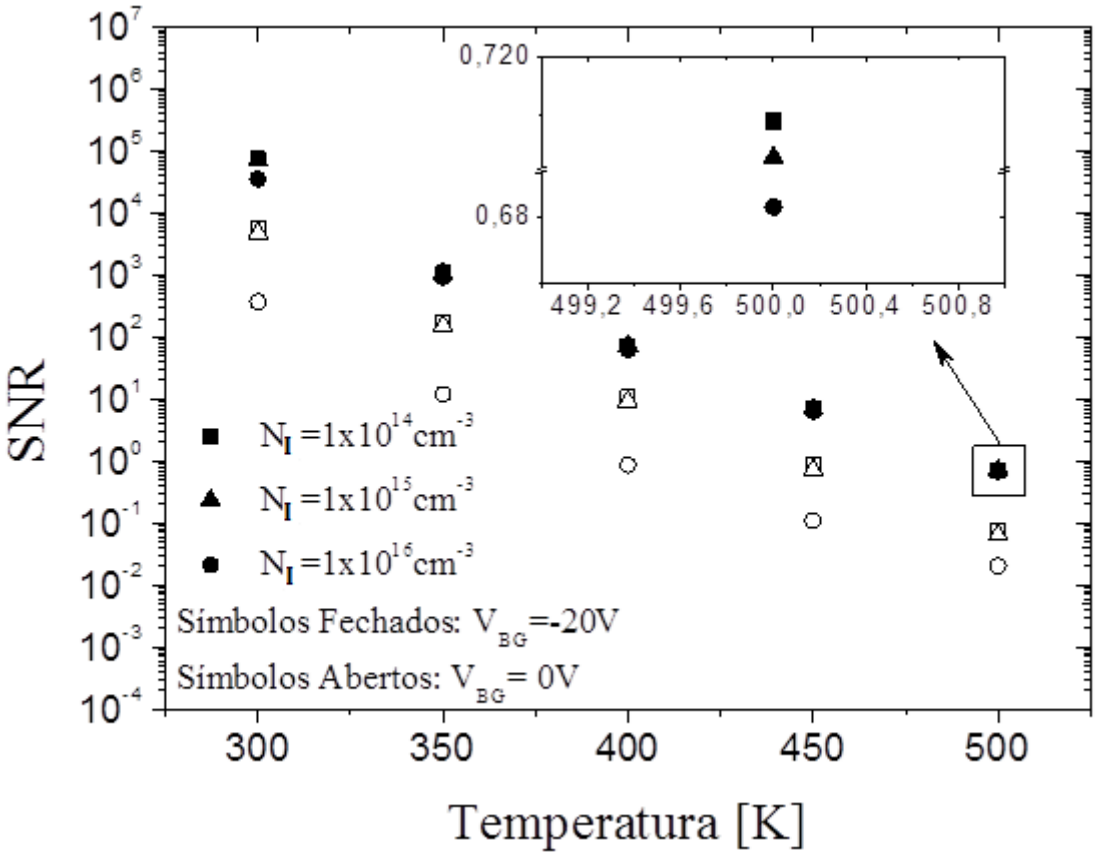
medida que a temperatura é aumentada, a relação sinal-ruído diminui e este comportamento é repetido para os três valores de N_I. Esta figura também permite a observação dos diferentes modos de operação (acumulação, depleção e inversão), e na depleção há o menor valor de SNR devido à geração térmica mais elevada desde pn << ni^2 (sendo p: concentração de lacunas, n: concentração de elétrons e ni: concentração intrínseca). Em relação à concentração de dopantes da região intrínseca, N_I, quanto maior for este valor, mais baixa é a SNR, devido ao aumento da corrente de escuro e da diminuição da fotocorrente gerada, que é o resultado da taxa de recombinação mais elevada e tempo de vida mais curtos (NOVO, GIACOMINI, *et al.*, 2013). Esta tendência também pode ser observada na Figura 105, na qual a relação sinal-ruído é apresentada em função da temperatura. Quando V_{BG} = 0V, obtém-se os menores valores de SNR, enquanto que para V_{BG} = -20V (modo de acumulação), a relação sinal-ruído tem os valores mais elevados, especialmente para menores valores de N_I.

Figura 104 – Relação sinal-ruído em função de V_{BG} para diferentes concentrações intrínsecas com λ=400nm e L_I=8μm. (simulado)



Fonte: Autor

Figura 105 – Relação sinal-ruído em função da temperatura para diferentes concentrações intrínsecas e V_{BG} com λ=400nm e L_I=8µm. (simulado)



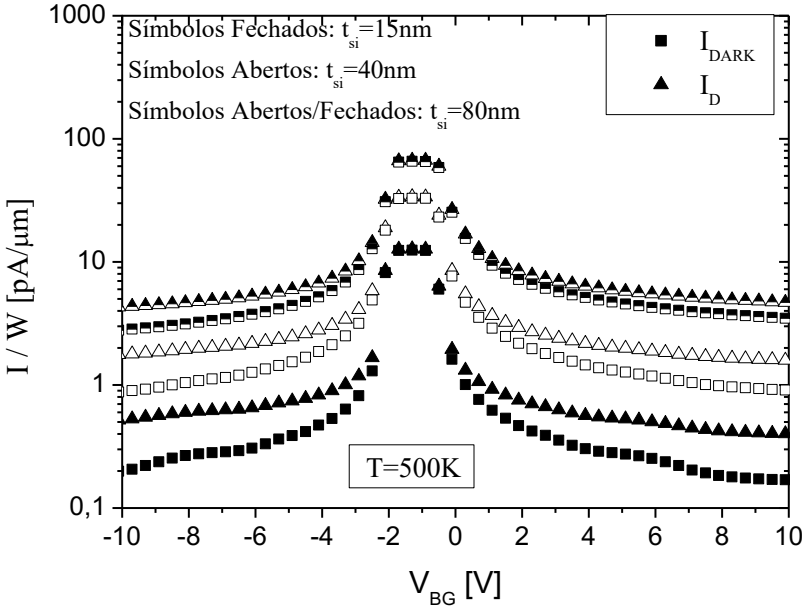
Fonte: Autor

Como a utilização de fotodiodos laterais PIN SOI permite a implementação de fotodetectores integrados aos circuitos CMOS, é importante conhecer o comportamento destes dispositivos para a aplicação de fotodetectores em tecnologias mais avançadas, onde a espessura da camada de silício é reduzida. Com esta finalidade, dois conjuntos de parâmetros tecnológicos também foram usados para simular os fotodiodos. O primeiro possui espessura da camada de silício (t_{si}) de 40 nm, tal como na tecnologia de 150 nm da Oki Semicondutores (DOMAE e AL, 2008) e a segunda, t_{si}=15nm, seguindo a tecnologia de 65 nm do IMEC (AUGENDRE e AL, 2005). Os comprimentos, as espessuras e as concentrações de dopantes foram mantidos como nas simulações anteriores.

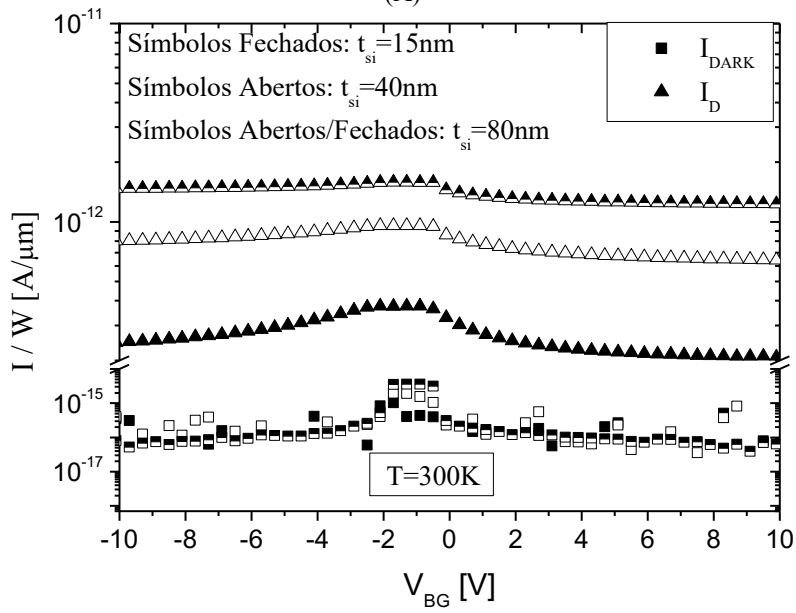
As Figuras 106 (A) e (B) apresentam a fotocorrente e a corrente de escuro em função da polarização de porta-traseira, obtidos para as três espessuras diferentes de silício e duas temperaturas. Devido a limitações de precisão numérica do simulador, níveis muito baixos de corrente são submetidos à ruído numérico significativo (Silvaco, 2010). Por este motivo, não foi possível uma estimativa exata da corrente de escuro destes dispositivos para a temperatura

ambiente, tal como pode ser visto na Figura 106 (B). No entanto, a Figura 106 (A), com T=500K, permite observar que há uma redução de I_{DARK} para dispositivos de camada fina de silício em comparação aos dispositivos que possuem camadas espessas. Os resultados simulados mostram também que reduzindo a espessura do filme de silício, a corrente fotogerada diminui, como consequência da redução da quantidade de fótons absorvidos.

Figura 106 –Fotocorrente e corrente de escuro em função de V_{BG} para diferentes espessuras da camada de silício com λ=400nm em: A) T=500K e B) T=300K. (simulado)



(A)

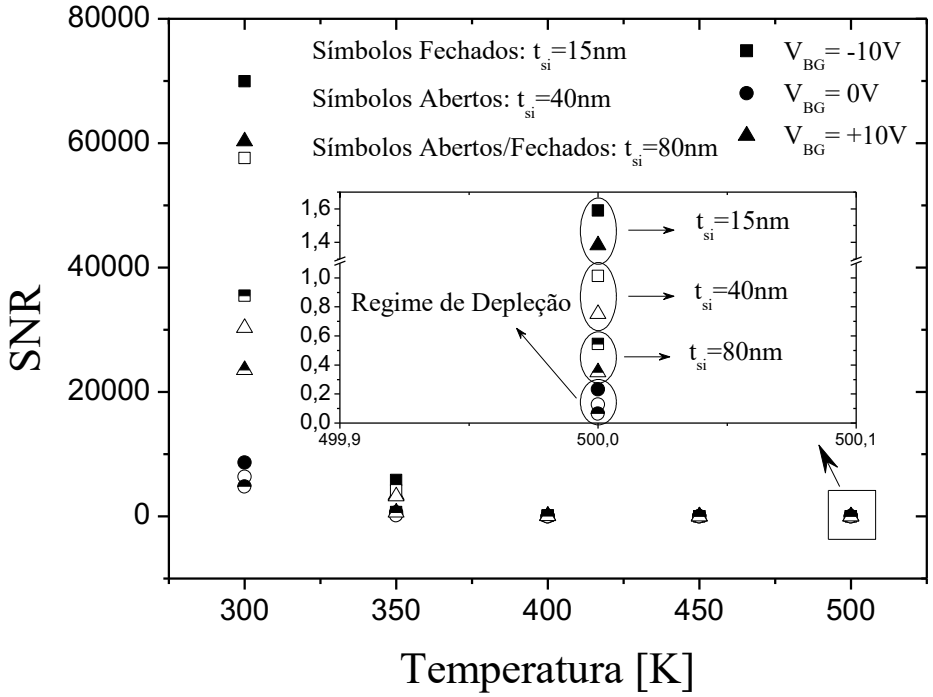


(B)

Fonte: Autor

A partir dos resultados na Figura 106 e com o objetivo de verificar a influência da espessura da camada de silício na sensibilidade do fotodetector, a relação sinal-ruído foi obtida e está apresentada na Figura 107. Os resultados simulados mostraram que a SNR aumenta com a redução da espessura da camada de silício para todas as temperaturas simuladas. O aumento na SNR é mais pronunciado no modo de acumulação (V_{BG}= -10V), seguido pelo modo de inversão (V_{BG}=+10V), enquanto que na depleção (V_{BG}= 0V), a relação sinal-ruído torna-se menos sensível à redução de tsi.

Figura 107 – Relação sinal-ruído em função da temperatura para diferentes espessuras de silício e V_{BG} com λ=400nm e L_I=8μm. (simulado)



Fonte: Autor

8.1.7 Resultados Parciais para aplicações específicas em tecnologia de 2μm

Até este ponto no item 8.1 foram analisados o comportamento e os principais parâmetros dos fotodiodos PIN SOI em tecnologia de 2μm utilizados para aplicações em específicas. Dessa forma, já é possível apresentar os resultados obtidos mais relevantes para esses dispositivos.

Em primeiro lugar foram feitas análises básicas a fim de esclarecer o funcionamento dos dispositivos, chamando a atenção para a ausência da RDD vertical e a presença apenas da RDD lateral. Depois também foi feita um estudo dos diodos operando em temperaturas desde

100K até 500K. Além disso, foi apresentada uma análise profunda da polarização de *back-gate* em conjunto com a variação da temperatura, fato que é inovador na comunidade científica. Tudo isso para gerar como resultado as principais figuras de mérito que são a relação sinal-ruído e a eficiência quântica, apresentadas a seguir.

O aumento da temperatura diminui a relação sinal-ruído em várias ordens de grandeza, porém com o dispositivo em modo de acumulação, pode-se minimizar esse efeito e aumentar a SNR. Para a temperatura de 100K, atingiu-se uma SNR de 202.000 com V_{BG}= -15V, já para T=300K, a maior SNR foi de 31000 com V_{BG} de -20V e para T=500K, obteve-se SNR= 4 com V_{BG} também de -20V.

Já a eficiência quântica aumenta com a elevação da temperatura, entretanto a variação da polarização de *back-gate* produz resultados diferentes. No caso de baixas temperaturas (T=100K), a melhor condição de polarização é no modo de inversão, chegando a atingir 37,5% de EQ_T com V_{BG} de +6V. No caso de temperaturas superiores a 300K, a melhor condição é no modo acumulação, chegando a uma eficiência de 61,9% para T=300K e 84,52% para T=500K (ambas com V_{BG}=-2V). É importante comparar estes resultados com os disponíveis nos principais trabalhos elaborados pela comunidade científica até o momento, tal como em 2013 em (INOKAWA, HIROAKI e ONO, 2013) onde os autores chegaram a uma EQ_T de 37% para a faixa do ultra-violeta e em (AFZALIAN, 2006) atingiu-se uma EQ_T de 62,3% para um dispositivo com L_I de 6µm (ambos com T=300K). Entretanto, nesses trabalhos não houve a análise conjunta dos efeitos da variação da temperatura e da polarização de *back-gate*, tal como foi feita nesta tese.

8.2 DISPOSITIVOS SOI EM TECNOLOGIA DE 0,13µM

Os fotodiodos utilizados neste item foram fabricados em tecnologia 0,13µm da empresa ST Microelectronics. São dispositivos multifinger com valores diferentes de L_I e as suas dimensões e principais parâmetros estão descritos nas Tabela 12 e 13.

Tabela 12 – Principais parâmetros do fotodiodo SOI em tecnologia 0,13 µm da ST Microelectronics.

Parâmetro	***Valor***
Espessura de Silício (t_{Si})	150nm
Espessura do óxido enterrado (t_{oxb})	390nm
Espessura do Óxido de passivação (t_{ox})	300nm
Concentração de dopantes intrínseca P^- (N_I)	$1x10^{15}$ cm^{-3}
Concentração de dopantes N^+ (N_D) / P^+ (N_A)	$1x10^{20}$ cm^{-3}

Fonte: Autor

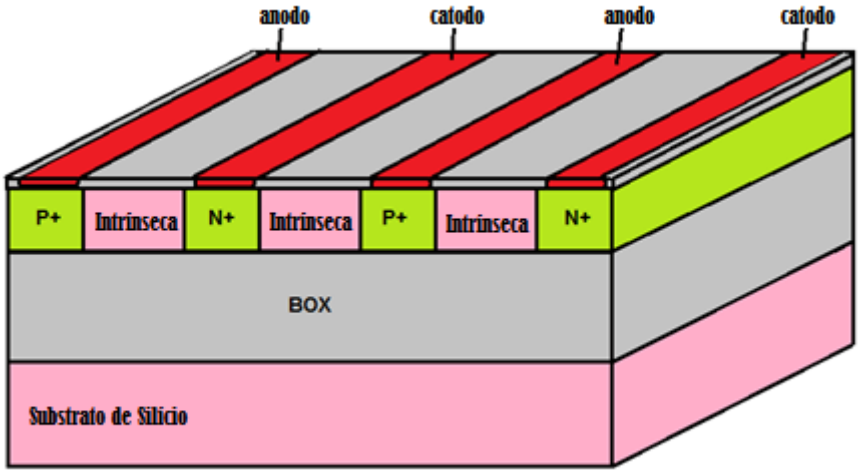
Tabela 13 – Principais dimensões do fotodiodo SOI em tecnologia 0,13 µm da ST Microelectronics.

L_I (µm)	***L_{pn} (µm)***	***L_{tot} (µm)***	***m***	***W (µm)***
1	1.36	249,16	105	250
2	1.36	250	75	250
5	1.36	249,4	39	250
10	1.36	251,28	22	250
100	1.36	204,08	2	250

Fonte: Autor

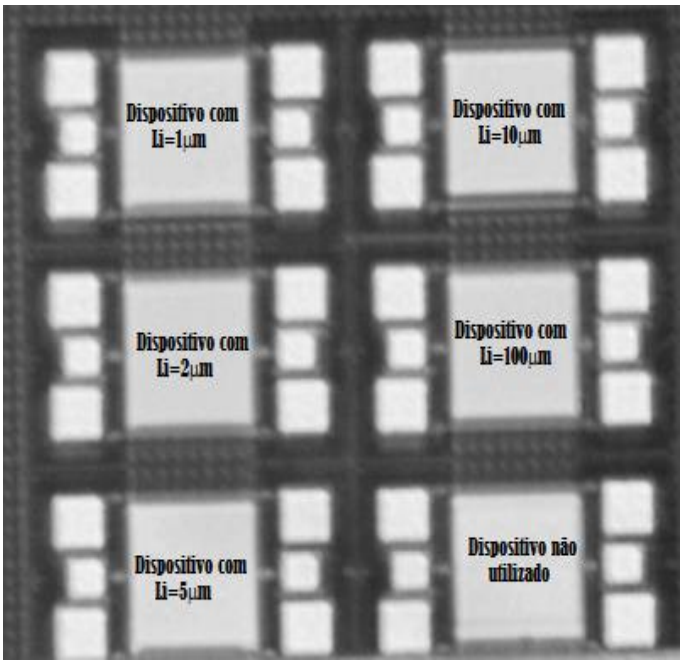
As Figuras 108 e 109 mostram um esquemático do fotodiodo SOI e fotografias dos dispositivos, respectivamente. Pode-se verificar, através da fotografia (Figura 109 A), que cada dispositivo possui seis contatos, sendo um deles o anodo e o outro, o catodo. Os demais Pad's não foram utilizados, pois são específicos para utilização em alta frequência. Na Figura 109 B é possível verificar em detalhe a estrutura do dispositivo com 22 dedos.

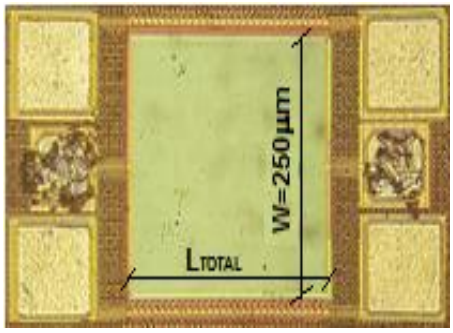
Figura 108 – Esquemático do fotodiodo PIN SOI em tecnologia 0,13µm



Fonte: Autor

Figura 109 – A) Fotografia de todos os diodos do chip. B) Fotografia do fotodiodo PIN SOI com 22 dedos em tecnologia de 0,13µm





(A) (B)

Fonte: Autor

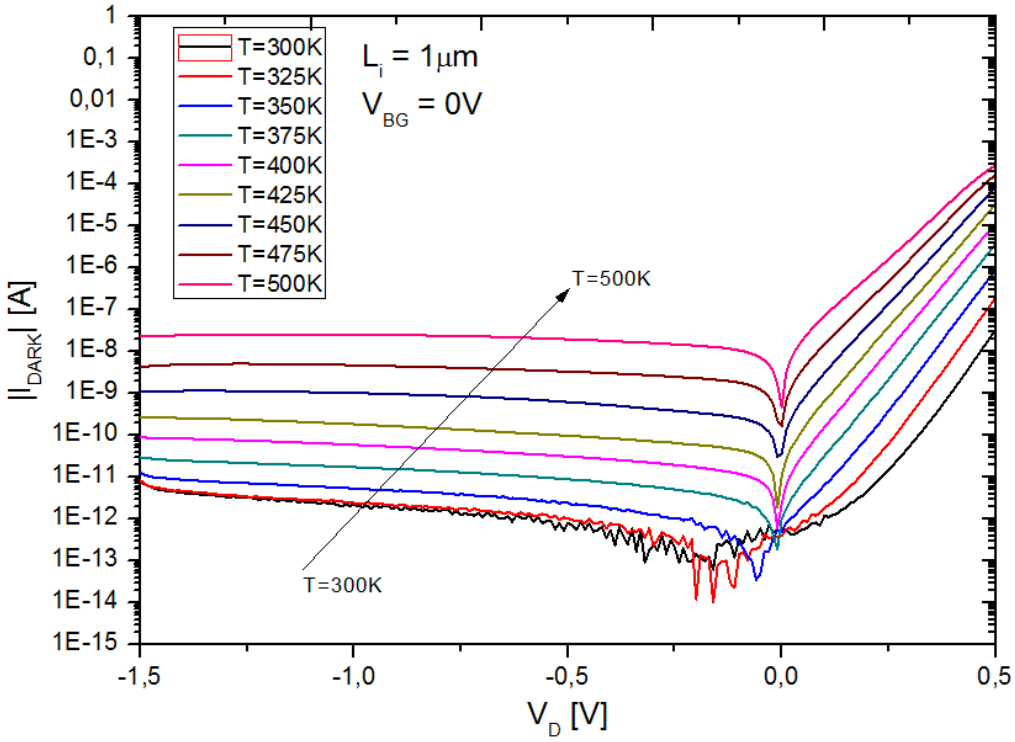
8.2.1 Influência da temperatura

Conforme discutido nos itens anteriores, a corrente de escuro é um parâmetro importante a ser investigado nos fotodetectores. Sua existência é devida à geração térmica de pares elétron-lacuna dentro da região de depleção. Com o entendimento do seu

comportamento é possível averiguar o quanto sua dependência com as variações de temperatura e polarização de porta traseira irão afetar o desempenho do fotodiodo.

A Figura 110 mostra a corrente de escuro do fotodiodo PIN CMOS SOI com L_I=1µm em função da tensão de anodo com V_{BG}=0V. Nota-se que a corrente de escuro é exponencialmente relacionada ao aumento da temperatura. A dependência de I_{DARK} com a temperatura pode ser vista na Equação 46 discutida no item 3.6, onde os termos da equação, que representam a difusão e geração térmica, são dependentes de n_i e consequentemente, da temperatura.

Figura 110 – Corrente de escuro em função da tensão de anodo para o dispositivo em tecnologia 0,13µm com L_I=1µm e V_{BG}=0V (experimental)



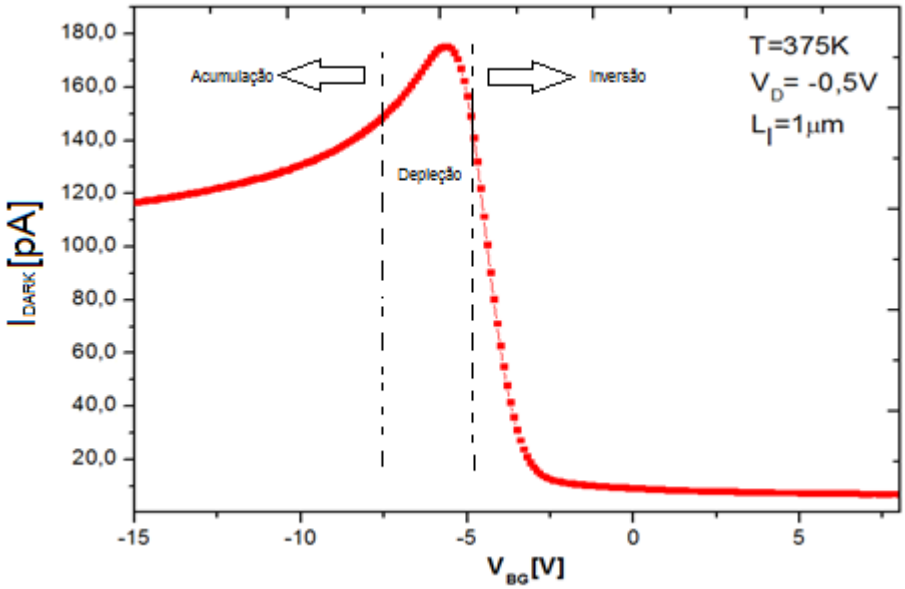
Fonte: Autor

Ao variar a tensão de porta traseira é possível alterar os modos de operação do fotodiodo entre acumulação, inversão e depleção, conforme foi explicado no item 8.1. Desta forma, a Figura 111 mostra a corrente de escuro em função de V_{BG} para o dispositivo com L_I=1µm e com V_D=-0,5V em T=375K (as demais temperaturas seguem a mesma tendência, porém essa foi a menor temperatura que ficou livre de ruído excessivo). Pode-se observar que para V_{BG} <-7,5V o filme de silício está em regime de acumulação, para V_{BG} entre -7,5V e -5V, há depleção e para V_{BG}>-5V, o filme de silício está em inversão. A fim de aprofundar o

entendimento do funcionamento físico do dispositivo, foi simulado através do software *Atlas* um fotodiodo com as mesmas características do dispositivo fabricado pela ST. Desta forma, obteve-se a curva apresentada na Figura 112, que mostra a concentração de portadores em função da profundidade de silício, quando um corte no meio da região intrínseca é feito. Ao observar a situação de acumulação (V_{BG}=-20V), a concentração de lacunas é superior à concentração inicial (N_I=1x10^{15}cm^{-3}), inclusive ela tem um leve aumento na segunda interface, que fica próxima ao BOX, já que a polarização está sendo aplicada ao terminal de porta traseira. Neste caso, fica clara a acumulação de lacunas, já que sua concentração é superior a inicial.

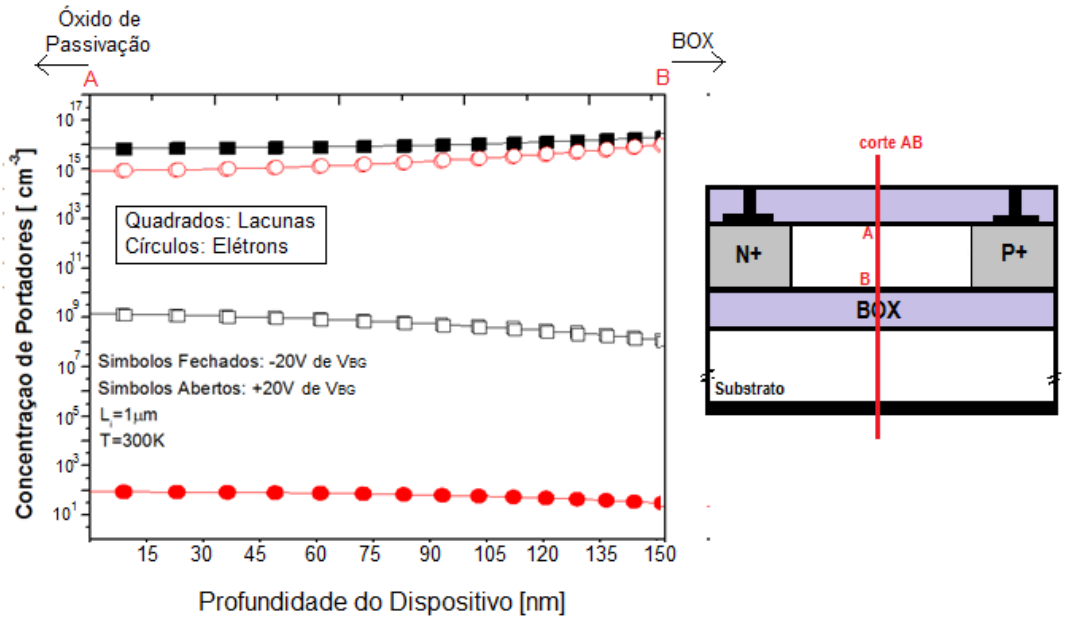
Na situação de inversão (V_{BG}=+20V), a concentração de elétrons supera a concentração de lacunas inicial, indicando que a região intrínseca está operando com inversão total, atuando como região N e não mais como região P.

Figura 111 – Corrente de escuro em função da tensão de porta traseira para o dispositivo em tecnologia 0,13µm com L_I=1µm e V_D=-0,5V (experimental)



Fonte: Autor

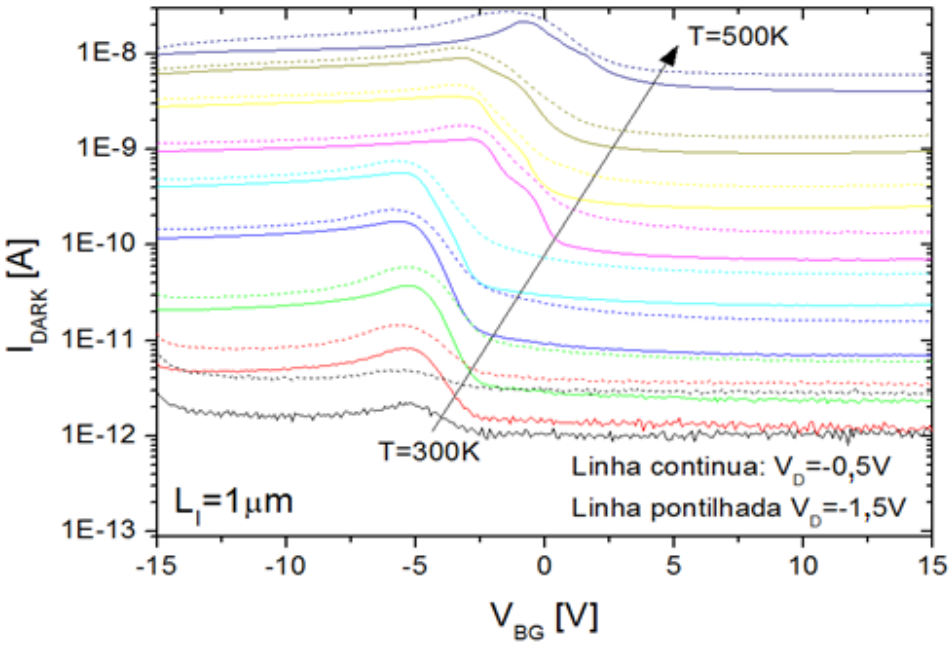
Figura 112 – Concentração de lacunas e elétrons em função da profundidade do filme de silício para o fotodiodo PIN CMOS SOI com L_I=1µm e V_D=-0,5V (simulado)



Fonte: Autor

A Figura 113 mostra a corrente de escuro em função de V_{BG} para diversas temperaturas e é possível perceber que há um deslocamento para direita da região de depleção conforme aumenta-se a temperatura. Isso ocorre devido à temperatura ser responsável pela variação da tensão que inicia a inversão, a qual é conhecida para transisores MOS como tensão de limiar (V_{TH}). Sendo assim, quanto maior for a temperatura, maior será a tensão de limiar, pois maiores tensões de *back-gate* são necessárias para iniciar a inversão. Além disso, também pode ser observado que tensões mais reversas no anodo (V_D mais negativas) produzem maior nível de corrente de escuro, já que aumenta a região de depleção. Este fenômeno ocorre devido ao campo elétrico interno gerado pelas cargas fixas da região de depleção somar-se ao campo elétrico externo gerado pelo potencial aplicado, resultando num aumento da RDD.

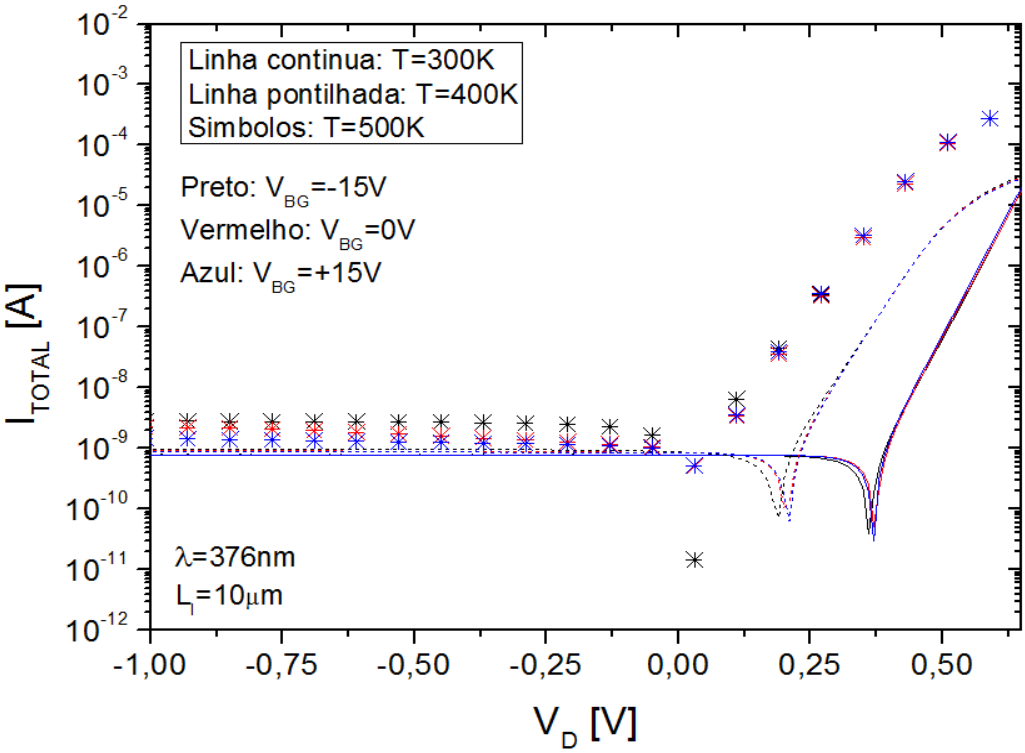
Figura 113 – Corrente de escuro em função da tensão de porta traseira para o dispositivo em tecnologia 0,13µm com L_I=1µm e dois valores de V_D (experimental)



Fonte: Autor

Através da Figura 114, que mostra a corrente total no diodo (corrente fotossensível mais corrente de escuro) em função da tensão de anodo, pode-se observar que a temperatura também provoca alteração no potencial interno de junção (V_{BI}), que é a tensão na qual o diodo passa a conduzir na região direta. Sendo assim, quanto maior for a temperatura, maior será o valor de (n_i), resultando em (V_{BI}) menores, praticamente independente de V_D. Além disso, a Figura 114 também mostra que a tensão de *back-gate* influencia o valor do potencial interno, porque ele é dependente das concentrações de elétrons e lacunas, as quais, são alteradas com a variação de V_{BG}.

Figura 114 – Corrente total em função da tensão de anodo para o dispositivo em tecnologia 0,13µm com L_I=1µm para três valores de temperatura (experimental).



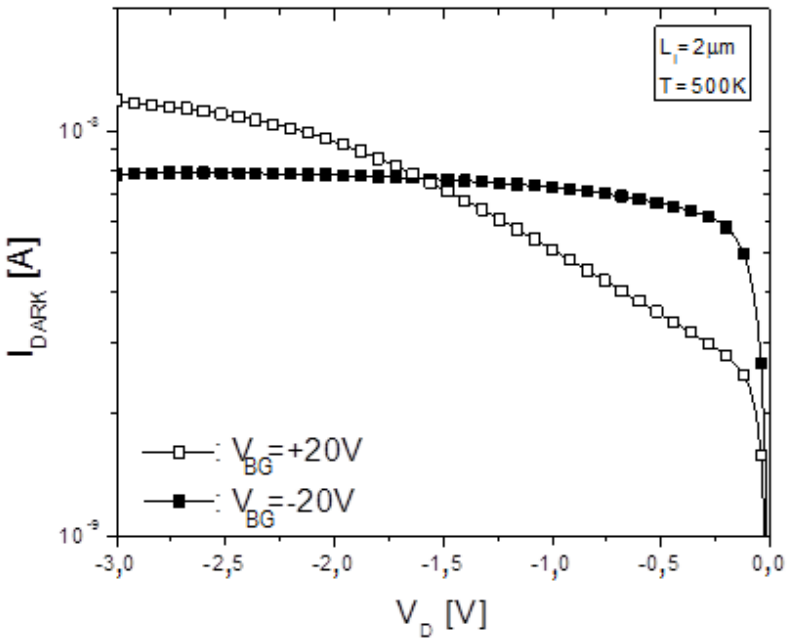
Fonte: Autor

8.2.2 Modelo elétrico equivalente

Sabe-se que a corrente de escuro de um diodo PIN é diretamente proporcional ao tamanho da sua região de depleção; e, portanto, diretamente proporcional à tensão reversa V_D. Esta dependência com V_D pode ser observada na Figura 115 para tensões de *back-gate* positivas, a qual mostra a corrente de escuro em função da tensão de anodo para o dispositivo operando em acumulação (V_{BG}=-20V) e inversão (V_{BG}=+20V). Entretanto, para tensões negativas de *back-gate*, esta dependência se torna muito menos evidente, ou até, desaparece. A temperatura utilizada foi de 500K, a fim de diminuir interferência de ruído, pelo fato da corrente de escuro ser muito baixa em temperaturas inferiores.

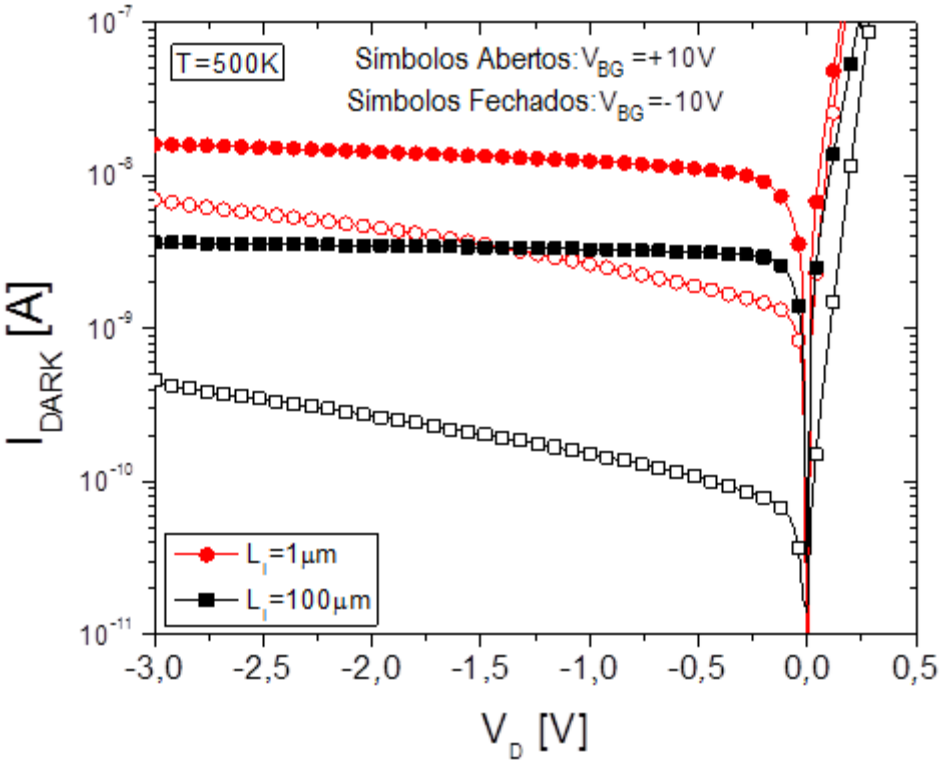
O impacto da polarização de substrato também pode ser visto na Figura 116, a qual mostra a mesma grandeza da Figura 115, só que para dois outros valores de L_I, deixando claro, que o comportamento mencionado independe do tamanho da região intrínseca. Aparentemente tensões de *back-gate* positivas, levam a uma corrente reversa mais baixa para valores menores de V_D. Mas, quando há aumento da tensão reversa (V_D mais negativo), há um aumento expressivo na corrente de escuro.

Figura 115 – Corrente de escuro em função da tensão de anodo para o dispositivo em tecnologia 0,13µm com L_I=2µm para dois valores de V_{BG} (experimental).



Fonte: Autor

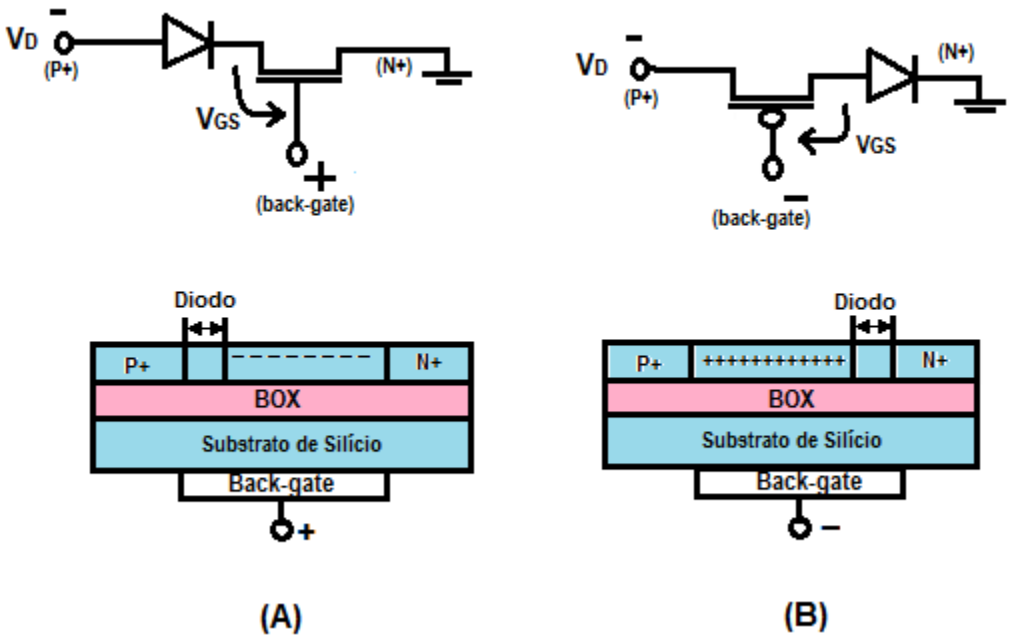
Figura 116 – Corrente de escuro em função da tensão de anodo para o dispositivo em tecnologia 0,13µm com L_I=1µm e 100µm para dois valores de V_{BG} (experimental).



Fonte: Autor

Para explicar o fato da corrente de escuro praticamente não sofrer alteração com V_D para tensões de porta negativas, foi elaborado um modelo elétrico baseando-se em (STEWART e MILTIADIS, 2000) no qual, a região intrínseca com o *back-gate* pode ser considerada como um transistor MOS de cabeça para baixo. Este transistor está em série com o diodo de junção e apresentará uma resistência série que afetará diferentemente a corrente de escuro, conforme a Figura 117. É importante notar que o diodo estará representado no lado P+ da região intrínseca ou no lado N+, dependendo da polarização do porta. Este fato ocorre, pois, a região intrínseca tem comportamentos diferentes dependendo de V_{BG}, podendo ser considerada como tipo P ou N.

Figura 117 – Modelo elétrico do fotodiodo para: A) V_{BG} positivo e B) V_{BG} negativo.



Fonte: Autor

No caso de tensões positivas de *back-gate* (Figura 117-A), a região intrínseca passa a operar como região de material tipo N, por isso, a junção metalúrgica passa a se localizar entre a região P+ e a região intrínseca (à esquerda do transistor). Dessa forma, o transistor será do tipo NMOS. Se considerarmos que a maior parte da tensão reversa V_D irá cair sobre o diodo, podemos considerar que a fonte do transistor (menor potencial) terá tensão zero. Desta forma, a tensão V_{GS} dependerá exclusivamente da tensão de *back-gate*. Por isso, no caso de V_{BG} positivo, teremos: $V_{GS}=V_{BG}$, (já que a tensão na fonte é igual a zero), e a resistência série não dependerá de V_D. Portanto, a corrente de escuro dependerá

exclusivamente da tensão V_D e aumentará para V_D mais reversos (já que a região de depleção irá aumentar).

Já para tensões de *back-gate* negativas (Figura 117-B), a região intrínseca terá acúmulo de lacunas e a junção passa a se localizar entre a região N+ e a região intrínseca, além disso, o transistor será PMOS. Novamente, ao considerarmos que a tensão reversa irá cair sobre o diodo, podemos considerar que o terminal de fonte do transistor terá tensão V_D. Por isso, a tensão V_{GS} dependerá tanto de V_{BG} quanto de V_D e teremos $V_{GS}= V_{BG}-V_D$. Desta forma, a tensão V_D terá efeito na concentração de portadores da região intrínseca e por isso, influenciará a resistência série desta região. Quanto maior a tensão reversa V_D, haverá menor concentração de portadores, o que aumentará a resistência.

Por isso, haverá um efeito concorrente em relação à tensão V_D: por um lado, o aumento da tensão reversa de V_D deveria provocar um aumento na corrente de escuro, tendo em vista, o alargamento da região de depleção, já por outro lado, o efeito do aumento da resistência série provocado pelo aumento da tensão reversa deveria provocar a diminuição da corrente. Desta forma, como há dois efeitos concorrentes relativos ao aumento da tensão reversa V_D, a corrente tende a ficar constante, mesmo com a alteração de V_D.

8.2.3 Análise da taxa de recombinação/geração de portadores

No item anterior, foi apresentada a tendência do comportamento da corrente de escuro nos fotodiodos PIN CMOS SOI que servirá de base para entender como os dispositivos se comportam, quando os mesmos estão iluminados sob radiação ultravioleta, tendo em vista que a variação de polarização de porta traseira modifica a disponibilidade de portadores no filme de silício fazendo com que os modos de operação sejam alterados. Esta afirmação pode ser comprovada através da Figura 118, que apresenta a corrente total de dois fotodiodos normalizada pelo número de dedos (m) em função de V_{BG} e para diferentes V_D em alta temperatura (500K). Observa-se que a maior corrente obtida para ambos os dispositivos é para o valor de V_D mais negativo, devido ao aumento da RDD.

Também pode ser observado que o maior nível de corrente foi obtido para o dispositivo com L_I= 100µm, pois ele apresenta a maior área fotossensível e, portanto, capta a maior parte dos fótons incidentes.

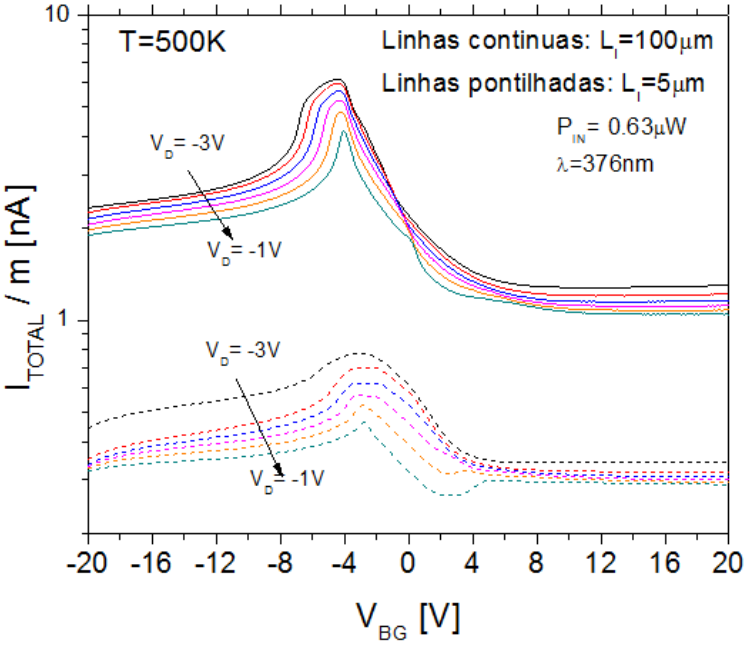
Outra característica importante a ser analisada na Figura 118 é a diferença dos níveis de corrente entre os regimes de acumulação e inversão. Nota-se que a corrente na acumulação

(V_{BG}<0) é maior que a corrente na inversão (V_{BG}>0), indepentemente do valor de L_I. Isso se dá pois os níveis de corrente são altamente influenciados pela taxa de geração/recombinação de portadores. Como o fotodiodo está polarizado reversamente, o fenômeno de geração será predominante em relação ao processo de recombinação, já que, o produto pn é menor que ni^2. Portanto, os níveis de corrente serão altamente influenciados pela taxa de geração, conforme pode ser observado na equação 60, que mostra que o nível de geração/recombinação total do dispositivo (U) é obtido somando-se a taxa de recombinação intrínseca ($U_{recombinação}$) (sinal positivo), a taxa de geração intrínseca ($U_{geração}$) (sinal negativo), e a taxa de geração extrínseca [$G_{(óptica)}$] (sinal negativo).

$$U = U_{(recombinação)} - U_{(geração)} - G_{(óptica)} \qquad (60)$$

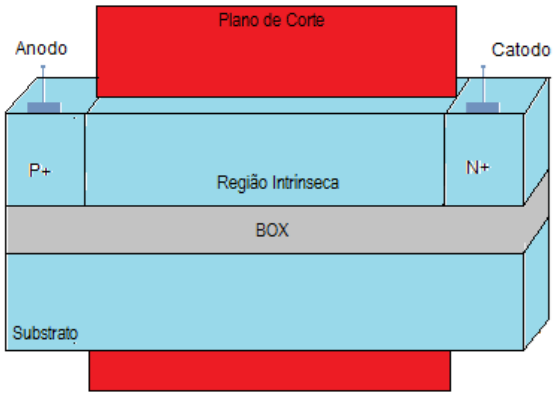
Para verificar esta dependência, foram realizadas simulações de estruturas com os mesmos parâmetros do dispositivo real e foram feitos cortes, conforme pode ser visto na Figura 119, a fim de verificar internamente como a taxa de geração se comporta e poder esclarecer a diferença entre o nível de corrente produzidos pela acumulação e pela inversão.

Figura 118 – Corrente total normalizada pelo número de dedos (m) para dois dispositivos (L_I=100µm e L_I=5µm) em T=500K (experimental).



Fonte: Autor

Figura 119 – Esquema de corte na estrutura do fotodiodo SOI (simulado).



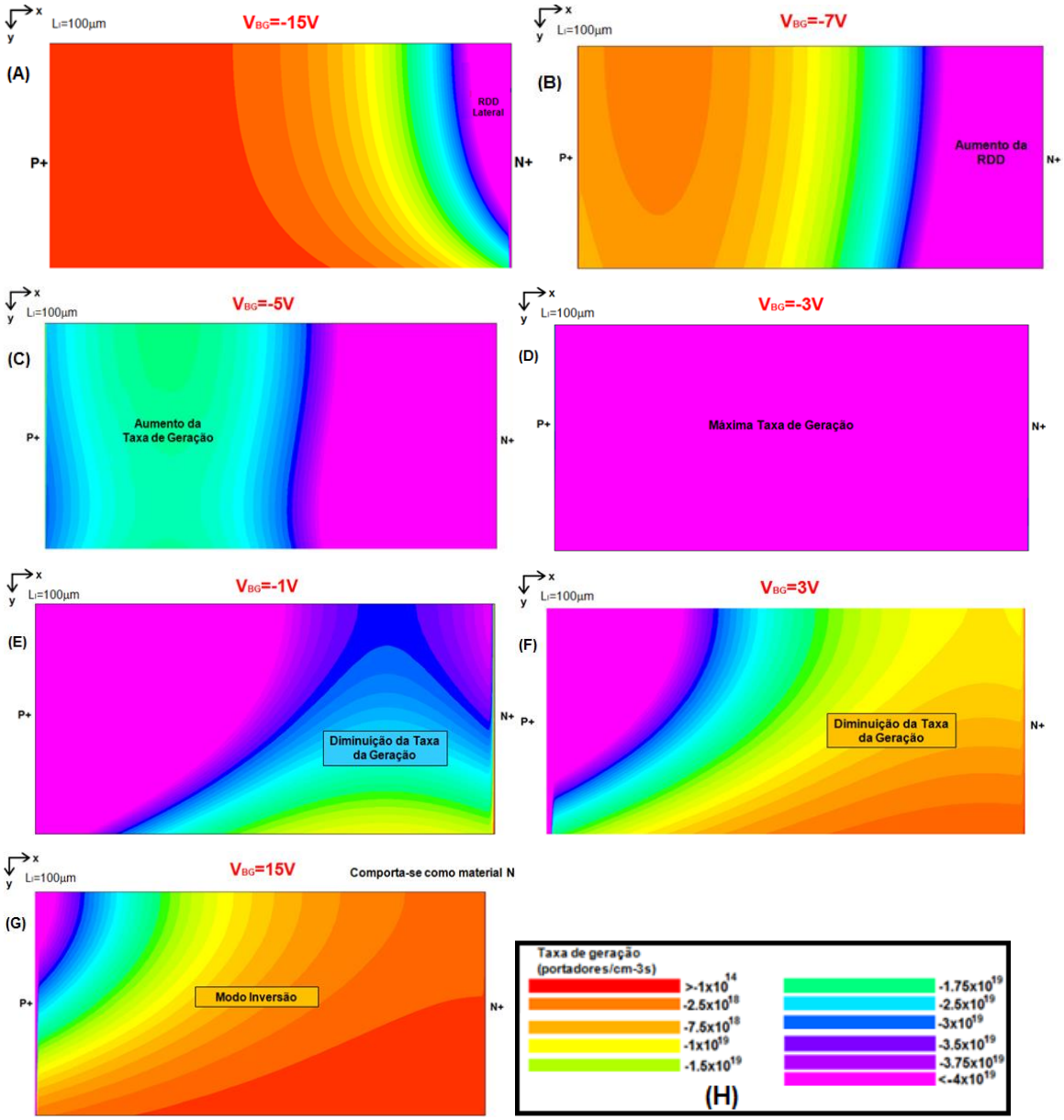
Fonte: Autor

Para fazer tal análise, a Figura 120 mostra a taxa de geração partindo da acumulação até chegar na inversão, com as seguintes polarizações: A) V_{BG}= -15V, B) V_{BG}= -7V, C) V_{BG}= -5V, D) V_{BG}= -3V, E) V_{BG}= -1V, F) V_{BG}= +3V e G) V_{BG}= +15V. A Figura 120-H mostra a legenda.

Quando V_{BG}=-15V (Figura 120-A), o filme de silício encontra-se no regime de acumulação forte. Neste instante, os portadores majoritários são as lacunas e os portadores minoritários são os elétrons. A área que apresenta maior taxa de geração de portadores é a área correspondente à RDD lateral, entre a região intrínseca e a região N+. Isto se deve ao fato de a RDD ser uma área de carga espacial e por isso, apresenta alta taxa de geração de portadores. Ao aumentar a tensão de *back-gate* para -7V (Figura 120-B), o tamanho da região com alta taxa de geração aumenta, visto que a RDD também teve sua extensão ampliada, já que a concentração de lacunas diminuiu. Aumentado V_{BG} para -5V (Figura 120-C), nota-se que a taxa de geração fica ainda mais pronunciada, pois a concentração dos portadores majoritários se reduz cada vez mais. À medida que V_{BG} atinge -3V (Figura 120-D), a região intrínseca atinge a RDD máxima, na qual o filme de silício possui depleção lateral e vertical, produzindo uma alta taxa de geração, o que aumenta a corrente total do dispositivo.

De maneira análoga, quando V_{BG} possui valores cada vez mais positivos (Figuras 120-E, F, G), a taxa de geração começa a diminuir, pois a concentração de lacunas diminui, enquanto a concentração de elétrons aumenta. Além disso, a área de maior geração se concentra agora no lado esquerdo do dispositivo, pois é onde está localizada a nova junção, já que o filme de silício se comporta como material do tipo N. Neste instante, o perfil de dopantes dos fotodiodos passa a ser P+N-N+ e os portadores majoritários passam a ser os elétrons, consequentemente os portadores minoritários as lacunas.

Figura 120 – Taxa de geração nas estruturas de fotodiodo PIN SOI: A) V_{BG}= -15V, B) V_{BG}= -7V, C) V_{BG}= -5V, D) V_{BG}= -3V, E) V_{BG}= -1V, F) V_{BG}= +3V e G) V_{BG}= +15V. (simulado).

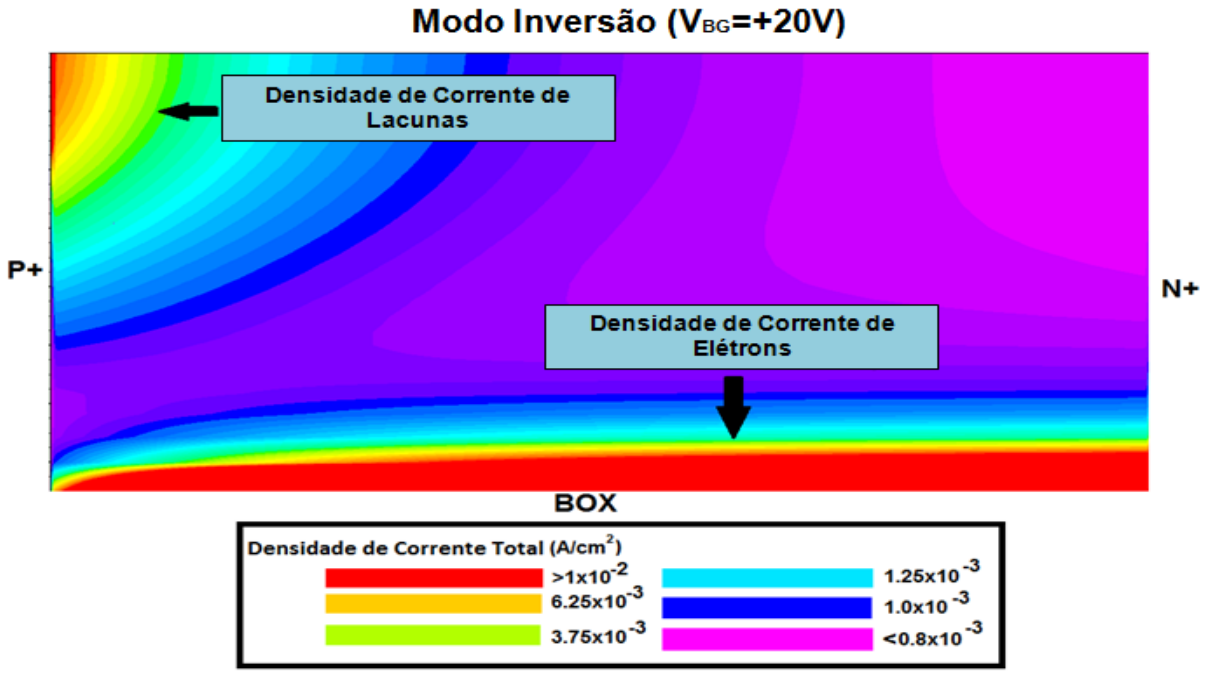


Fonte: Autor

Neste momento é possível afirmar que a diferença no nível de corrente entre a acumulação e inversão pode ser atribuída a uma alteração muito significativa na taxa de geração de portadores ao se comparar estes dois modos de operação. Além disso, a taxa de geração está intimamente ligada à composição da corrente total do dispositivo, a qual, em inversão é composta majoritariamente por elétrons, conforme pode ser visto na Figura 121 que mostra a densidade de corrente total do dispositivo para V_{BG}=+20V. Já em acumulação, a corrente é

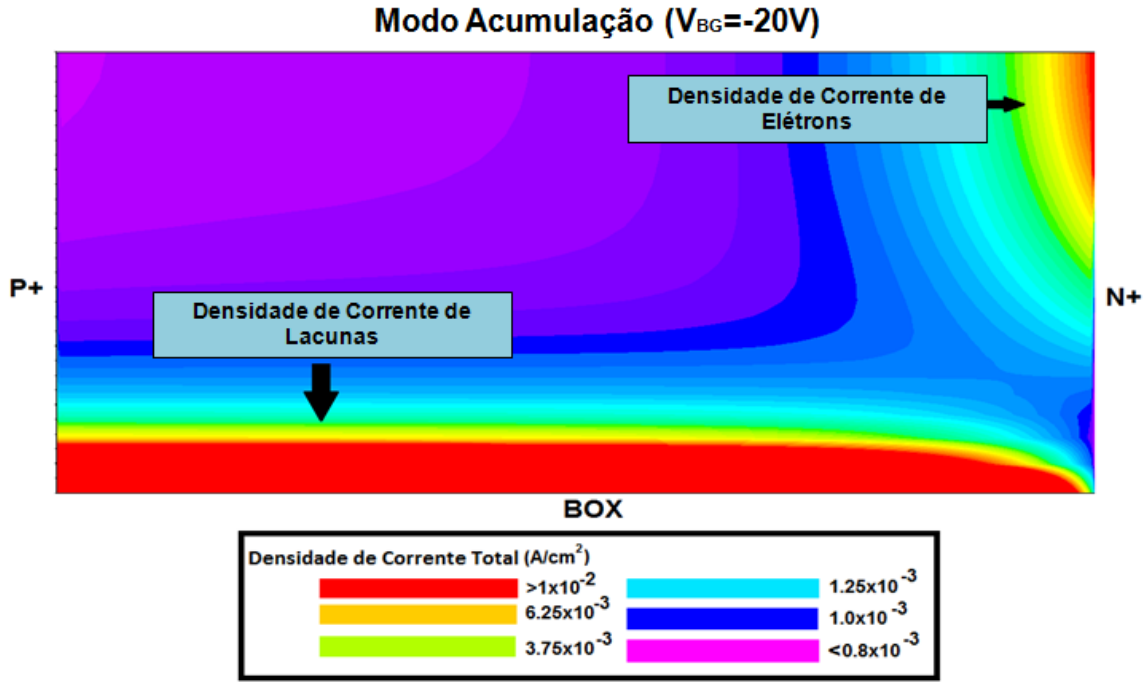
composta majoritariamente por lacunas, conforme pode ser visto na Figura 122 para o dispositivo com V_{BG}=-20V.

Figura 121 – Densidade de corrente total em inversão (simulado).



Fonte: Autor

Figura 122 – Densidade de corrente total em acumulação (simulado).



Fonte: Autor

Os portadores minoritários em ambos os modos de operação (acumulação/inversão), são os responsáveis pela variação da taxa de geração dos fotodiodos, conforme equação 61 de (Silvaco, 2010) onde E_d é a energia de ativação de dopante, p e n são as concentrações de portadores, τ_p e τ_n são os tempos de vida das lacunas e dos elétrons, respectivamente.

$$(Taxa\ se\ Geração)_{SRH} = \frac{p.n - {n_i}^2}{\tau_p\left[n + n_i exp\left(\frac{E_d}{kT}\right)\right] + \tau_n\left[p + n_i exp\left(\frac{E_d}{kT}\right)\right]} \tag{61}$$

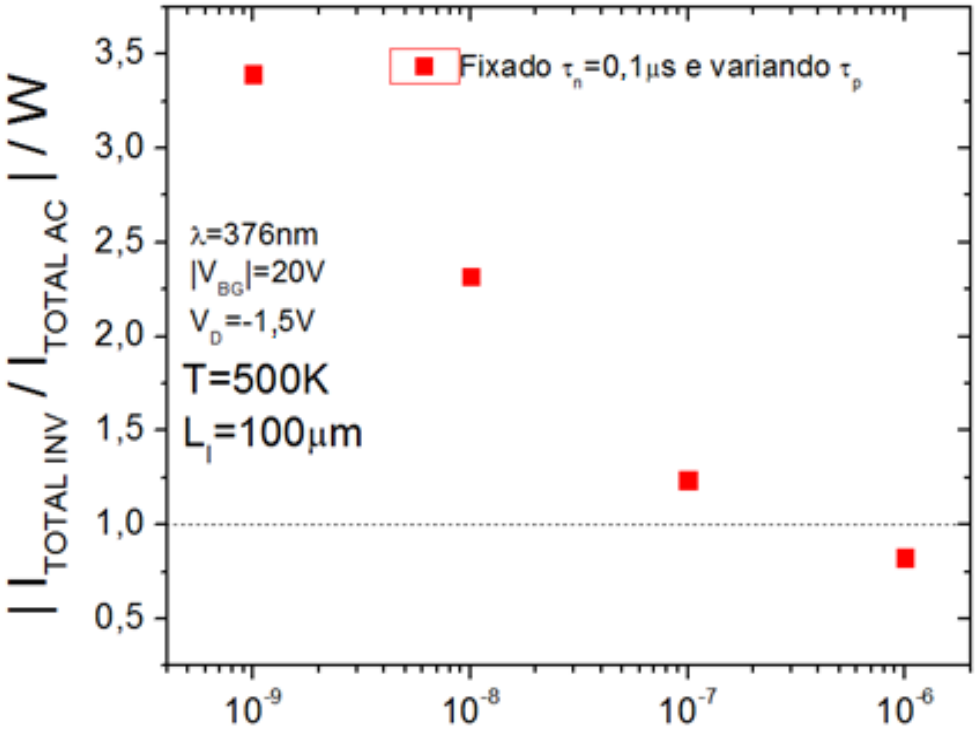
Esta equação mostra uma dependência significativa da taxa de geração (e, portanto, do nível de corrente) com o tempo de vida dos portadores. O significado físico do "tempo de vida de geração" representa quanto tempo os portadores livres, quer sejam elétrons quer sejam lacunas, "ficam faltando" antes de serem regerados (SZE, 1981). Desta forma, os portadores minoritários são de extrema relevância, pois eles irão ditar o ritmo da taxa de geração, já que para uma lacuna ser gerada, é necessário que "falte" um elétron e vice-versa. Portanto, em inversão, o tempo de vida das lacunas irá determinar a taxa de geração dos elétrons e, por consequência, o nível de corrente (já que a corrente é composta majoritariamente por elétrons).

Seguindo este raciocínio, a Figura 123 mostra a razão entre corrente de inversão e corrente de acumulação em função do tempo de vida de lacunas (minoritários), mantendo-se fixo o tempo de vida dos elétrons. À medida que o tempo de vida das lacunas é aumentado, o tempo que estes portadores ficam faltando aumenta, o que diminui a geração de elétrons, reduzindo significativamente a corrente de inversão (composta principalmente por elétrons). Já na Figura 124 pode-se observar o mesmo comportamento, porém ao ser alterado o tempo de vida dos elétrons, mantendo-se fixo o tempo de vida das lacunas. Ao aumentar o tempo de vida dos elétrons, há diminuição da geração de lacunas, o que reduz o nível da corrente de acumulação (composta principalmente por lacunas), fazendo com que a relação I_{INV}/I_{ACUM} aumente.

No caso do silício, o tempo de vida dos portadores pode variar entre 10^{-9}s em materiais altamente contaminados com muitos centros de recombinação e 10^{-3}s em materiais altamente puros (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002). Portanto, o tempo de vida dos portadores minoritários está diretamente relacionado à qualidade do filme de silício. Ele é afetado pela presença de tanto defeitos na rede cristalina, quanto impurezas no metal. Há dois principais métodos propostos pela comunidade científica para determinação

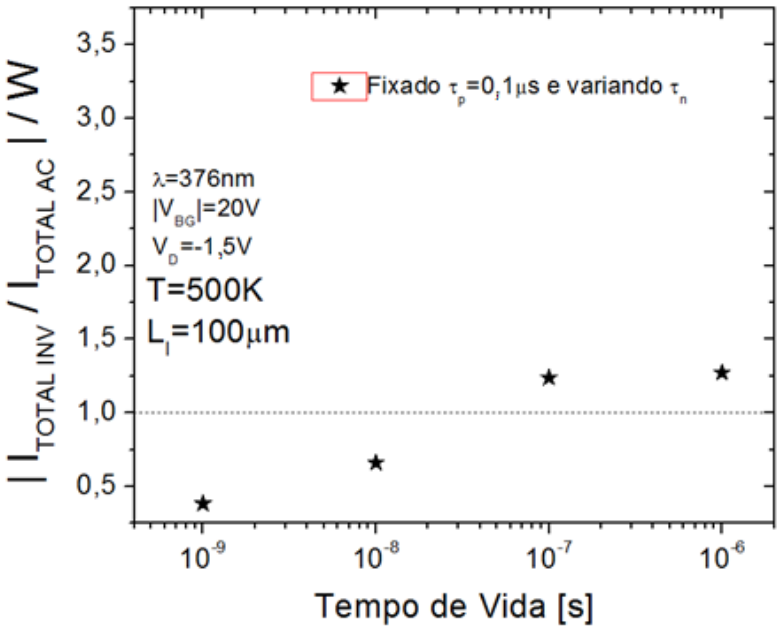
mais precisa do tempo de vida dos portadores minoritários, que são o método Surface Photogate (SPV), que utiliza a geração de um pulso de tensão através de iluminação com um único comprimento de onda e método por fotoluminescência, que utiliza um tempo de vida efetivo considerando todos os tipos de geração de portador: SRH, Auger e radiativo. Estes métodos estão propostos em (COLINGE, 2004) e não serão aprofundados neste trabalho, pois não fazem parte do seu escopo.

Figura 123 – Razão entre as correntes de inversão e de acumulação em função do tempo de vida das lacunas para L_i=100µm em T=500K, iluminado com λ=376nm (simulado).



Fonte: Autor

Figura 124 – Razão entre as correntes de inversão e de acumulação em função do tempo de vida dos elétrons para L_I=100µm em T=500K, iluminado com λ=376nm (simulado).

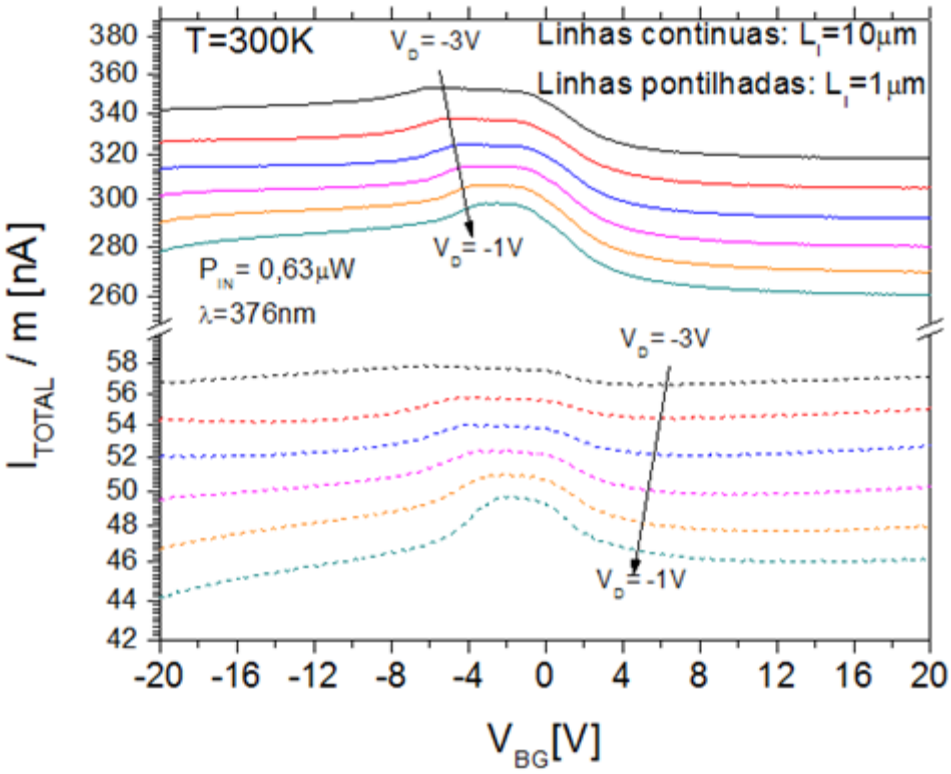


Fonte: Autor

8.2.4 Influência do comprimento da região intrínseca na operação dos dispositivos

Conforme foi esclarecido no capítulo anterior, a taxa de geração de portadores é predominante, quando os dispositivos estão operando em altas temperaturas. Entretanto, este comportamento pode ser alterado, quando é analisada a situação de operação em baixas temperaturas. A predominância passa a ser de recombinação de portadores e não de geração para dispositivos com menores comprimentos da região intrínseca em baixas temperaturas. Este fato faz com que haja alteração dos níveis de corrente, conforme pode ser observado na Figura 125, a qual mostra a corrente total em função de V_{BG} para dois dispositivos em T=300K. Neste caso, a corrente de inversão torna-se maior que a corrente de acumulação para L_I=1µm, o que difere da situação vista no capítulo anterior, na qual a corrente em inversão era menor que a de acumulação para T=500K. Além disso, esta alteração nos níveis de corrente só ocorre para dispositivos com menor L_I. É importante observar também que o nível de corrente do fotodiodo com L_I=10µm é maior comparado com L_I=1µm, pois a área fotossensível é maior.

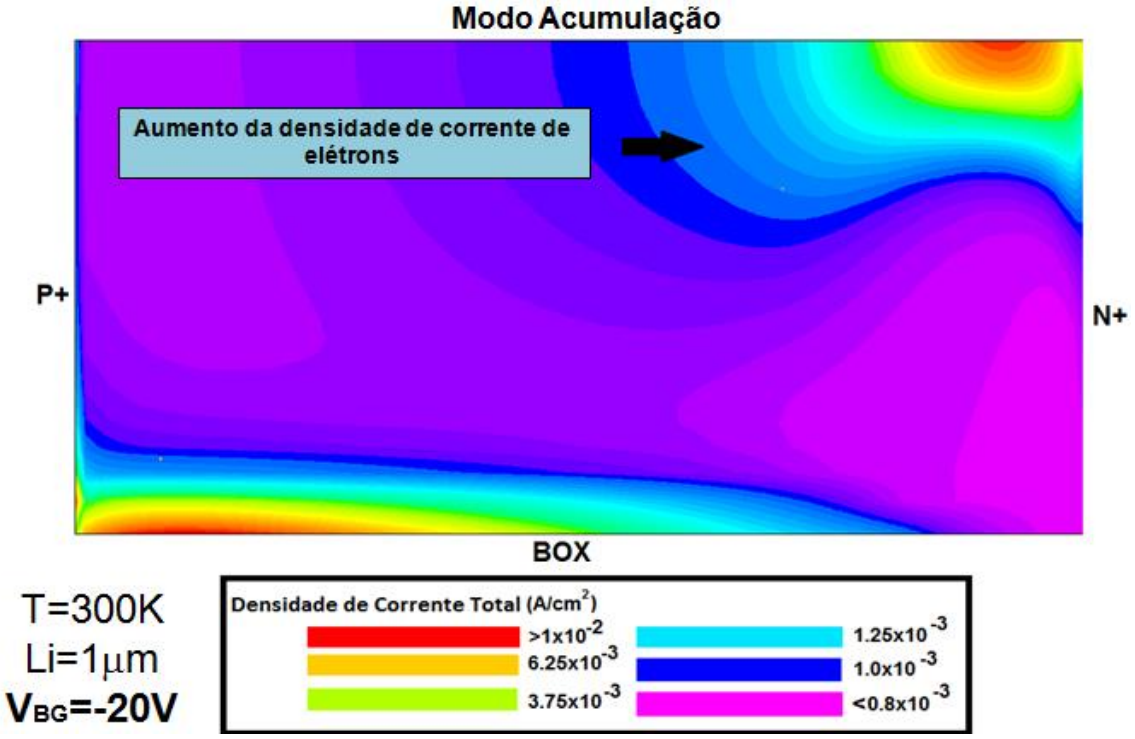
Figura 125 – Corrente total em função de V_{BG} para L_I=1μm e L_I=10μm em T=300K, iluminado com λ=376nm (experimental).



Fonte: Autor

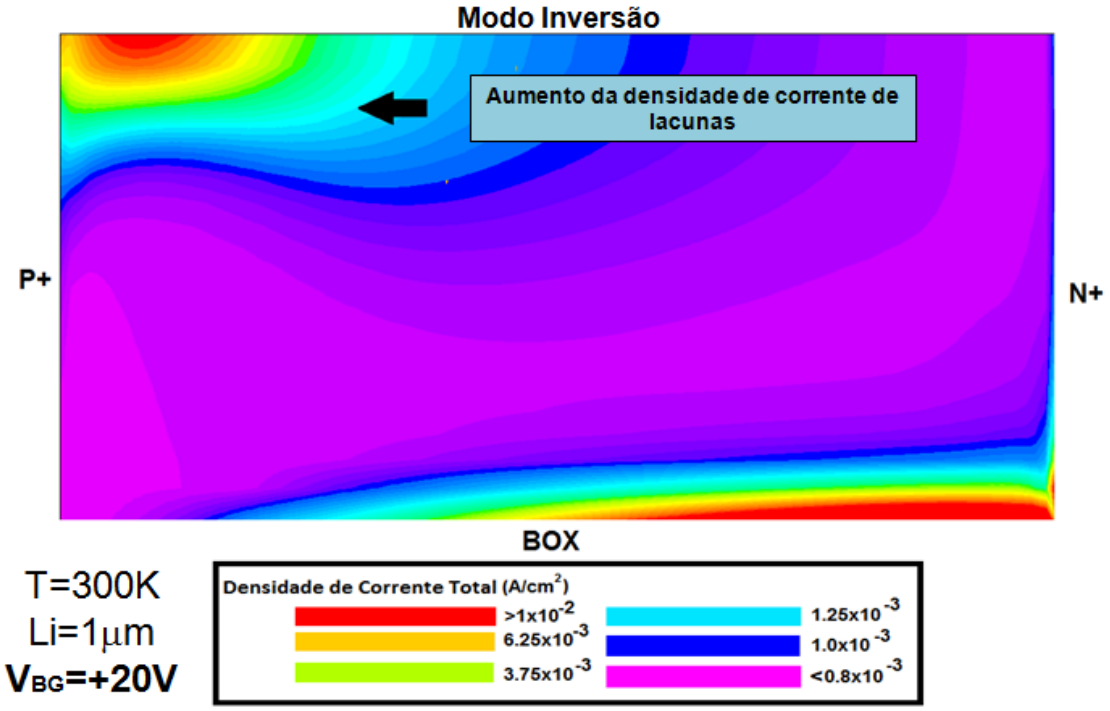
Para entender a causa da inversão dos níveis de corrente (acumulação/inversão) para fotodiodos com comprimentos intrínsecos pequenos, foram feitas simulações das densidades de correntes de elétrons e lacunas em temperatura ambiente (T=300K). De acordo com a Figura 126, é possível verificar que houve um aumento significativo na densidade de corrente de elétrons que são os portadores minoritários no regime de acumulação. Já na Figura 127, este mesmo efeito acontece em inversão, ou seja, houve um aumento na densidade de corrente de lacunas que são os portadores minoritários no regime de inversão. Em ambos os casos, verifica-se que a densidade de corrente dos portadores minoritários aumenta, enquanto a densidade de corrente dos portadores majoritários tende a diminuir. O aumento da densidade de corrente dos portadores minoritários está relacionado com o fato de haver menor largura entre os eletrodos, além de uma baixa geração térmica de portadores, já que a temperatura é a ambiente. Por isso, há predominância do fenômeno de recombinação. Este efeito causa um impacto significativo na corrente total do dispositivo, dependendo do seu modo de operação.

Figura 126 – Densidade de corrente dos portadores minoritários em acumulação para L_I=1µm em T=300K com V_{BG}=-20V (simulado).



Fonte: Autor

Figura 127 – Densidade de corrente dos portadores minoritários em inversão para L_I=1µm em T=300K com V_{BG}=+20V (simulado).

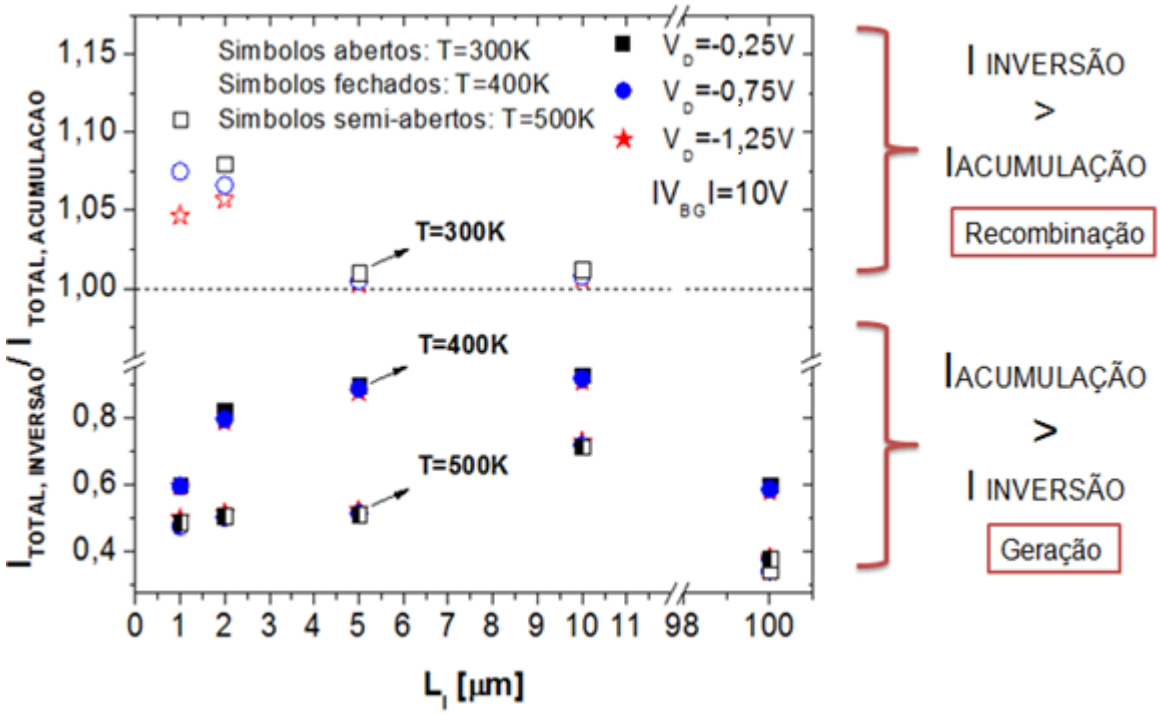


Fonte: Autor

Em resumo a Figura 128 mostra o efeito da taxa de geração/recombinação em função do comprimento intrínseco para temperaturas de 300K, 400K e 500K.

Operando em temperatura ambiente (T=300K), os dispositivos com menores L_I (1µm e 2µm) apresentaram maiores taxas de variação entre as correntes de inversão e acumulação. Quando a relação entre as correntes é maior que 1 ($I_{INVERSÃO} > I_{ACUMULAÇÃO}$), o processo de recombinação é mais evidente, pois este efeito é mais pronunciado em dispositivos que apresentam menores comprimentos intrínsecos, resultando num aumento significativo na densidade de corrente dos portadores minoritários. Quando a relação é menor que 1 ($I_{INVERSÃO} < I_{ACUMULAÇÃO}$), o processo de geração é mais pronunciado, independente do comprimento intrínseco. Nota-se que esta situação ocorre quando o fotodiodo está operando em alta temperatura, onde a taxa de geração térmica torna-se mandatória. Portanto, quanto maior for o tempo de vida dos portadores minoritários, menor será a taxa de geração dos portadores majoritários, conforme discutido anteriormente.

Figura 128 – Densidade de corrente dos portadores minoritários em inversão para L_I=1µm em T=300K com V_{BG}=+20V (simulado).



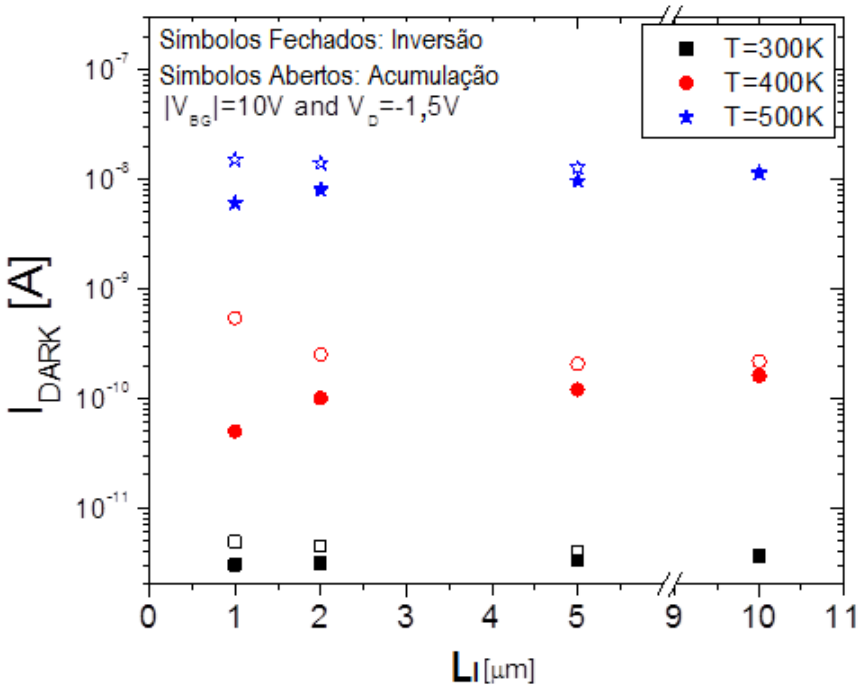
Fonte: Autor

A corrente de escuro também pode ser afetada pelo tamanho da região intrínseca dos fotodiodos. Esta corrente (I_{DARK}) é proporcional à área de junção e ao tamanho da região de depleção (AFZALIAN, 2006). É possível verificar esta influência de acordo com os dados da

Figura 129, a qual mostra a corrente de escuro em função do comprimento intrínseco para acumulação e inversão em três temperaturas diferentes.

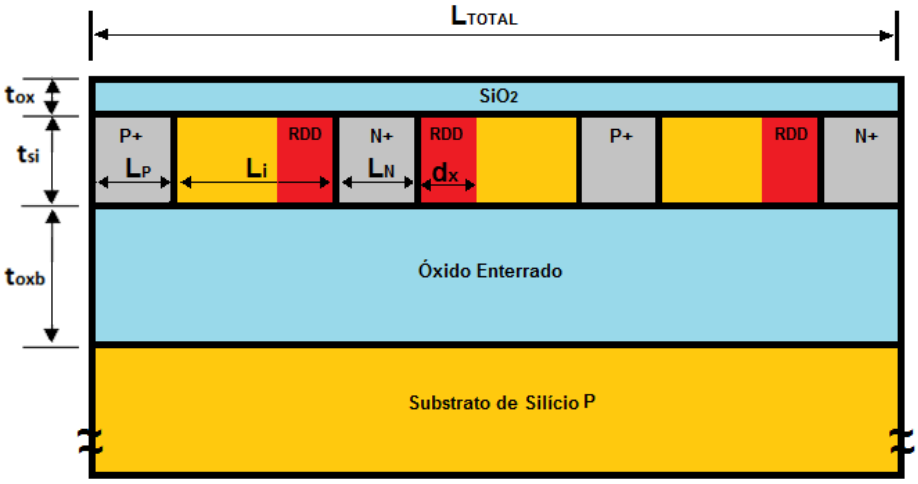
Conforme já foi explicado, os fotodiodos em questão possuem área de junção fixa, ou seja, tanto (W - profundidade) como (L - comprimento) são iguais para todos os dispositivos. Isso é possível alterando o número de dedos (m) para diferentes comprimentos intrínsecos (Tabela 13). Como a região de depleção é formada entre a junção da região N^+ e a região intrínseca, pode-se calcular o seu valor dx e verificar se a região intrínseca está totalmente depletada ou não. Ou seja, para $dx \geq L_I$, a região intrínseca estará totalmente depletada, conforme pode ser observado na Figura 130.

Figura 129 – Corrente de escuro em função de L_I para acumulação e inversão em três diferentes temperaturas. (experimental).



Fonte: Autor

Figura 130 – Esquema de fotodiodo multifinger SOI



Fonte: Autor

Na tabela 14 estão calculados os valores de dx e dx_{TOTAL} utilizando as Equações 34 e 35, considerando V_D=-1,5V.

Tabela 14 – Valores de RDD total dos dispositivos multi-finger.

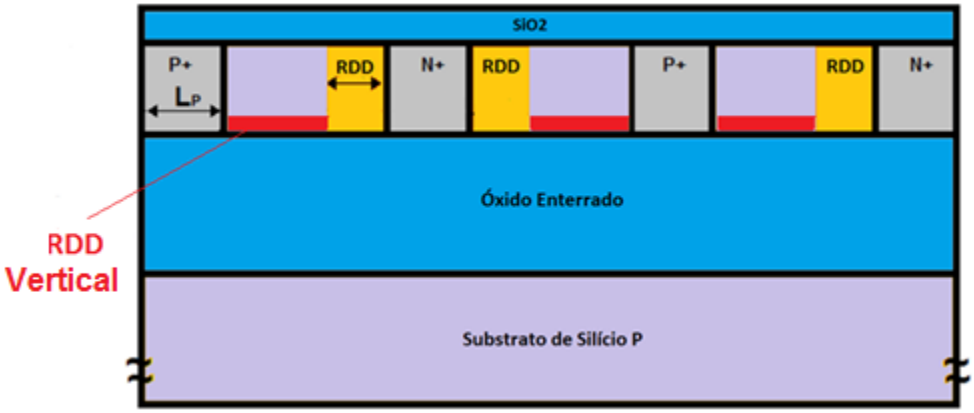
L_I (µm)	Nº Dedos	dx (µm)	dx_{Total} (µm)
1	105	79,7	105
2	75	79,7	150
5	39	79,7	195
10	22	79,7	220
100	2	79,7	159,4

Fonte: Autor

Desta forma, os fotodiodos de 1µm, 2µm, 5µm e 10µm estão com a região intrínseca totalmente depletada. Portanto o comprimento da região de depleção total (dx_{TOTAL}) será o número de dedos multiplicado pela extensão da região intrínseca, ou seja, para o fotodiodo com trinta e nove dedos (m=39), o valor de dx é maior que L_I e a região intrínseca estará totalmente depletada, por isso, o valor da RDD em cada dedo será exatamente o valor de L_I. Como há trinta e nove dedos, o comprimento total da região de depleção deste dispositivo será trinta e nove vezes o valor de L_I, portanto, dx_{TOTAL}=195µm. Sendo assim, quando o filme está em acumulação, a corrente de escuro diminui com o aumento da região intrínseca, pois a junção formada entre N^+ e P^- possui somente depleção lateral, resultando numa dependência direta de (I_{DARK}) com o número de dedos. Quando o filme está em inversão, a corrente de

escuro aumenta com o aumento da região intrínseca, pois há a formação da RDD vertical conforme pode ser visto na Figura 131. Desta forma, em inversão, a corrente de escuro será proporcional ao tamanho da região intrínseca, já que é nela que se formará a RDD vertical.

Figura 131 – Esquema de fotodiodo multifinger SOI com RDD vertical em inversão.



Fonte: Autor

8.2.5 Análise das figuras de mérito

A seguir serão analisadas as principais figuras de mérito do diodo PIN lateral:

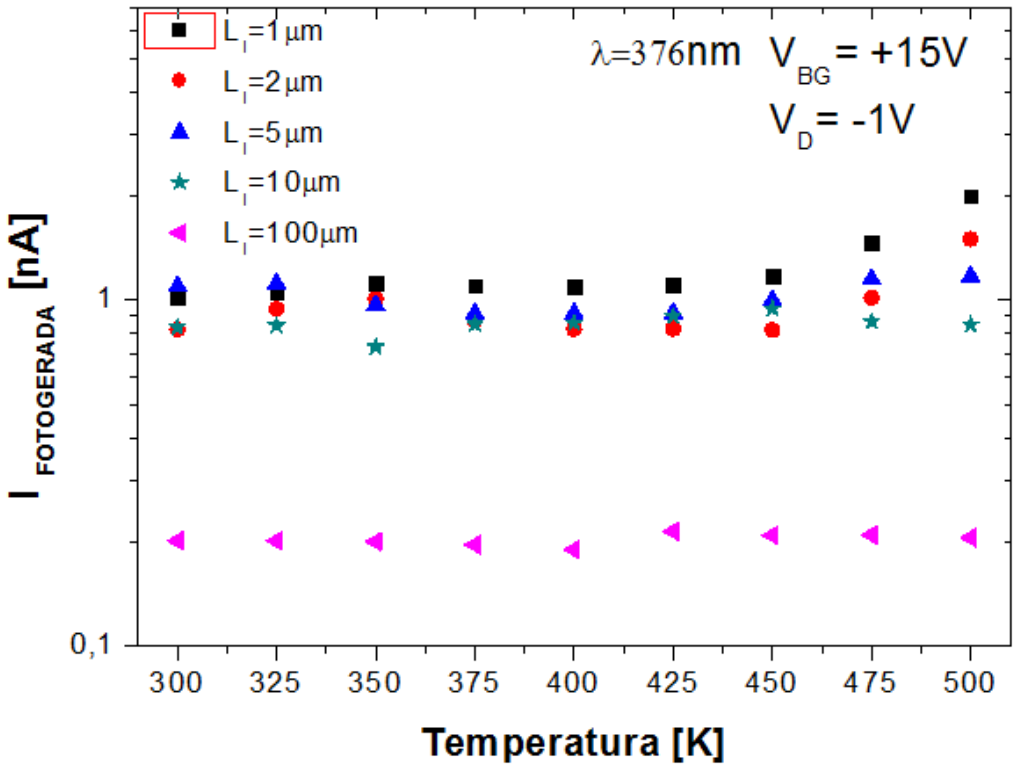
a) Análise da corrente fotogerada

Neste item serão analisados os efeitos da temperatura nas regiões de inversão e acumulação na corrente devida à fotogeração. O primeiro item a ser considerado será a corrente fotogerada (I_{FG}), que é de suma importância para análise da eficiência quântica total e relação sinal ruído do dispositivo.

De acordo com a Figura 132, quando o fotodiodo está operando no modo inversão (V_{BG}=+15V), verifica-se que a corrente devida à fotogeração aumenta com a temperatura, sendo mais evidente a partir de 400K. O aumento da (I_{FG}) está relacionado com o aumento do coeficiente de absorção (α_m) para altas temperaturas (KOVALEV, POLISSIK, *et al.*, 1996) (HARRISM, 2000). O aumento deste coeficiente, resulta numa menor profundidade de penetração (L_{ABS}), contribuindo com o aumento dos fotoportadores gerados dentro da RDD (DORKEL e LETURCQ, 1981). Pode-se considerar que, seria o mesmo efeito de diminuir o comprimento de onda da radiação, o que aumentaria a energia dos fótons, sendo que eles seriam absorvidos mais próximos à superfície do dispositivo. Além disso, a corrente é muito menor para o dispositivo com L_I=100µm, devido à grande taxa de recombinação de

portadores, já que o comprimento que os pares elétron-lacuna têm que se mover é muito elevado.

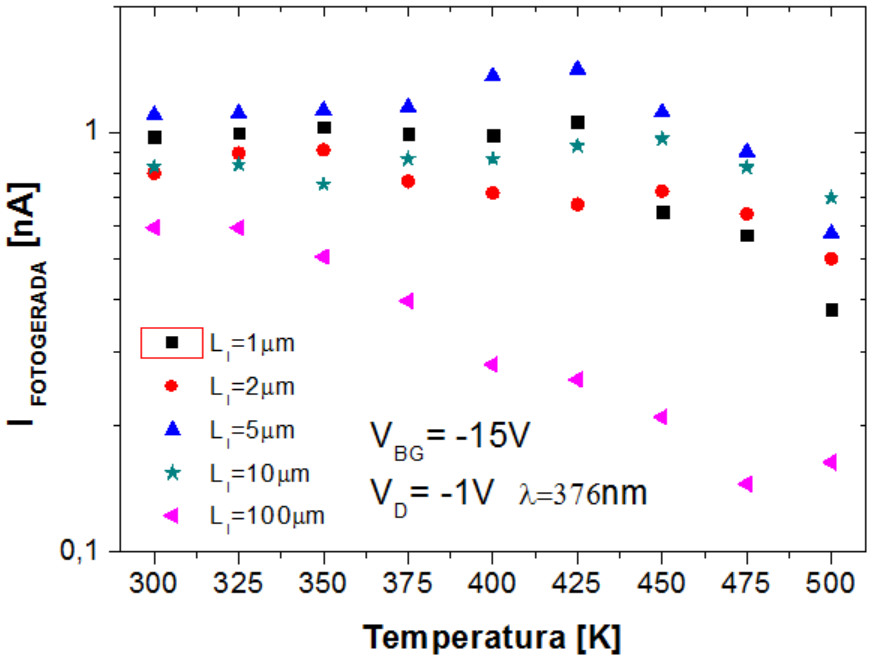
Figura 132 – Corrente fotogerada em função da temperatura para vários dispositivos em inversão (experimental).



Fonte: Autor

Entretanto este efeito é suprimido ao analisar-se o modo de acumulação, conforme Figura 133, que mostra a corrente fotogerada em função da temperatura para V_{BG}= -15V. Pode-se perceber, através desta figura, que há uma queda na corrente fotogerada conforme eleva-se a temperatura.

Figura 133 – Corrente fotogerada em função da temperatura para vários dispositivos em acumulação (experimental).



Fonte: Autor

É importante mencionar que o já citado efeito da redução da profundidade de penetração em altas temperaturas também acontece quando o dispositivo é polarizado no modo acumulação. Entretanto, há um outro mecanismo que se torna mais pronunciado, fazendo com que a corrente fotogerada caia com a elevação da temperatura. A explicação para o decaimento da corrente fotogerada em acumulação está relacionada com a redução do comprimento de difusão (L_{dif}) dos portadores, fazendo com que eles consigam percorrer uma distância menor dentro do fotodiodo, aumentando a sua taxa de recombinação e diminuindo a quantidade de corrente fotogerada. Como a concentração inicial da lâmina é de portadores do tipo P, ao se polarizar o dispositivo no modo de acumulação, aumenta-se a concentração de lacunas, fazendo com que a sua mobilidade caia. Como a mobilidade dos portadores é diretamente proporcional ao comprimento de difusão (conforme equação 62) (SZE, 1981), este último também sofre uma redução, o que reduz a corrente fotogerada.

$$L_{dif.} = \sqrt{\frac{\mu.\tau.K.T}{q}} \tag{62}$$

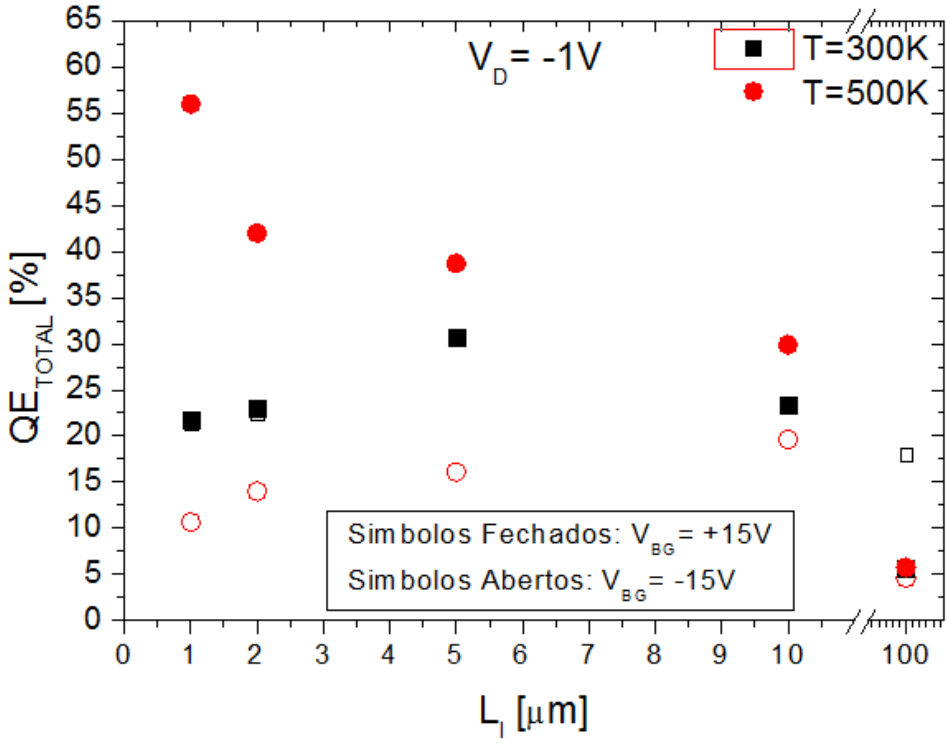
Tanto a mobilidade como o tempo de vida dos portadores são afetados pelo aumento da temperatura em acumulação. Estes parâmetros são mais pronunciados na Equação (62) mesmo que a temperatura seja uma variável diretamente proporcional ao ($L_{dif.}$).

b) Análise da eficiência quântica total

Tendo em vista os dois fenômenos inversos mencionados no item anterior, que alteram o comportamento da corrente fotogerada, haverá alteração significativa no que se refere à eficiência quântica total do dispositivo, já que ela está ligada à quantidade de fotoportadores gerados.

A fim de investigar a consequência na eficiência do fotodiodo em relação ao modo de operação, a Figura 134 mostra a eficiência quântica total (EQ_{TOTAL}) em função de (L_I) para alta temperatura (T=500K) e temperatura ambiente (T=300K). Quando o fotodiodo opera em temperatura ambiente (T=300K), a eficiência quântica total não possui praticamente nenhuma variação com a tensão de porta traseira (V_{BG}), independente do comprimento intrínseco. Em T=300K, a máxima eficiência quântica total encontrada foi para o comprimento L_I=5µm com EQ_{TOTAL}=33%. Já para T=500K, nota-se que as variações de V_{BG} são significativas para os regimes de acumulação e inversão. Entre os modos de operação, a maior eficiência quântica alcançável foi de EQ_{TOTAL}=56,2% para L_I=1µm no regime de inversão, devido ao aumento do coeficiente de absorção, que produz aumento na fotocorrente. Já em modo acumulação, a máxima eficiência quântica alcançável foi de 21,7% para L_I=10µm, pois no regime de acumulação a corrente fotogerada diminui em altas temperaturas em virtude da redução do comprimento de difusão ocasionada com o aumento da concentração de lacunas.

Figura 134 – Eficiência quântica total em função de L_I para duas temperaturas em acumulação e inversão (experimental).

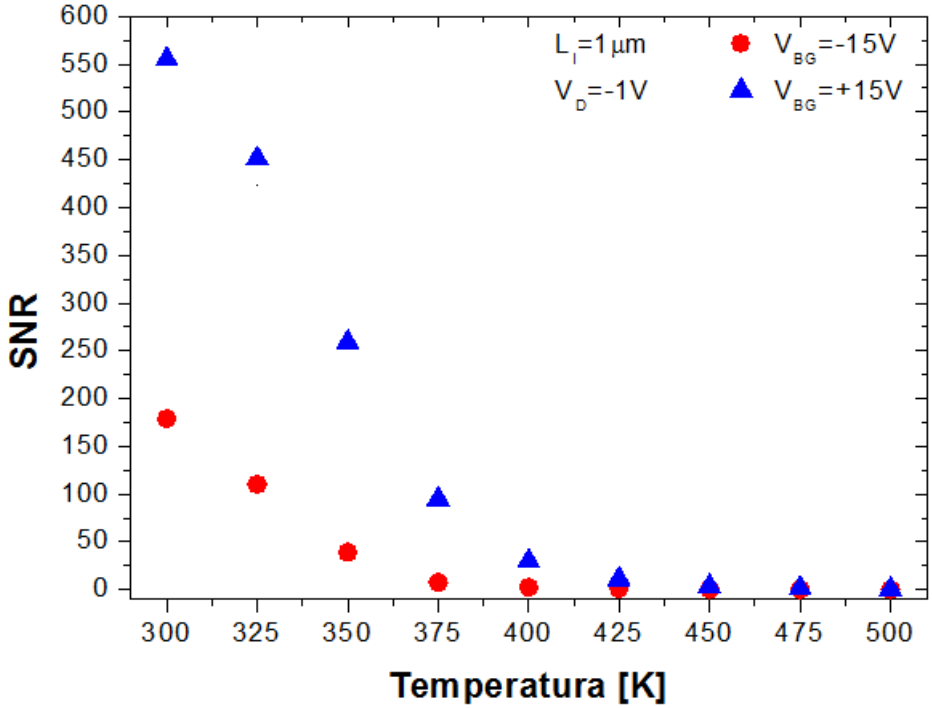


Fonte: Autor

c) Análise da relação sinal-ruído

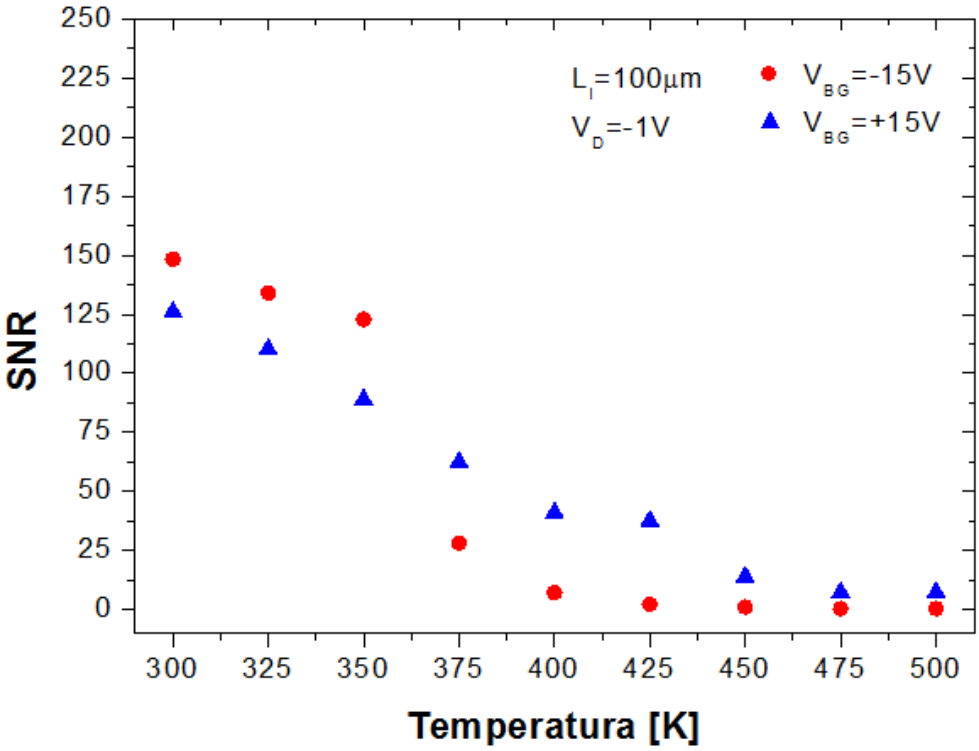
A análise da relação sinal-ruído (SNR) é muito importante, já que define o mínimo sinal detectável que o dispositivo pode operar. Desta forma, a Figura 135 e 136 mostram a relação sinal-ruído em função da temperatura para os dois modos de operação para o dispositivo com L_I=1µm e L_I=100µm respectivamente. Pode-se observar que em baixas temperaturas, a relação sinal-ruído (SNR) é maior, já que a corrente de escuro é baixa devido aos elétrons não terem energia suficiente para saltar da banda de valência para a banda de condução, acarretando numa baixa geração térmica de portadores. Os comprimentos intrínsecos pequenos apresentam maiores SNR comparados com grandes L_I, devido à baixa recombinação de portadores livres. À medida que a temperatura aumenta, a SNR é degradada violentamente devido ao fenômeno da geração térmica ser dominante, resultando no aumento da (I_{DARK}), independente do comprimento intrínseco.

Figura 135 – Relação sinal ruído em função da temperatura com diferentes V_{BG} no dispositivo com L_I=1µm (experimental).



Fonte: Autor

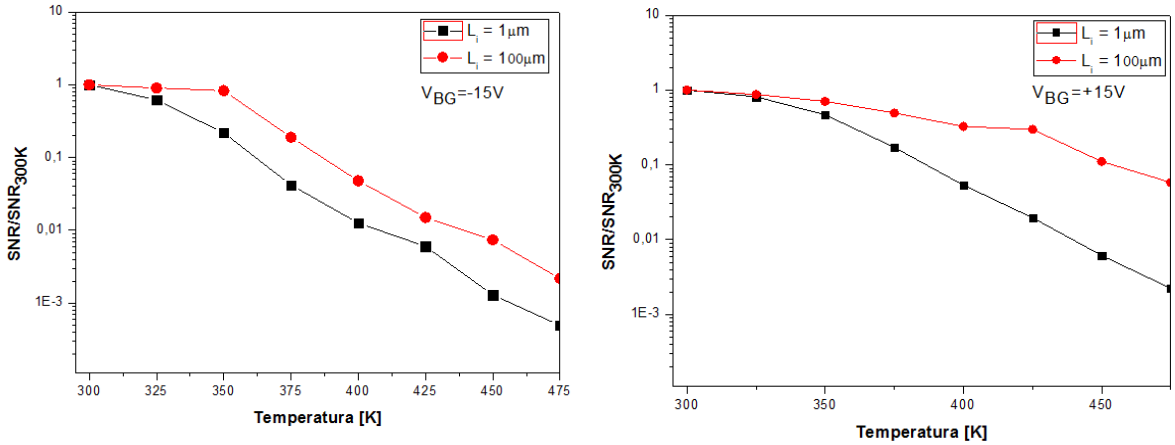
Figura 136 – Relação sinal ruído em função da temperatura com diferentes V_{BG} no dispositivo com L_I=100µm (experimental).



Fonte: Autor

Ao se normalizar a SNR em relação à temperatura ambiente é possível verificar o quanto esta figura de mérito é sensível às variações de temperatura para L_I=1µm e 100µm, conforme Figura 137 A e B. Independente do modo de operação (acumulação ou inversão), os dispositivos com comprimentos intrínsecos grandes (L_I=100µm) apresentam menor sensibilidade à temperatura com relação aos dispositivos com menores comprimentos intrínsecos (L_I=1µm). Se numa dada aplicação a SNR for importante, os fotodiodos com maiores valores de L_I serão mais robustos às variações de temperatura.

Figura 137 – Relação sinal ruído normalizada por T=300K em função da temperatura para: A) V_{BG}=-15V e B) V_{BG}=+15V (experimental).



(A) (B)

Fonte: Autor

8.2.6 Resultados Parciais para aplicações específicas em tecnologia de 0,13µm

Tendo em vista a complexidade dos fenômenos abordados, foi necessário realizar uma série de simulações numéricas a fim de explicitar os mecanismos físicos envolvidos no funcionamento dos diodos. Desta forma, no item 8.2, este trabalho debruçou-se sobre a explicação dos aspectos internos de operação, levando em conta as densidades de corrente dos diferentes portadores, a sua taxa de geração e recombinação e o seu tempo de vida.

Desta forma, foi possível elaborar um modelo elétrico equivalente a fim de esclarecer a inter-relação existente entre a polarização de anodo e a de *back-gate*. Além disso, foi analisada a dependência dos níveis de fotogeração com o comprimento da região intrínseca, mostrando que, em modo inversão, a corrente fotogerada aumenta com a elevação da temperatura. Já em acumulação, há um decréscimo na corrente fotogerada com a elevação da temperatura.

Finalmente foram levantadas as figuras de mérito para os dispositivos em questão, especialmente a eficiência quântica. Chegou-se a conclusão de que, caso a aplicação seja feita em altas temperaturas, deve-se polarizar o dispositivo em inversão, pois a eficiência pode chegar a 56,2% com a temperatura de 500K, contra apenas 21,7% na mesma temperatura no modo acumulação.

9 RESULTADOS PARA SENSORES UTILIZADOS EM DISCRIMINAÇÃO DE CORES

Este capítulo será dedicado à análise de diodos PIN utilizados para discriminar a radiação eletromagnética na faixa de comprimento de onda da luz visível. De forma geral, trata-se do desenvolvimento de um método para controlar a resposta espectral de um dispositivo semicondutor através da utilização de um sinal de controle. Este capítulo conterá cinco seções: a primeira será utilizada para elucidar o contexto de discriminação de cores, a segunda para apresentar os dispositivos desenvolvidos nessa tese, a terceira, para mostrar os resultados obtidos nos dispositivos estudados, a quarta para mostrar uma possível solicitação de patente e a quinta para apresentar um resumo dos resultados obtidos.

9.1 A DISCRIMINAÇÃO DE CORES

Neste item será explicada uma breve teoria sobre o que vem a ser discriminação de cores e como o dispositivo em questão pode ser utilizado para essa aplicação.

9.1.1 Colorimetria

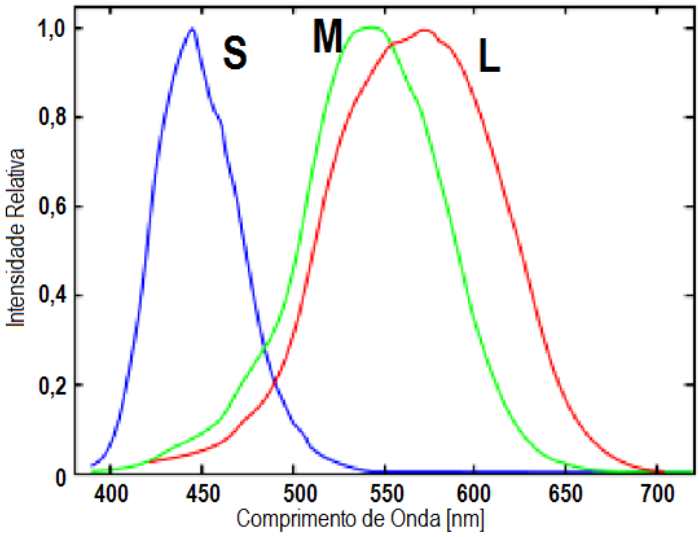
Colorimetria é a ciência, incluindo as tecnologias utilizadas, que quantifica e descreve fisicamente a percepção humana de cor (YOSHI, 2000). A percepção humana das cores é um processo subjetivo, no qual as diversas células cones dentro dos olhos respondem a estímulos luminosos que são enviados ao cérebro. Em essência, o que se define como cor, nada mais é que a resposta do cérebro a uma combinação de diferentes comprimentos de onda (STAR, 2005).

O olho humano possui três tipos de células cone que são sensíveis a três comprimentos de onda diferentes. Por conta disto, este sistema é chamado de visão tricromática. Os picos de sensibilidade de cada célula cone estão entre λ=420 e 440 nm para a primeira célula cone, entre 530 e 540nm para a segunda e entre 560 e 580nm para a terceira célula (WYSZECKY e STILES, 1981); (HUNT, 2004).

O gráfico da Figura 138 mostra a resposta de cada célula, normalizada pelo pico de sensibilidade, em cada comprimento de onda do espectro visível. Desta forma, a sensibilidade relativa deve ser 1 nos picos. As curvas são denominadas S (cone sensível à comprimentos de onda baixos), M (cone sensível à valores médios de comprimentos) e L (cone sensível à

valores altos de comprimentos de onda) que são siglas para *Small, Medium e Large* (KERR, 2010).

Figura 138: Curva de sensibilidade das células cone.



Fonte: "Adaptado de" (KERR, 2010)

Embora os cones tenham picos de sensibilidade em diferentes valores, as respostas à luz de cada cone se sobrepõem em certos comprimentos de onda. Considerando λ_1, λ_2 e λ_3 os comprimentos de onda no pico de sensibilidade das 3 células cones, a sua resposta para cada comprimento de onda (dos picos) é definido pelas equações 63, 64 e 65 segundo (HUNT, 2004).

$$Sensor\ 1\ - 100\%\ de\ \lambda_1, 0\%\ de\ \lambda_2\ e\ 0\%\ de\ \lambda_3 \tag{63}$$

$$Sensor\ 2\ - 0\%\ de\ \lambda_1, 100\%\ de\ \lambda_2\ \ e\ \ 50\%\ de \lambda_3 \tag{64}$$

$$Sensor\ 3\ - 0\%\ de\ \lambda_1, 70\%\ de\ \lambda_2\ e\ \ 100\%\ de\ \lambda_3 \tag{65}$$

Logo, o cone S (sensor 1) sente 100% de λ_1 e 0% de λ_2 e λ_3, o cone M (sensor 2) sente 0% de λ_1, 100% de λ_2 e 50% de λ_3 e o cone L (sensor 3) sente 0% de λ_1, 70% de λ_2 e 100% de λ_3 aproximadamente. A partir deste comportamento, é possível emular uma "cor" através da combinação de outras cores. Na realidade, com frequência, usa-se da dinâmica das células cones para criar uma "ilusão", da mesma forma que ocorre em monitores de TV, por exemplo, quando tintas são misturadas ou quando se vê branco onde na realidade são raios de inúmeras cores incidindo, devido à velocidade da mudança das cores, da mesma fonte. Em tal sistema

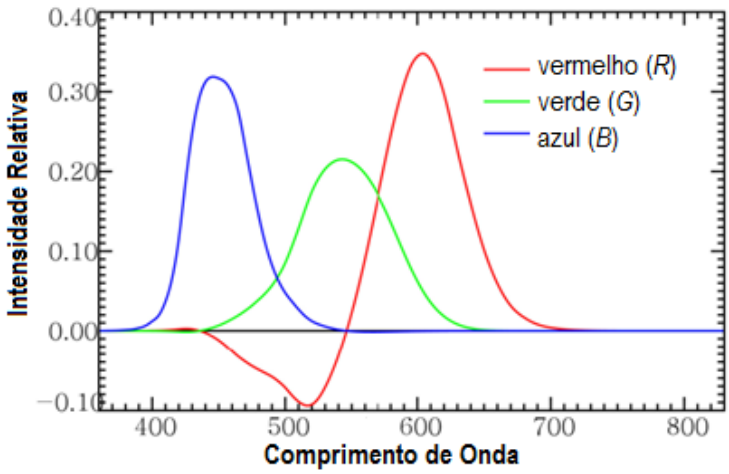
de reprodução de cores, as cores utilizadas para criar a ilusão são chamadas de cores base (KERR, 2010).

Utilizando os comprimentos de onda nos picos (λ_1, λ_2 e λ_3) como cores base, pode-se formar uma cor apenas variando a intensidade das cores base. Dessa forma, com a variação da quantidade relativa das cores primárias, uma enorme gama de cores pode ser produzida.

9.1.2 O sistema RGB

Por volta dos anos de 1920's, William David Wright e John Guild fizeram inúmeras experiências para medir indiretamente a resposta das células cone (MURRAY, 2006). Os experimentos foram conduzidos com voluntários para criar uma medida de referência que fosse mais significativa, uma vez que é impossível medir com precisão a sensibilidade dos cones a determinados comprimentos de onda (KERR, 2010). Uma experiência utilizando as cores primárias: vermelha (700nm), verde (546,1nm) e azul (435,8nm) resultou no gráfico da Figura 139.

Figura 139: Intensidade das cores base utilizadas para reproduzir todo o espectro visível.



Fonte: "Adaptado de" (MURRAY, 2006)

No experimento citado, os voluntários humanos eram colocados em frente a um monitor que mostrava duas telas, uma mostrando uma luz monocromática (formada por um comprimento de onda) e outra mostrando uma composição ajustável tricromática formada pelos comprimentos de onda, citados anteriormente, λ_1, λ_2 e λ_3. Para cada pessoa, uma luz monocromática era apresentada e esta deveria ser reproduzida através do ajuste das cores primárias que compunham a parte ajustável do monitor. Observou-se que para atingir certas

cores, era preciso aumentar a quantidade de vermelho da luz monocromática, o que corresponde a uma quantidade negativa desta componente na parte ajustável da tela (KERR, 2010).

O experimento de Wright e Guild resultou na criação de um sistema denominado de RGB, com o qual é possível determinar os valores das intensidades das cores vermelha (*R*), verde (*G*), e azul (*B*) para formar qualquer cor, a partir da distribuição espectral da cor a ser formada (WRIGHT, 1928).

Pode-se demonstrar que, utilizando cores monocromáticas como cores primárias, uma das componentes será negativa em alguma região do espectro conforme pode ser observado na Figura 139. Para superar este problema foi criado um sistema onde as componentes nunca eram negativas. Isto foi feito convertendo a base de cores primárias utilizadas, através de um tratamento matemático, para outro sistema que utiliza outra gama de cores base que ficou conhecido como CIE XYZ (FAIRMAN, BRILL e HEMMENDINGER, 1998). Logo, é razoável assumir que o sistema CIE XYZ é capaz de representar todas as cores observáveis pelo ser humano usando componentes positivos de cores base.

Portanto, a capacidade de detectar cores de um sensor depende de quais cores este consegue genuinamente captar. Desta característica, pode-se entender a importância da colorimetria no estudo de sensores de luz. Assim, por exemplo, os monitores de computador, televisores são exemplos típicos de aplicação de cores aditivas. Um exame cuidadoso nestes aparelhos irá revelar que cada pixel é formado por subpixels vermelhos, azuis e verdes. Estes subpixels não estão sobrepostos, mas vistos de certa distância, estes se sobrepõem na retina, produzindo o mesmo resultado que uma fonte externa, na cor resultante da mistura, causaria (JUNICHI, 2005). Já as câmeras digitais utilizam o mesmo conceito para detectar as cores. O primeiro experimento com o modelo RGB em fotografia foi realizado em 1861 por James Clerk Maxwell, envolvendo três diferentes *takes* de cores filtradas (HIRSCH, 2004). Para realizar a fotografia, três projeções alinhadas sobre uma tela em uma sala escura foram necessárias.

Uma cor no modelo RGB é descrita indicando quanto de cada uma das cores primárias está incluída. A cor é expressa em uma tripla (R, G e B), na qual cada componente pode variar de zero até um valor máximo definido. Se todos os valores estão em zero, o resultado é preto. À medida que todos estão no valor máximo, o resultado é mais branco possível (JANG, KIM, *et al.*, 2005).

A variação dos valores pode ser quantificada de diversas formas (JANG, KIM, *et al.*, 2005):

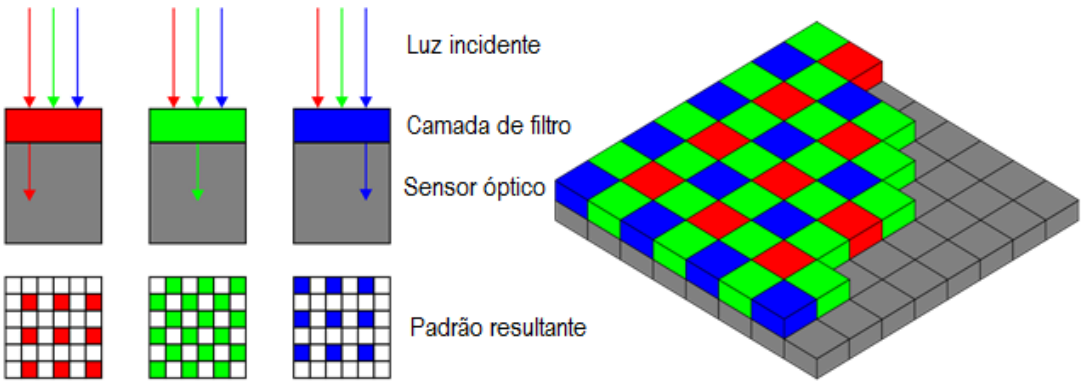
a) De 0 a 1, com qualquer fração intermediária. Sendo este utilizado em análises teóricas e sistemas com representação de ponto flutuante em computação.
b) Cada valor pode também ser uma porcentagem, de 0% a 100%.
c) Em computação, é comum utilizar um valor inteiro para cada componente variando entre 0 e 255 (variação que um único byte consegue representar).
d) Equipamentos de imagem digital de alta fidelidade (os chamados *high-end*) permitem maiores variações de valores, tais como de 0 a 1023 (10 bits), de 0 a 65535 (16-bits) e até 32-bits, 48-bits e 64-bits.

9.1.3 A discriminação de cores

De qualquer forma, é necessário que a luz incidente em um sensor de detecção de imagens seja separada (discriminada) e quantificada. Em televisores coloridos e câmeras de vídeo fabricadas antes dos anos 90, a luz incidente era separada por prismas e filtros em três cores primárias (tons de R, G e B) e essas três componentes incidiam em três tubos de raios catódicos (JUNICHI, 2005). Com o surgimento da tecnologia CCD (*charge-coupled device*), nos anos 1980, e com integração de circuitos em alta escala, os tubos catódicos foram substituídos por inviabilidade industrial. Os dispositivos sensores foram simplificados, tornando-os menores, com menos componentes ópticos e mais baratos. Entretanto, filtros de cor ainda são necessários uma vez que fotosensores típicos detectam intensidades de luz com pouca ou nenhuma informação sobre comprimento de luz e, portanto, não são capazes de discriminar cores (JUNICHI, 2005).

Atualmente, o sistema CFA (*color filter array*) é utilizado para efetuar a separação de cores. Ele é um mosaico, formado por pequenos filtros de cor, colocado sobre um sensor de luz para captar informação de cor, conforme pode ser observado na Figura 140. O mais comum desses filtros é o do tipo *Bayer*, que separa a luz por comprimento de onda, de forma que as intensidades luminosas possuem informação de cor (FARSIU, ELAD e MILANFAR, 2006). Como visto na Figura 138, o ser humano é mais sensível aos comprimentos de onda entre o verde e vermelho dentro do espectro visível, por este motivo existem mais pontos verdes no filtro do que vermelhos e azuis (proporção de 1:2:1 para vermelho, verde e azul respectivamente). Assim as imagens captadas parecem mais nítidas para um observador humano (FARSIU, ELAD e MILANFAR, 2006).

Figura 140: o filtro *Bayer* para separação de cores



Fonte: "Adaptado de" (FARSIU, ELAD e MILANFAR, 2006)

A imagem inicial captada através do uso do Bayer Filter é então convertida para uma imagem totalmente colorida através de um Algoritmo de Interpolação (*Demosaicing Algorithm*) para colocar a imagem em um formato mais nítido. Este algoritmo reconstrói a imagem colorida completa das amostras incompletas. Logo, a transmitância espectral do filtro junto com o algoritmo de interpolação, irá definir a qualidade da imagem (KODAK, 2003). Dessa forma, a reconstrução da imagem se torna um processo complexo, sujeito a introdução de artefatos coloridos, baixa resolução, e ruído (KODAK, 2003).

O intuito desta tese é desenvolver um dispositivo que dispense a utilização dos filtros CFA, introduzindo no próprio fotodiodo a separação de cores, a fim de diminuir o custo do sistema de detecção óptica e torná-lo mais imune a todo o tipo de artefatos já mencionados. Alguns dispositivos que utilizam esse conceito já foram apresentados pela comunidade científica e serão apresentados a seguir.

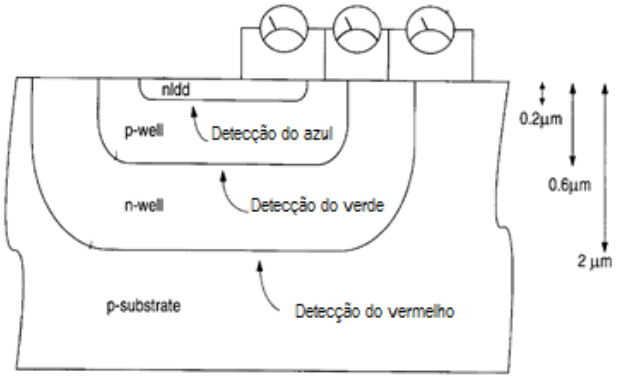
9.1.4 Dispositivos discriminadores de cores

a) Sensor Foveon X3.

Um dispositivo criado por Richard Billings Merrill em 1998, chamado Foveon X3, utiliza a diferença na profundidade de absorção de cada comprimento de onda como ferramenta para discriminação de cores. Este dispositivo, representado na figura 141, dispensa a utilização de filtros CFA, reduzindo os artefatos e ruídos (MERRIL, 1999) e pode ser eletricamente caracterizado como uma "pilha" de fotodiodos. Assim, os comprimentos de

onda correspondentes à cor azul são captados na junção mais rasa, aqueles correspondentes à cor verde são captados na junção intermediária e os correspondentes à cor vermelha são captados na junção mais profunda. Uma de suas caraterísticas mais importantes é o grande tamanho da área fotossensível, além de poder ser fabricado em processos de fabricação CMOS usuais (MERRIL, 1999).

Figura 141: Foveon X3



Fonte: "Adaptado de" (MERRIL, 1999)

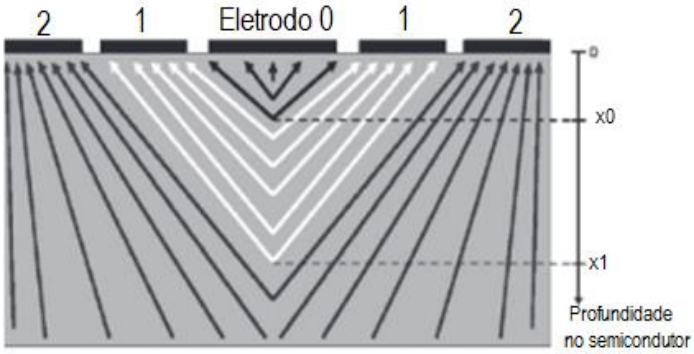
b) O conceito do dispositivo TFD

O dispositivo TFD tem o mesmo intuito do Foveon X3, que é a discriminação de diferentes cores no mesmo dispositivo, sem a utilização de filtros de cor *CFA*. Assim como no Foveon X3, o TFD utiliza a propriedade da profundidade de penetração dos diferentes comprimentos de onda para a diferenciação de cores. Entretanto, este não possui junções "empilhadas" na vertical e localizadas nas profundidades correspondentes às regiões onde os fótons de interesse são absorvidos, mas utiliza campos elétricos para fazer o mesmo trabalho que as junções fariam (LONGONI, ZARAGA e BOMBELLI, 2008).

Sabe-se que baixos comprimentos de onda visíveis possuem profundidade de penetração de algumas centenas de nanômetros, enquanto que fótons de altos comprimentos de onda são absorvidos em profundidades de 4 a 5 µm no substrato (SZE, 1981). De uma única região de depleção, diferentes comprimentos de onda são captados através da aplicação de diferentes tensões nos eletrodos, gerando campos elétricos que captam cargas em diferentes profundidades, conforme pode ser observado na Figura 142 (LONGONI, ZARAGA e BOMBELLI, 2008). Podem ser observadas as linhas de campo geradas pelos cinco eletrodos de silício N difundidos sobre uma espessa região P As linhas de campo representam o caminho que os elétrons seguem e mostram que o eletrodo "0" capta portadores

principalmente da profundidade até x0, os eletrodos “1” captam portadores absorvidos de x0 a x1 e os eletrodos “2” captam os portadores do restante da região. Diferentes tensões nos eletrodos deve alterar a estrutura das linhas de campo, alterando a resposta do dispositivo aos comprimentos de onda (LONGONI, ZARAGA e BOMBELLI, 2008).

Figura 142: O dispositivo TFD



Fonte: “Adaptado de” (LONGONI, ZARAGA e BOMBELLI, 2008)

9.2 APRESENTAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DISCRIMINADORES DE CORES DESENVOLVIDOS NESTA TESE.

Para a análise em questão foram desenvolvidos diodos especiais, abrangendo desde o projeto e a elaboração do leiaute. A fabricação destes dispositivos se deu através do *MOSIS Educational Program* (Mosis., 2015) em tecnologia SiGe da IBM de 0,13µm. Eles apresentam um perfil de dopagem de P+ P- N+. Os principais parâmetros (concentrações de dopantes e dimensões importantes) podem ser vistos na Tabela 15.

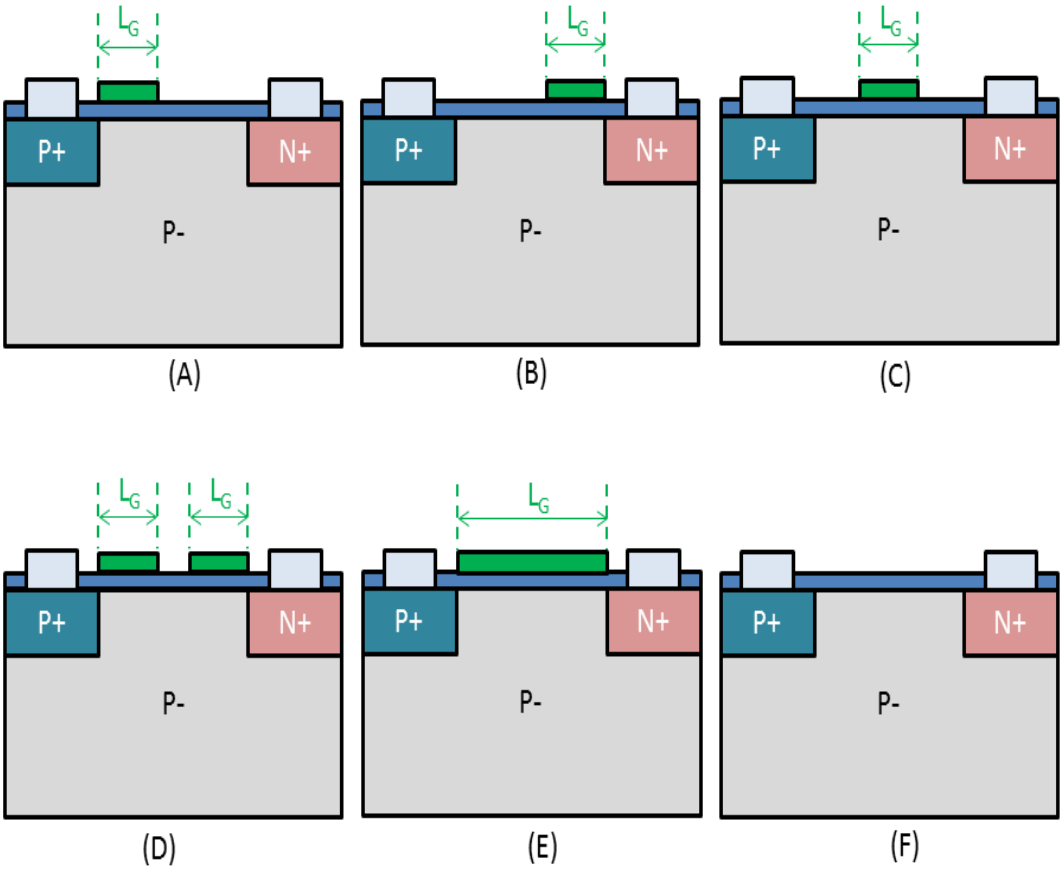
Tabela 15 – Principais parâmetros dos diodos em tecnologia IBM 0,13µm.

Parâmetro	Dimensão
Comprimento da região p e n (L_P e L_N)	**6,5 µm**
Comprimento da região intrínseca (L_I)	**11 µm**
Espessura do óxido de campo (t_{ox})	**13,8 nm**
Espessura da junção (t_P,t_N)	**0,15 µm**
Concentração intrínseca (N_I)	**$6x10^{16}cm^{-3}$**
Concentração da região P+ (N_{P+})	**$1x10^{19}cm^{-3}$**
Concentração da região N+ (N_{N+})	**$1x10^{20}cm^{-3}$**

Fonte: Autor

Os dispositivos foram desenvolvidos a fim de estudar o melhor posicionamento e tamanho do terminal de porta a fim de garantir uma eficente discriminação de cores. Para isso, foram construídos seis diferentes diodos, que estão apresentados na Figura 143 A a F. Na Figura 143-A é apresentado o dispositivo chamado de *Left Gate*, que possui o gate adjacente à região P+. Na Figura 143-B é apresentado o dispositivo chamado de *Right Gate*, que possui a porta adjacente à região N+. Na Figura 143-C é apresentado o dispositivo chamado de *Center Gate*, que possui a porta exatamente no meio da região intrínseca. Na Figura 143-D é apresentado o dispositivo chamado de *Dual Gate*, que possui dois terminais de porta, um adjacente à região P+ e outro adjacente à região N+. Na Figura 143-E é apresentado o dispositivo chamado de *Full Gate*, que possui um terminal de porta sobre toda a região intrínseca do diodo. E finalmente, na Figura 143-F é apresentado o dispositivo chamado de *No Gate*, que não possui o terminal de porta e será utilizado apenas para comparação. Todos os dispositivos foram projetados com a mesma área total. A análise desses diodos tem como principal objetivo determinar a sua eficiência na detecção de cores. Espera-se que diferentes tensões nos terminais do dispositivo proporcionem sensibilidade para diferentes comprimentos de onda.

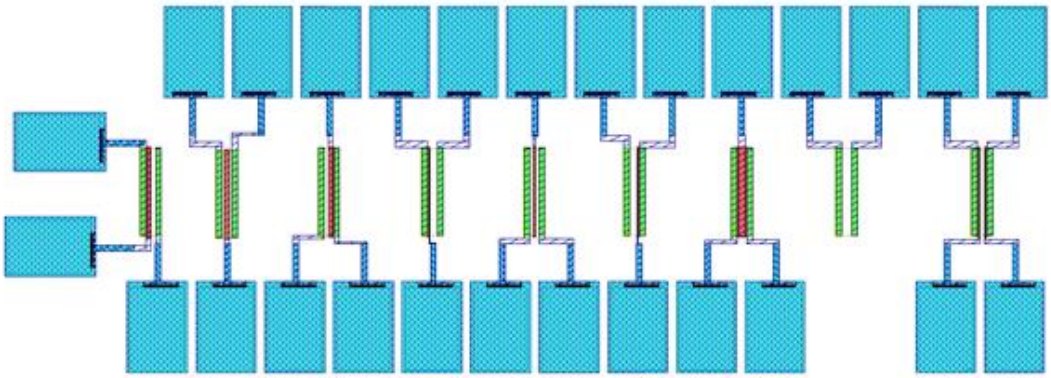
Figura 143 – Diferentes dispositivos construídos em tecnologia IBM 0,13um: A) Right Gate, B) Left Gate, C) Center Gate, D) Dual Gate, E) Full Gate e F) No Gate.



Fonte: Autor

A Figura 144 mostra o leiaute real desenvolvido no software *IC Station* da *Menthor Graphics*, no qual, em azul, podem-se observar os contatos de cada dispositivo. As junções (regiões P+ e N+) estão em verde no leiaute. As portas de Silício poli cristalino estão em vermelho. As regiões do circuito integrado onde não há dopagem (que possuem a dopagem da lâmina), são as regiões em branco do leiaute. Todos os dispositivos possuem as mesmas dimensões, e as mesmas dopagens, diferindo-se entre si, apenas no posicionamento e comprimento da porta.

Figura 144 – Leiaute dos dispositivos no software *IC Station*.

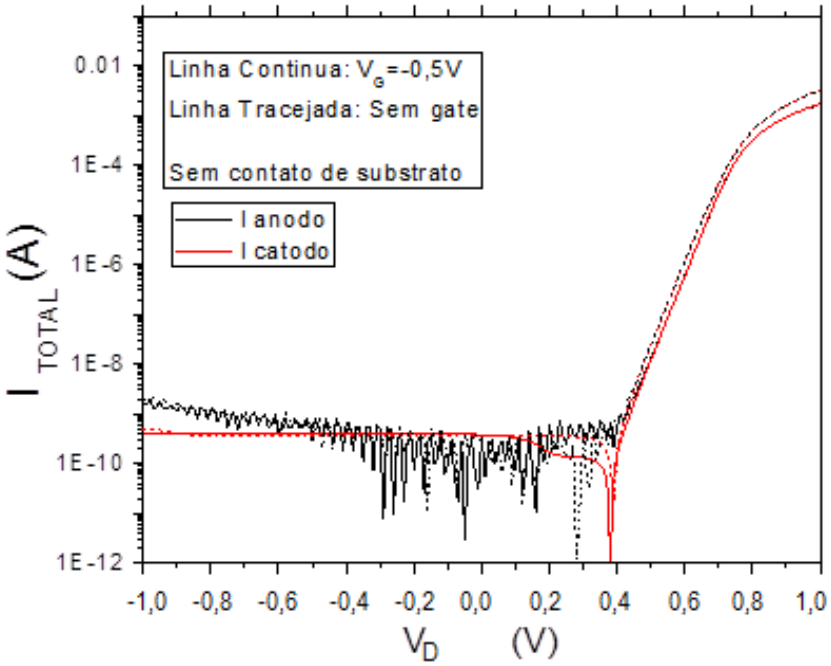


Fonte: Autor

9.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA SENSORES UTILIZADOS NA DISCRIMINAÇÃO DE CORES

A Figura 145 mostra a corrente de anodo e de catodo em função da tensão de anodo quando o dispositivo *Full Gate* com L_I=11µm não possui contato de corpo, ou seja, o substrato está flutuando. A iluminação foi feita por radiação luminosa na faixa do vermelho, sendo que a linha contínua indica que o terminal de porta não foi polarizado e a linha pontilhada indica tensão de porta (V_G) de -0,5V. Pode-se verificar que, nesta situação, a corrente de anodo é igual à de catodo, independente de haver ou não polarização do terminal de porta. Isso era esperado já que não há terminal de substrato e todos os portadores que "saem" do anodo terão que "chegar" ao catodo.

Figura 145 – Corrente do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de anodo sem contato de corpo (experimental).



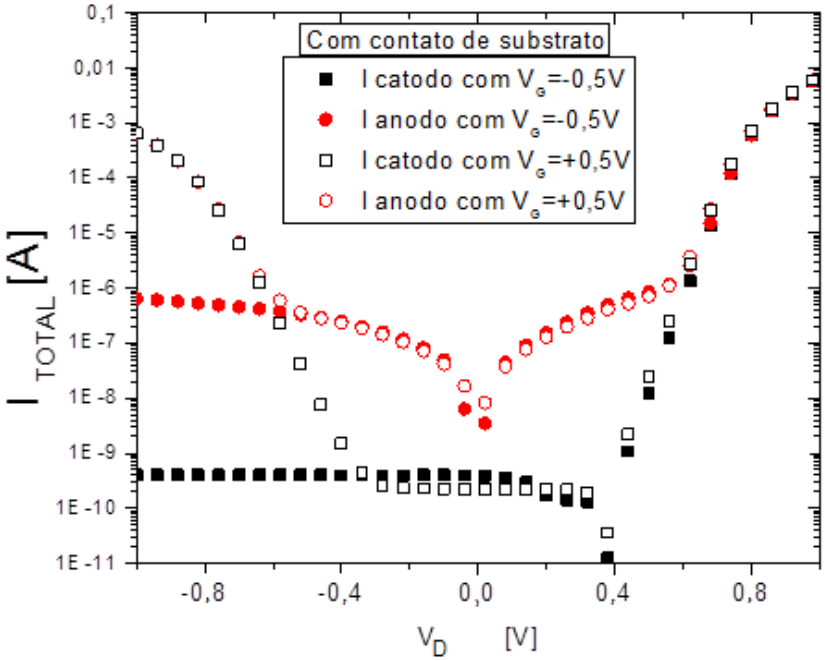
Fonte: Autor

Ao se polarizar o contato de substrato, há mudança no comportamento (Figura 146), pois agora flui corrente através do terminal de substrato e as correntes de anodo e catodo não são mais iguais. A corrente de anodo agora, é na verdade, uma corrente de substrato, pois entre anodo (região P+) e o substrato forma-se um resistor, conforme pode ser visto no esquema apresentado pela Figura 147. Esta corrente de anodo é apresentada na Figura 146 pelos símbolos vermelhos, e possuem, em média, três ordens de grandeza a mais que a corrente de catodo. Outra observação é que a corrente de anodo é simétrica em relação ao zero volt de tensão de anodo, pois a corrente pode fluir em direção ao substrato ou em direção ao anodo. Já a corrente de catodo é uma corrente típica de junções PN, cujo V_{BI} é próximo de 0,4V e ela flui através da região intrínseca (P-) e do catodo (N+).

A polarização do terminal de porta produz diferença na corrente de catodo somente para polarização positiva (V_G=+0,5V), de forma que a região intrínseca esteja em modo de inversão. Pode-se observar um aumento na corrente de catodo para V_D<-0,4V, o que faz com que a corrente de catodo supere a de substrato e, portanto, seja igual à corrente de anodo. Este comportamento provavelmente se dá pela presença de um offset, ou deslocamento da porta sobre as regiões altamente dopadas, induzindo o fenômeno conhecido como GIDL (gate

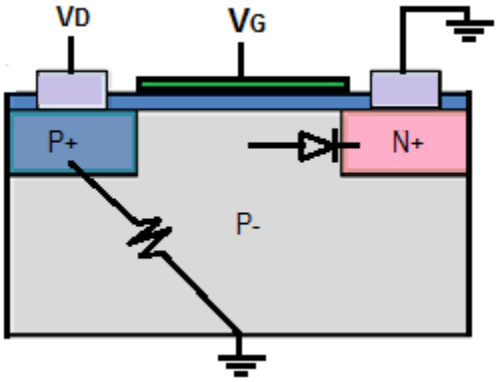
induced drain leakage), fazendo com que haja um súbito aumento da corrente de catodo para tensões de anodo mais reversas.

Figura 146 – Corrente do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de anodo com contato de corpo (experimental).



Fonte: Autor

Figura 147 – Esquema do dispositivo com contato de corpo

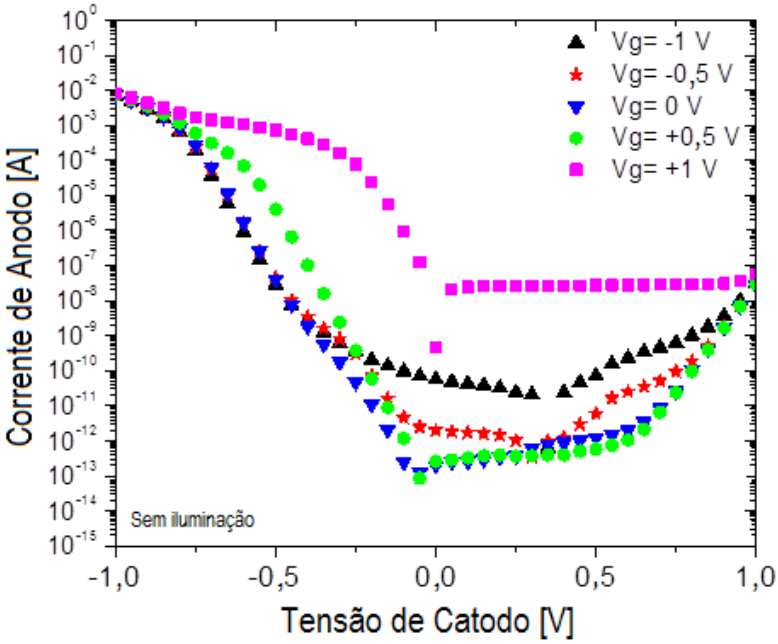


Fonte: Autor

A corrente total do dispositivo *Full Gate* em função da tensão aplicada ao catodo (Vcat) é apresentada na Figura 148 sem iluminação. Neste caso, aplicaram-se cinco tensões de porta (Vg): -1 V, -0,5 V, 0 V, +0,5 V e +1 V com o contato de anodo e substrato polarizados em zero Volt.

A influência de Vg é muito importante no desempenho dos fotodiodos, uma vez que modifica o modo de operação (inversão, acumulação ou depleção), como já foi visto nos capítulos anteriores. A tensão de porta pode ser usada, neste caso, para alterar a corrente de escuro do dispositivo, pois ela influencia diretamente no tamanho da região de depleção, o que, por sua vez, varia diretamente a taxa de recombinação / geração do portador. Portanto, se a região de depleção for grande o suficiente, os pares de elétrons-lacunas gerados termicamente alcançarão facilmente as regiões catodo / anodo. Na figura em questão, a maior corrente de escuro foi obtida para Vg de +1 V, pois aplicando Vg positivo, a região intrínseca atuará como tipo N, o que irá estender a região de N + (região do catodo), resultando em uma redução do comprimento do L_I, reduzindo assim a taxa de recombinação. Esse fato ocorreu apenas com Vg de + 1V, pois esta foi a polarização capaz de atrair elétrons suficientes para ocorrer essa redução de L_I.

Figura 148 – Corrente de anodo do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de catodo sem iluminação (experimental).



Fonte: Autor

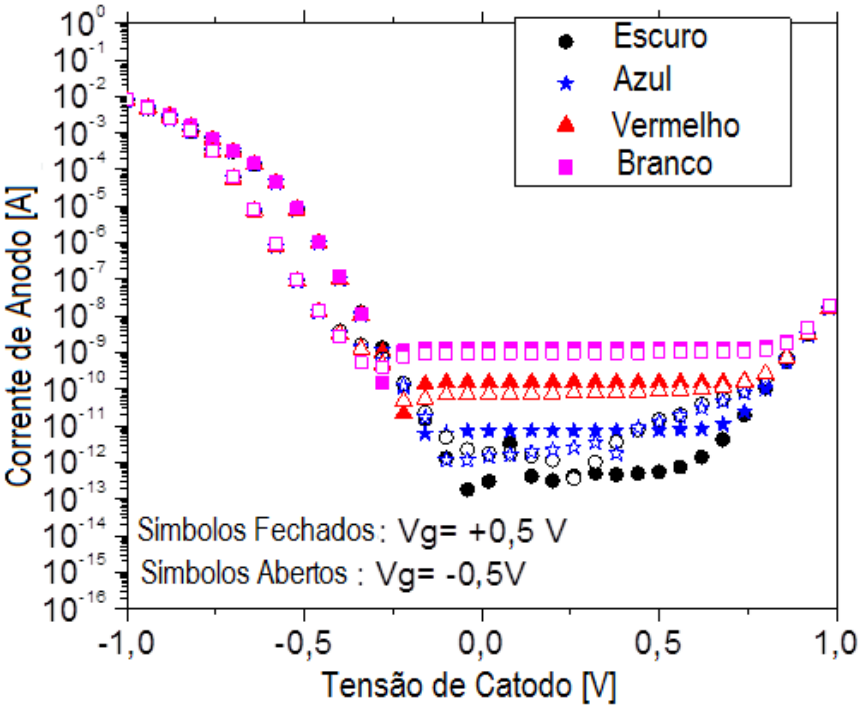
Para melhor compreensão da influência do terminal de porta, a corrente total do anodo em função da tensão aplicada do catodo é apresentada na Figura 149 (para Vg = +0,5 V e Vg = -0,5 V). Nesta figura, temos quatro situações: o caso sem iluminação e o diodo sob a incidência de três comprimentos de onda diferentes (luz azul com λ = 457nm, luz vermelha

com λ = 637 nm e luz branca). A radiação luminosa azul e vermelha tem a mesma potência óptica incidente de 0,28μW.

É claramente visto que quanto maior o comprimento de onda, maior a corrente fotogerada, devido à longa profundidade de penetração do silício para altos comprimentos de onda (COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A., 2002). Por outro lado, para a radiação eletromagnética azul, o dispositivo apresenta corrente fotogerada inferior, uma vez que a luz é absorvida muito próxima da superfície do silício, onde a recombinação da superfície é maior (SZE, 1981).

Comparando as curvas, é possível notar que a polarização de porta influencia mais a resposta da luz azul do que as outras, um fato muito importante, pois a sua polarização pode ser ajustada corretamente para melhorar o desempenho do diodo, fazendo com que haja discriminação dos diferentes comprimentos de onda.

Figura 149 – Corrente de anodo do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de catodo (experimental).

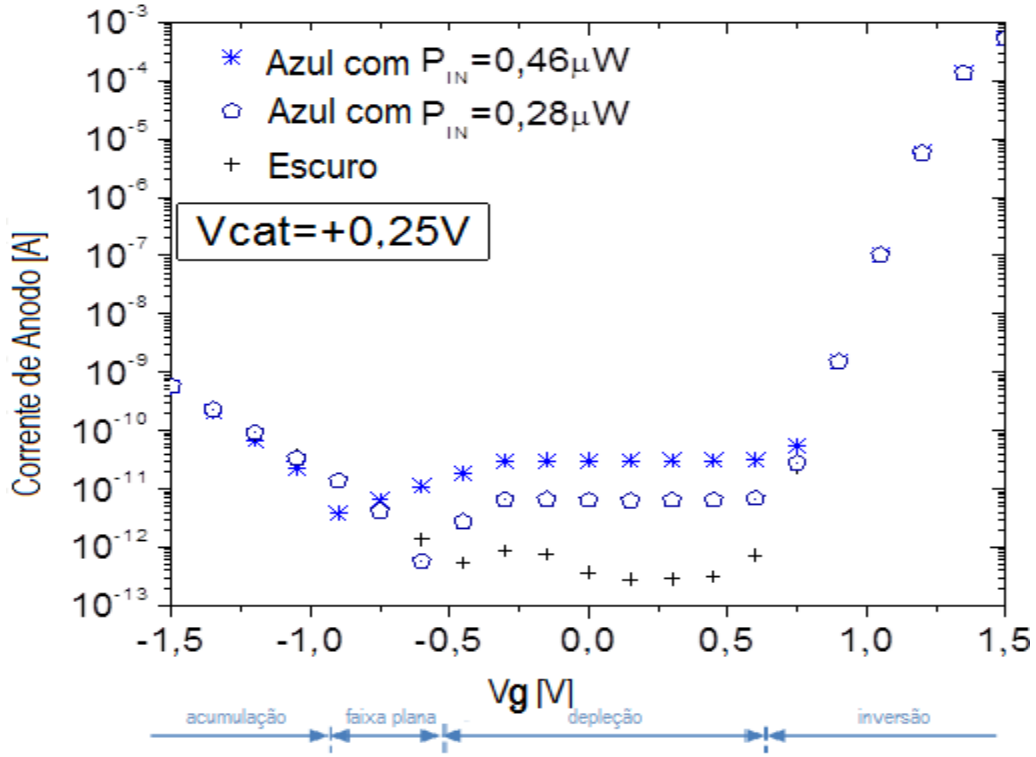


Fonte: Autor

Para explorar o fato de que a polarização de porta teve um efeito pronunciado na fotocorrente para os comprimentos de onda curtos, foram realizadas medições em função de Vg mostradas na Figura 150. Neste caso, foram consideradas duas intensidades de potência incidente (P_{IN}) de 0,46 μW e 0,28 μW para o mesmo comprimento de onda (λ = 457nm). A

corrente de escuro foi plotada também para comparação. Como esperado, o terminal de porta gerou diferentes correntes de anodo devido à mudança no modo de operação em relação à região intrínseca. No caso de Vg de -0,5 V até + 0,6 V, a corrente do anodo pode ser considerada quase constante, então, assumimos, neste caso, que a região de depleção atingiu seu valor máximo. Por outro lado, quando Vg é superior a + 0.6V, a corrente tem um aumento abrupto significando que a tensão de limiar foi alcançada e, a iluminação não produziu nenhuma diferença no nível de corrente. Além disso, para Vg menor do que - 0,5 V, pode-se verificar uma diminuição da corrente e, em seguida, um aumento. Isso ocorre pois ao diminuir a tensão de porta, o modo de operação do diodo passa da depleção para a faixa plana (menor corrente) e, em seguida, para o modo de acumulação (Vg <-0,8V), onde a corrente novamente não mostra a diferença produzida por diferentes intensidades de potência óptica. Portanto, o uso de um terminal de porta acima da região intrínseca é de grande importância, uma vez que pode melhorar a fotocorrente, especialmente quando o dispositivo estiver em modo depleção.

Figura 150 – Corrente de anodo do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de porta para duas potência ópticas de azul diferentes (experimental).

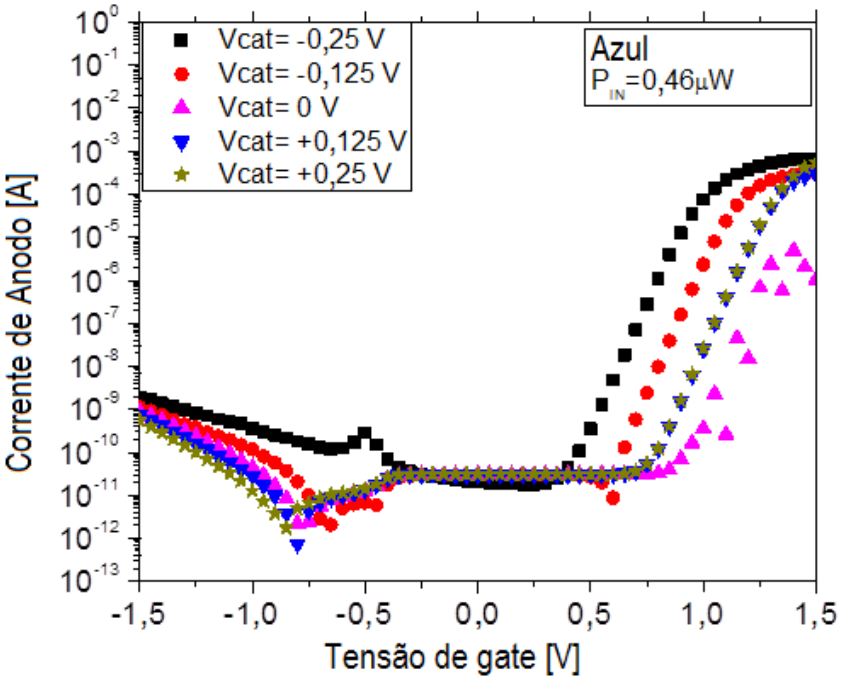


Fonte: Autor

Outra questão importante a ser considerada é o efeito da tensão do catodo, a qual pode ser observada na Figura 151, mostrando a corrente do anodo em função da tensão de porta para luz azul, com diferentes polaridades do catodo.

Pode ser observado que a mudança na tensão do catodo afeta a tensão limiar, porque altera o potencial do substrato. Para Vcat = -0,25V, a tensão de limiar é de aproximadamente 0,81V, enquanto que para Vcat = + 0,25V, a tensão de limiar é de cerca de 0,42V. De fato, a mudança na polarização de catodo afeta a tensão de faixa plana do dispositivo também. Quando a largura máxima de depleção é alcançada (-0,38 <Vg <+0,41), não há alteração na corrente do anodo devido ao aumento da tensão do catodo, o que já era esperado, uma vez que toda a região intrínseca está completamente depletada.

Figura 151 – Corrente de anodo do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de porta para diferentes polarizações de catodo (experimental).



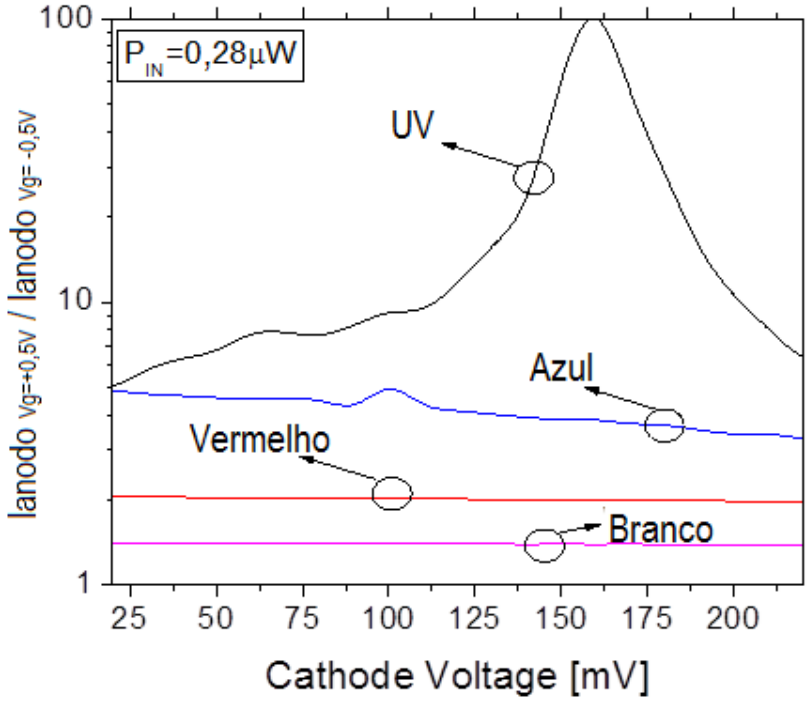
Fonte: Autor

Para comparar o efeito da polarização do terminal de porta na corrente de anodo produzida por diferentes cores da radiação eletromagnética, a Figura 152 mostra a relação entre a corrente de anodo produzida por Vg = + 0.5V e Vg = -0.5V com UV (λ = 398nm), Azul (λ = 457nm), vermelho (λ = 637nm) e luz branca, com P_{IN} = 0,28µW. Quando a tensão de catodo varia de 29mV a 240mV, a luz UV apresentou a maior variação de corrente entre eles, alcançando uma variação de 99,8 com Vcat = 163mV, seguido da luz azul, vermelha e

branca. Estes resultados podem ser explicados pelo fato da radiação luminosa possuir menor profundidade de absorção para comprimentos de onda mais curtos. Isso faz com que o terminal de porta seja mais efetivo para a radiação eletromagnética azul, já que ela possui a menor profundidade de absorção.

Além disso, a partir dos resultados mostrados, como a capacidade de resposta da luz de comprimento de onda mais curto pode ser aumentada, é possível ajustar a discriminação seletiva da cor em fotodiodos *Full gate* aplicando uma correta polarização ao terminal de porta.

Figura 152 – Relação entre as correntes de anodo do dispositivo *Full Gate* em função da tensão de porta para diferentes comprimentos de onda (experimental).



Fonte: Autor

Com o objetivo de tornar este efeito mais quantitativo, a Tabela 16 traz uma comparação entre as operações do dispositivo em termos de responsividade para diferentes comprimentos de onda. Como pode ser visto nesta tabela, a capacidade de resposta para o vermelho é maior do que para o azul em todos os casos. Por outro lado, o aumento produzido pela polarização de porta na luz azul, é maior do que no vermelho, o que significa que a radiação de baixos comprimentos de onda é muito mais sensível ao terminal de porta do que a radiação com altos comprimentos de onda.

Tabela 16 –Responsividade dos dispositivos Full Gate.

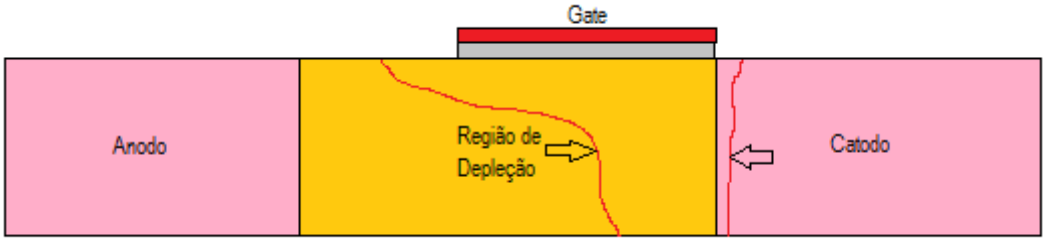
	Responsividade azul (mA/W)		Responsividade vermelho (mA/W)	
	Vcat=75mV	Vcat=150mV	Vcat=75mV	Vcat=150mV
Vg= -0.5V	12,04	12,79	73,15	74,51
Vg= +0.5V	31,69	31,53	151,55	151,76
Aumento (%)	163,2	146,5	107,2	103,7

Fonte: Autor

Portanto, o funcionamento do Full-Gate como discriminador de cor baseia-se no fato de a resposta espectral poder ser alterada através da modulação da profundidade da região de depleção, usando um sinal de controle apropriado. Esta modulação de profundidade permite capturar fótons de diferentes comprimentos de onda a diversas taxas. Quando um fóton de luz é absorvido, o diodo PIN gera uma corrente elétrica, cuja intensidade e cor podem ser avaliadas através das diferentes respostas que o dispositivo oferece aos diferentes comprimentos de onda dependendo da intensidade da tensão aplicada à porta do dispositivo. Assim, ao assumir que a resposta a cada comprimento de onda pode ser relacionada a uma única condição de polarização, é possível extrair as componentes de cores RGB através de simples artefatos matemáticos.

Conforme pôde ser visto, o dispositivo Full-gate produz um resultado diferente para cada tensão de porta e de catodo, o que o torna um excelente candidato à utilização como discriminador de cor, entretanto, como o terminal de porta cobre toda a região intrínseca, também há o efeito indesejado do aumento da corrente de escuro. Desta forma, um dispositivo que também deve atender o requisito de discriminar cor e ao mesmo tempo prover uma baixa corrente de escuro é o right gate. Isso se dá, pois ao introduzir um terminal de porta que cobre apenas a área tangente à região N+ do diodo, provoca-se uma extensão virtual do catodo, fazendo com que haja menor recombinação de portadores fotogerados. Ao mesmo tempo, a região intrínseca não necessita ser totalmente depletada, fazendo com que a corrente de escuro seja mais baixa do que no Full-Gate. Esse fato está ilustrado na Figura 153, na qual são mostradas, através de um esquema, as regiões de depleção obtidas para o Right Gate.

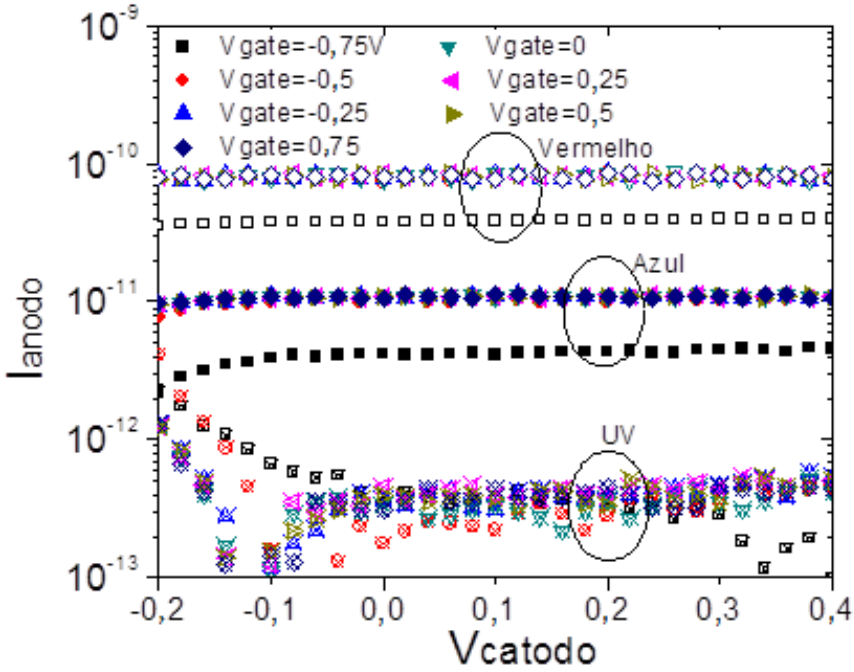
Figura 153 – Região de Depleção no dispositivo Right-Gate



Fonte: Autor

Na Figura 154 pode ser vista a corrente de anodo em função da corrente de catodo para diferentes cores com valores diferentes de tensão de porta. Pode-se observar que o vermelho apresenta o maior nível de corrente, seguido do azul e do UV. Além disso, é possível constatar que a polarização que oferece maior variação na corrente é a de Vg= 0,75V.

Figura 154 – Corrente de anodo em função da tensão de catodo para o dispositivo Right-Gate com diferentes polarizações de porta (experimental)

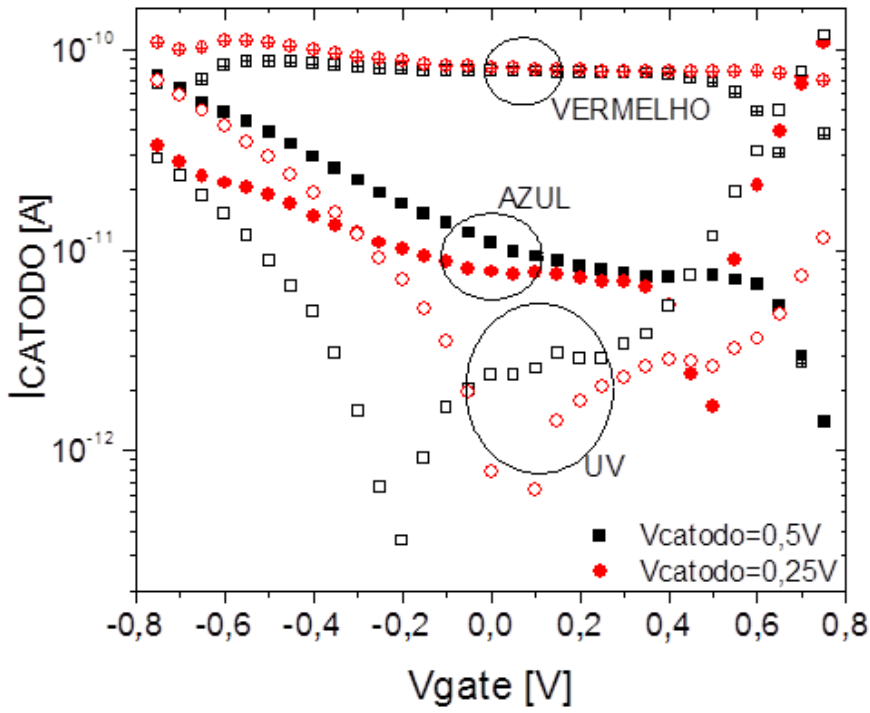


Fonte: Autor

A fim de verificar a influência direta da tensão de porta na resposta do dispositivo, a Figura 155 traz a corrente de catodo plotada em função da tensão de porta para duas polarizações de catodo. Desta forma, é possível verificar que a radiação UV é realmente a

mais afetada pela variação de Vg, devido ao fato da profundidade de penetração ser baixa para este comprimento de onda. Já o vermelho apresenta baixa variação em relação à tensão de porta.

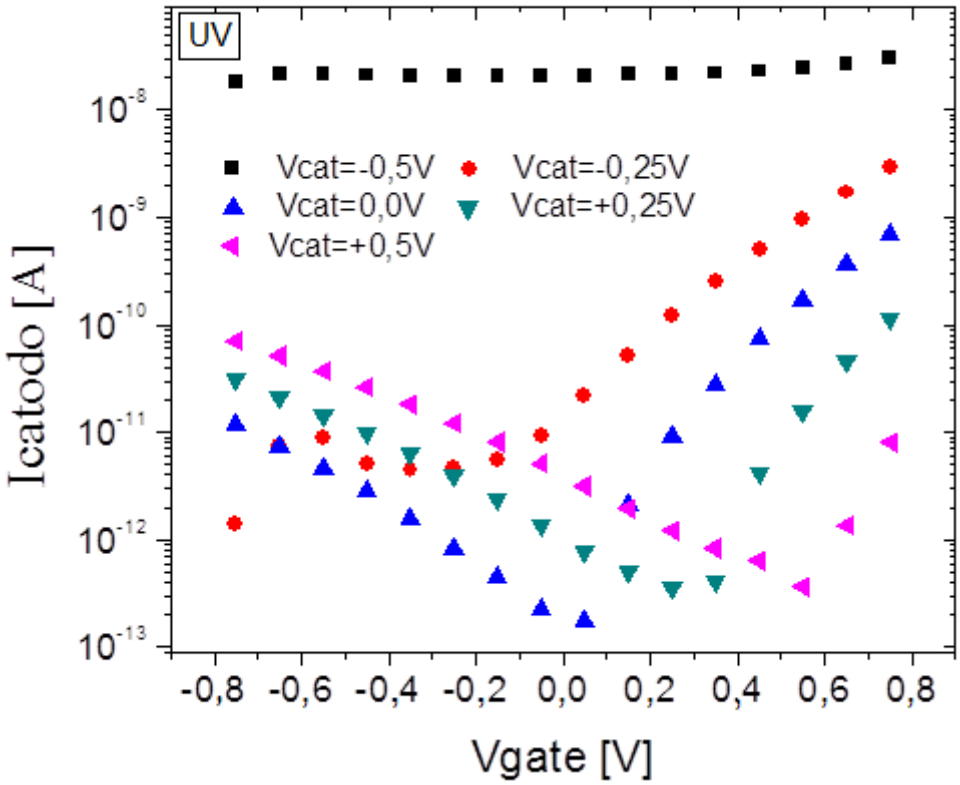
Figura 155 – Corrente de catodo em função da tensão de porta para o dispositivo Right-Gate com duas polarizações de catodo (experimental)



Fonte: Autor

A Figura 156 mostra com mais detalhes a dependência da corrente de catodo do UV com a tensão de porta para várias tensões de catodo. Para Vcat=-0,5V, o dispositivo encontra-se polarizado na região direta, por isso a corrente é tão alta. Pode-se perceber que o nível de corrente também é afetado pela polarização de catodo, além da tensão de porta, pois a tensão de catodo aumenta o tamanho da região de depleção.

Figura 156 – Corrente de catodo em função da tensão de porta para o dispositivo Right-Gate com várias polarizações de catodo (UV) (experimental)



Fonte: Autor

9.4 PEDIDO DE PATENTE

Neste item será apresentado um resumo do pedido de patente a ser solicitado.

9.4.1 Objetivo

Apresentar um novo dispositivo que poderá ser utilizado para controlar a resposta espectral de sensores de imagem do tipo pixel, melhorando sensivelmente sua eficiência.

9.4.2 Introdução

O campo de sensores para imagens a cores está continuamente em crescimento. Neste cenário, sensores CMOS estão ganhando uma grande participação no mercado graças ao baixo custo de sua tecnologia. A operação básica de detecção de cor nesses dispositivos

efetua-se por meio de uma matriz de filtros de cor (CFA) (MURRAY, 2006), que é depositado como uma máscara no topo do sensor . O filtro mais comum é conhecido como *red- green- blue* (RGB) e o seu padrão geralmente é repetido através de uma matriz (WRIGHT, 1928). Estes filtros têm a desvantagem de absorver uma porcentagem considerável da luz incidente, e a cor de cada um deles é reconstruída através de algoritmos de interpolação que podem introduzir erros nas imagens (artefatos) e consumir grande parte do processamento de imagem pós-aquisição. Além disso, como é necessária uma interpolação, a área útil do pixel é quadruplicada (já que é necessária uma matriz de 2x2), o que causa uma redução na resolução lateral (KERR, 2010).

Para resolver estes problemas alguns métodos foram propostos, tais como: a utilização de três geradores de imagens independentes opticamente acoplados à lente através de um prisma ou um conjunto de espelhos para realizar a separação de cor (CHARBON, 2010). Este método é eficaz, mas caro e potencialmente propenso a desalinhamento de longo prazo e, degradação da imagem. Uma variação deste método baseia-se na utilização de um filtro ativado mecanicamente que realiza a separação de cores sequencialmente no tempo no mesmo sensor (YOSHIKAWA, 1982). Uma vantagem é que há um menor erro entre as componentes de cor, já que são capturadas pelo mesmo sensor. A principal desvantagem é, contudo, a necessidade de sincronização, o que limita velocidade de operação.

9.4.3 Nossa proposta

O foco principal é obter uma abordagem diferente para a discriminação de cor em tecnologias CMOS. Desta forma, os problemas citados anteriormente poderão ser solucionados através da utilização de um sinal de controle elétrico. Este sinal elétrico, quando aplicado ao terminal de porta de um diodo lateral PIN com porta, irá modificar a sua responsa espectral. A principal vantagem é que a resposta espectral pode ser modificada sem a utilização de filtros ou múltiplas junções. Outra vantagem é que a mudança da resposta espectral pode ser feita muito rapidamente, em qualquer momento, e ainda controlada por software.

O funcionamento desta proposta baseia-se no fato de a resposta espectral poder ser alterada através da modulação da profundidade da área sensível do elemento sensível à luz, usando um sinal de controle apropriado. Esta modulação de profundidade permite capturar fótons de diferentes comprimentos de onda a diversas taxas. Quando um fóton de luz é absorvido, o diodo PIN gera uma corrente elétrica, cuja intensidade e cor podem ser avaliadas

através das diferentes respostas que o dispositivo oferece aos diferentes comprimentos de onda dependendo da intensidade da tensão aplicada à porta do dispositivo.

Assim, ao assumir que a resposta a cada comprimento de onda pode ser relacionada a uma única condição de polarização, é possível extrair as componentes de cores RGB através de simples artefatos matemáticos.

9.4.4 Patentes relacionadas

a) CONTROLLING SPECTRAL RESPONSE OF PHOTODETECTOR FOR AN IMAGE SENSOR (US 7,683,308 B2). Esta patente descreve um método para discriminação de cores usando um diodo Geiger de Avalanche.

b) CMOS IMAGE SENSOR WITH PHOTO DIODE GATE (US 7,557,335 B2). Esta patente descreve a utilização de um diodo com gate para melhorar a eficiência da transferência de carga em um pixel e não exatamente para discriminação de cores.

c) COLOR PATTERN AND PIXEL LEVEL BINNING FOR APS IMAGE SENSOR USING 2X2 PHOTODIODE SHARING SCHEME (US 2008/0062290 A1). Esta patente descreve o funcionamento de uma matriz de pixel ativo com a utilização de filtros RGB para discriminação de cores.

d) GATED DIODE HAVING AT LEAST ONE LIGHTLY-DOPED DRAIN (LDD) IMPLANT BLOCKED AND CIRCUITS AND METHODS EMPLOYING SAME (US 8,531,805 B2). Esta patente descreve a utilização de um diodo com gate a fim de melhorar a questão da capacitância de circuitos que fazem uso deste dispositivo.

e) COLOR SEPARATION IN AN ACTIVE PIXEL CELL IMAGING ARRAY USING A TRIPLE WELL STRUCTURE (5,965,875). Descreve a utilização de um dispositivo com 3 junções de diferentes profundidades a fim de discriminar as cores.

9.5 RESULTADOS PARCIAIS PARA APLICAÇÕES EM DISCRIMINAÇÃO DE CORES

Neste capítulo foram apresentados alguns dispositivos que podem ser usados para controlar a resposta espectral através da utilização de sinais elétricos de controle, sendo que o candidato mais adequado à esta aplicação é o Right Gate, o qual apresenta maior variação da corrente em função da tensão de porta.

Sistemas de detecção óptica convencionais podem detectar cenas coloridas através da reconstrução de um mosaico de pixels especialmente sensíveis a uma das cores primárias (vermelho, verde e azul). A sensibilidade a estas cores é feita através da cobertura dos pixels com um filtro de cor. Esse sistema apresenta sérias desvantagens, tais como imperfeições na separação das cores devido ao overlap entre os vários filtros, à interpolação necessária para a construção da imagem, fazendo com que o tamanho utilizável do pixel seja quadruplicado (FARSIU, ELAD e MILANFAR, 2006). Todos esses problemas causam uma efetiva redução na resolução das imagens. Por isso, neste trabalho, foi proposta a utilização de fotodiodos PIN especiais (desenvolvidos inteiramente desde o seu projeto) com os quais é possível modular a profundidade da área fotossensível através de um sinal de controle. Essa modulação permite capturar fótons em diferentes comprimentos de onda e pode ser feita rapidamente, podendo ser controlada por software. Como cada comprimento de onda tem um comportamento único em função de Vg, pode-se determinar uma função, por exemplo, um polinômio de ordem n que represente um determinado comprimento de onda. Desta forma, é possível determinar o comprimento de onda da luz incidente no sensor, através da análise da corrente medida com pelo menos dois valores de Vg. Logicamente, é necessário um processador que faça o controle de Vg e também para o procedimento de reconstrução da cor no sistema RGB.

10 CONCLUSÕES

Nesta seção serão apresentados dois itens, sendo que o primeiro trará a conclusão desta tese propriamente dita e o item seguinte as publicações geradas.

10.1 CONCLUSÕES DESTA TESE

Através deste trabalho foi possível constatar que a tecnologia MOS convencional apresenta as melhores características para aplicações em sensores de imagem, já que sua responsividade é aceitável dentro de todo o espectro visível, chegando a atingir 0,77A/W e 0,052A/W em T=500K, para o vermelho e azul, respectivamente. Ao compararem-se esses resultados com os publicados em (LUNARDI, 2015) no ano de 2015 que foi de 0,58 A/W para a radiação eletromagnética na faixa do vermelho e em (WOODWARD; KRISHNAMOORTHY, 1999) de 0,04 A/W para o azul (ambos em temperatura ambiente) pode-se estimar que houve um aumento de 41% para o vermelho e 33% para o azul. No entanto, em baixa temperatura (T=150K), há uma queda na responsividade, sendo R=0,32 A/W para o vermelho e R=0,027 A/W para o azul. Em relação à sua topologia, foi verificado que a variação na quantidade de dedos e consequentemente no comprimento da região intrínseca (L_I) do dispositivo provoca alteração direta na eficiência quântica e na responsividade. Além disso, a resposta dos diodos em tecnologia MOS convencional também é alterada pela presença da RDD vertical (formada abaixo das junções), na qual, os portadores coletados, podem contribuir para a fotocorrente, embora seja um mecanismo lento, que degrada a velocidade de resposta. Foi demonstrado também que a corrente de escuro se torna maior com o aumento da tensão reversa (V_D) e também com o aumento da temperatura, pois há maior geração térmica de portadores. Também foi possível verificar que o aumento de temperatura torna a influência da potência óptica incidente menos eficaz, especialmente para o azul.

Já no caso de sensores utilizados em aplicações especiais, tendo a tecnologia SOI como base, foi comprovado que, dependendo do comprimento da região intrínseca e também da sua concentração de dopantes, o dispositivo pode operar como totalmente ou parcialmente depletado, o que altera o seu funcionamento. Além disso, a tensão de polarização de porta traseira altera o modo de operação do dispositivo, podendo fazê-lo operar em acumulação, depleção ou inversão. O tempo de vida dos portadores minoritários está diretamente ligado à relação dos níveis de corrente de cada modo de operação, já que altera a taxa de

recombinação/geração de portadores. Sendo assim, ao comparar-se a tecnologia SOI de 2µm com a de 0,13µm da ST Microelectronics, pôde-se perceber que houve uma alteração nos níveis de corrente, pois enquanto o dispositivo construído em tecnologia de 2µm apresentou maior corrente em inversão para altas temperaturas, o dispositivo construído em tecnologia de 0,13µm apresentou maior corrente no modo de acumulação. Esta alteração é consequência do processo de fabricação da lâmina, que altera o tempo de vida dos portadores minoritários.

Além disso, foi apresentado um modelo elétrico para caracterizar o fotodiodo PIN, no qual, a região intrínseca com a sua porta de controle pode ser considerada como um transistor MOS. Este transistor está em série com o diodo de junção e apresenta uma resistência série que afeta diferentemente a corrente de escuro.

Em relação à fotocorrente, foi detectado que quando o dispositivo SOI está operando em altas temperaturas no modo de inversão, há um aumento no nível de corrente devido ao aumento do coeficiente de absorção (α_m). O aumento deste coeficiente resulta numa menor profundidade de penetração (L_{ABS}), contribuindo com a elevação da quantidade de fotoportadores gerados dentro da RDD. Em contrapartida, para o modo de acumulação, também em altas temperaturas, foi constatada uma redução no nível da fotocorrente, devido à redução do comprimento de difusão (L_{dif}) dos portadores, fazendo com que eles consigam percorrer uma distância menor dentro do fotodiodo, aumentando a sua taxa de recombinação e diminuindo a quantidade de corrente fotogerada.

Desta forma, foi possível determinar a relação- sinal-ruído e a eficiência quântica de dispositivos fabricados em tecnologia SOI para dois processos de fabricação diferentes, analisando a polarização de *back-gate* em conjunto com a variação da temperatura, fato que é inovador na comunidade científica. Para a temperatura de 100K, atingiu-se uma SNR de 202.000 com V_{BG}= -15V, já para T=300K, a maior SNR foi de 31000 com V_{BG} de -20V e para T=500K, obteve-se SNR= 4 com V_{BG} também de -20V.

Já a eficiência quântica aumenta com a elevação da temperatura, entretanto a variação da polarização de *back-gate* produz resultados diferentes. No caso de baixas temperaturas (T=100K), a melhor condição de polarização é no modo de inversão, chegando a atingir 37,5% de EQ_T com V_{BG} de +6V. No caso de temperaturas superiores a 300K, a melhor condição é no modo acumulação, chegando a uma eficiência de 61,9% para T=300K e 84,52% para T=500K (ambas com V_{BG}=-2V). É importante comparar estes resultados com os disponíveis nos principais trabalhos elaborados pela comunidade científica até o momento, tal como em 2013 em (INOKAWA, HIROAKI e ONO, 2013) onde os autores chegaram a uma EQ_T de 37% para a faixa do ultravioleta e em (AFZALIAN, 2006) atingiu-se uma EQ_T de

62,3% para um dispositivo com L_I de 6μm (ambos com T=300K). Entretanto, nesses trabalhos não houve a análise conjunta dos efeitos da variação da temperatura e da polarização de *back-gate*, tal como foi feita nesta tese.

Para a análise de diodos PIN utilizados como discriminadores de cor, foram desenvolvidos diodos especiais, abrangendo desde a elaboração do leiaute até a sua fabricação em tecnologia SiGe da IBM de 0,13μm. Os dispositivos foram desenvolvidos a fim de determinar o melhor posicionamento e tamanho do terminal de porta. Através da análise das curvas obtidas para diferentes comprimentos de onda, chegou-se a conclusão de que o melhor posicionamento da porta é adjacente à região N+, apresentada pelo dispositivo Rigth Gate, com o qual é possível modular a profundidade da área fotossensível através de um sinal de controle. Essa modulação permite capturar fótons em diferentes comprimentos de onda e pode ser feita rapidamente, podendo ser controlada por software. Como cada comprimento de onda tem um comportamento único em função de Vg, pode-se determinar, através de artefatos matemáticos, a intensidade e o comprimento de onda da radiação incidente. Como este método é inovador na comunidade científica, também foi apresentado um possível pedido de patente.

10.2 PUBLICAÇÕES GERADAS DURANTE O PERÍODO DE DOUTORADO

Artigos completos publicados em periódicos

1. ***NOVO, CARLA***; BUHLER, RUDOLF ; BAPTISTA, JOAO ; GIACOMINI, RENATO ; AFZALIAN, ARYAN ; FLANDRE, DENIS . **Quantum Efficiency Improvement of SOI p-i-n Lateral Diodes Operating as UV Detectors at High Temperatures**. IEEE Sensors Journal, v. 17, p. 1641-1648, 2017.

2. ***NOVO, CARLA***; GIACOMINI, RENATO; DORIA, RODRIGP; AFZALIAN, ARYAN; FLANDRE, DENIS. **Illuminated to dark ratio improvement in lateral SOI PIN photodiodes at high temperatures**. Semiconductor Science and Technology (Print), v. 29, p. 075008, 2014.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

1. BUHLER, RUDOLF ; ***NOVO, CARLA*** ; SILVEIRA, M. ; GIACOMINI, R. C. . **Gated SiGe PIN diodes exposed to visible light spectrum and heavy-ion**

radiation. In: 2016 Joint International EUROSOI Workshop and International Conference on Ultimate Intergration on Silicon (EUROSOI- ULIS), 2016, Wien. 2016 Joint International EUROSOI Workshop and International Conference on Ultimate Intergration on Silicon (EUROSOI- ULIS), 2016. p. 186.

2. BUHLER, RUDOLF ; PERIN, A. ; ***NOVO, CARLA*** ; SILVEIRA, M. ; GIACOMINI, R. C. . **Analysis of Heavy-Ion Particles Striking Regions Inside and Between PIN Photodetectors**. In: 2016 31st. Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2016, Belo Horizonte. 2016 31st. Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2016. p. 1.

3. ***NOVO, CARLA***; BUHLER, RUDOLF ; ZAPATA, R. ; GIACOMINI, R. C. . **Responsivity Improvement for Short Wavelenghts Using Full-Gated PIN Lateral SiGe Diode**. In: 2016 31st. Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2016, Belo Horizonte. 2016 31st. Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2016. p. 1

4. ***NOVO, CARLA***; BATISTA, J; GIACOMINI, R; AFZALIAN, A; FLANDRE, D. **Study of total quantum efficiency of lateral SOI PIN photodiodes with back-gate Bias, intrinsic length and temperature variation**. In: 227th Electrochemical Society Meeting, 2015, Chicago. 227th ECS Meeting, 2015.

5. ***NOVO, CARLA***; GIACOMINI, R. **Evaluation of the transit time and frequency response of multifinger PIN SOI photodiodes at IR and UV wavelenghts**. In: International Caribean Conference on Devices, Circuits and Systems (ICCDCS), 2014, Playa del Carmen. ICCDCS, 2014.

6. ***NOVO, CARLA***; ZAPATA, R; BATISTA, J; STOLF, R; GIACOMINI, R. **Optimized design of lateral PIN photodiodes regarding responsivity and SNR as a function of operating temperature**. In: International Caribean Conference on Devices, Circuits and Systems (ICCDCS), 2014, Playa del Carmen. ICCDCS, 2014.

7. ***NOVO, CARLA***; GIACOMINI, R; DORIA, R; AFZALIAN, A; FLANDRE, D. **Temperature and back-gate bias influence on the operation of lateral SOI PIN photodiodes.** In: 29th SBMicro- Symposium on Microelectronics Technology and Devices, 2014, Aracaju. Proceedings of 29th SBMicro- Symposium on Microelectronics Technology and Devices, 2014.

8. ***NOVO, CARLA***; GIACOMINI, R; DORIA, R; AFZALIAN, A; FLANDRE, D. **Back-gate bias influence on the operation of lateral SOI PIN photodiodes at high temperatures.** In: EuroSOI 2013 - Ninth Workshop of the Thematic Network on Silicon on Insulator, Technology, Devices and Circuits, EUROSOI, Paris. 2013.

9. ***NOVO, CARLA***; GIACOMINI, R; DORIA, R; AFZALIAN, A; FLANDRE, D. **Operation of lateral SOI PIN photodiodes with back-gate bais and intrinsic length variation**. In: 223rd Electrochemical Society Meeting - Advanced Semiconductor-On-Insulator Technology and Related Physics 16, 2013, Toronto. ECS Transactions - Advanced Semiconductor-On-Insulator Technology and Related Physics 16. Pennington, NJ: ECS Transactions - Advanced Semiconductor-On-Insulator Technology and Related Physics 16, 2013. v. 53. p. 121-126.

Resumos expandidos publicados em anais de congressos

1. ZAPATA, R; ***NOVO, CARLA***; GIACOMINI, R. **Optimization of gated lateral PIN photodiodes**. In: SForum - 14th Microelectronics Student Forum, 2014, Aracaju. Optimization of gated lateral PIN photodiodes, 2014.

Resumos publicados em anais de congressos

1. ***NOVO CARLA***; GIACOMINI, R ; AFZALIAN, A ; FLANDRE, D. . **Electrical Equivalent Model of a SOI PIN Lateral Diode**. In: Seminatec- Workshop on Semiconductors and Micro & Nano- Technology, 2016, Campinas. Electrical Equivalent Model of a SOI PIN Lateral Diode, 2016.

2. ***NOVO CARLA***; BATISTA, J; GIACOMINI, R; FLANDRE, D. **Intrinsic Length and Temperature Influence on the Operation of PIN SOI Photodiodes**. In: Workshop on Semiconductors and Micro and Nano Technology, 2015, São Bernardo do Campo. SEMINATEC, 2015.

3. ZAPATA, R; ***NOVO, CARLA***; GIACOMINI, R. **Back-gate bias and gate oxide thickness influence on the operation of Lateral PIN SOI**. In: WORKSHOP ON SEMICONDUCTOR AND MICRO & NANO TECHNOLOGY, 2014, SÃO PAULO. SEMINATEC, 2014.

4. ***NOVO, CARLA***; ZAPATA, R; GIACOMINI, R. **Optimization of PIN photodiodes regarding responsivity and quantum efficiency**. In: Simpósio de Pesquisa do Grande ABC, 2014, São Bernardo do Campo. 2014.

REFERÊNCIAS

Unsupported source type (DocumentFromInternetSite) for source htt.

AFAZALIAN; FLANDRE. Characterization of Quantum Efficiency, Effective Lifetime and Mobility in Thin Film Ungated SOI Lateral PIN Photodiodes. **Solid State Electronics**, v. 51, n. 2, p. 337-342, 2007.

AFZALIAN, A. **Optical Detectors in SOI CMOS Technologies for Blue DVD and Short Distance Optical Communication**. Universite Catholique de Louvain. Belgium. 2006.

AFZALIAN, A.; FLANDRE, D. Physical Modeling and Design of Thin-Film SOI Lateral PIN Photodiodes for Blue DVD-Aplications. **Proc. of 2004 IEEE SOI Conf.**, Charleston, 4-7 October 2004. 21-23.

AFZALIAN, A.; FLANDRE, D. Physical modelling and Design of Thin-Film SOI Lateral p-i-n Photodiodes. **IEEE Trans. On Electron Devices**, v. 52, n. 6th. Edition, p. 1116-1122, 2005.

AFZALIAN; FLANDRE. Modeling of the Bulk vs. SOI CMOS Performances for the Optimal Design of APS Circuits in Low-Power, Low-Voltage Application. **IEEE Transactions On Electron Devices, Special Issue on Solid-State Sensors**, January 2003. 106-110.

AMBROZIAK, A. **Semiconductor Photoelectric Devices**. London: Iliffe, 1968.

ANDREI, S. et al. Analytical model for thin-film SOI PIN-diode leakage current. **Solid State Electronics**, 130, n. pages 4-8, 2017.

AUGENDRE, Y.; AL, E. **On the Scability of Source/ Drain Current Enhancement in Thin SOI**. Proc. of ESSDERC. [S.l.]: [s.n.]. 2005. p. 301-304.

BALAGUER, J. E. D. **Caminho**. Valência: Quadrante, 1939.

BIGAS, M. et al. Review of CMOS Image Sensors. **Microelectronics Journal** , Barcelona, v. 37, p. 433-451, October 2006.

BLU Ray Disc. Disponivel em: <http://www.bluraydisc.com/Section-13470/Sesction-13628/Index.html>.

BRAGA, M. S. **Sensor de Imagem para Detecção de Gases**. USP. São Paulo. 2008.

BULTEEL, O.; SCHOLOGEL, N. V.; FLANDRE, D. Complete Microsystem Using SOI Photodiode for DNA Concentration Measurement, 2003.

BULTEEL; FLANDRE. Optimization of Blue/UV Sensors Using p-i-n Photodiodes in Thin-Film SOI Technologie. **ECS Transactions**, v. 19, n. 4, p. 175-180, 2009.

CAMPOS, F. D. S. **Sistemas de Imagem CMOS com Alta Responsividade**. Unicamp. Campinas. 2008.

CAMPOS, F.; FARAMARZPOUR, N.; OGNIAN, M. Photodetection With Gate-Controlled Lateral BJTs from Standard CMOS Technology. **IEEE Sensors Journal** , v. 13, n. 5, p. 1554-1563, May 2013.

CANALI, C.; AL., E. Electron and Hole Drift Velocity Measurements in Silicon and their Relation to Electric Field and Temperature. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 22, p. 1045-1047, 1975.

CANDA, A. et al. **Radiation Detector, method of manufacturing a radiation detector an litographic apparatus comprising a radiation detector**. 7586108, 8 September 2009.

CHARBON. **Controling spectral response of photodetector for an image sensor**. 7.683.308 B2, 23 Março 2010.

COLINGE, J. P. **Silicon-On-Insulator Technology:** Materials to VLSI. 3. ed. Boston: Kluwer Academic, 2004.

COLINGE, J. P. **FinFETs and Other Multi-Gate Transistors**. New York: Springer, 2008.

COLINGE, JEAN P.; COLINGE, CYNTHIA A. **Physics of Semiconductor Devices**. Massachusetts: Kluwer Academic, 2002.

DEHLINGER, G. et al. High-Speed Germanium on SOI Lateral PIN Photodiodes. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 16, n. 11, p. 2547-2549, November 2004.

DOMAE, Y.; AL, E. **Improvement of the Tolerance to Total Ionizing Dose in SOI CMOS**. Proc. of IEEE Int. SOI Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 135-136.

DORIA, R. T. **Efeito da Tensão Mecânica em Transistores de Múltiplas Portas Operando em Temperaturas Criogênicas**. Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo. 2010.

DORKEL, J. M.; LETURCQ, P. Carrier Mobilities in Silicon Semi-Empiric Related to Temperature, Doping and Injection Level. **Solid State Electronics**, v. 24, p. 821-825, 1981.

EMSLEY, M. K. et al. Realization of High-Efficiency 10GHz Bandwidth Silicon Photodetector Arrays for Fully Integrated Optical Data Communication Interfaces. **Proc. of ESSDERC 2003 Conference**, Estoril, 16-18 September 2003. 47-50.

ESTRADA, M. et al. FD MOS SOI Circuit to Enhance the Ratio of Illuminated to Dark-Current of a Co-Integrated a-Si:H photodiode. **Microelectronics Reliability**, v. 43, p. 189-193, January 2003.

FAIRMAN, H. S.; BRILL, M. H.; HEMMENDINGER, H. How the CIE 1931 Color-Matching Functions Were Derived From the Wright Guild Data. **Color Research and Applications**, 4, 1998.

FARSIU, S.; ELAD, M.; MILANFAR, P. Multi-Frame Demosaicing and Super Resolution of Color Images. **IEEE Trans. on Image Processing**, 1, 2006.

FLANDRE, D.; AL, E. Fully Depleted SOI CMOS Technology for Hetero-Geneous, Micropower, High-Temperatura or RF Microsystems. **Solid State Electronics**, v. 45, n. 4, p. 541-549, April 2001.

FOROUHI, A. R.; BLOOMER, I. Optical Dispertion Relations for Amorphous Semiconductor and Amorphous Dieletrics. **Physical Review**, v. 34, n. 10th Edition, p. 7018-7926, Nov. 1986.

FOROUHI, A. R.; BLOOMER, I. Optical Properties of Crystalline Semiconductor and Dielectrics. **Physical Review B**, v. 38, n. 3rd. Edition, p. 1865-1874, July 1988.

GALETI, M. et al. Improved Generation Lifetime Model for Electrical Characterization of Single and Double Gate SOI Mosfets. **Semiconductor Science and Technology**, v. 23, p. 125-128, 2008.

GARETT, L. D.; QI, S. C. L.; CAMPBELL, J. C. A Silicon-Based Integrated NMOS p-i-n Photoreceiver. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 43, n. 3rd. Edition, p. 411-416, Feb. 1996.

GARTNER, W. Depletion-Layer Photoeffects in Semiconductors. **Physical Review**, v. 116, n. 1, p. 84-87, October 1959.

GHIONI, M. A VLSI-Compatible High-Speed Silicon Photodetector for Optical Data Link Applications. **IEEE Trans. On Electron Decices**, v. 43, n. 7, p. 1054-1060, July 1996.

GOOGLE. Disponivel em: <https://www.google.com.br/search?q=espectro+eletromagn%C3%A9tico&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjR56Lmg7TVAhWMHpAKHayCDdgQ_AUICigB&biw=1366&bih=638#imgrc=1k9Wg2TLTqGrpM:>. Acesso em: 31 jul. 2017.

GRUNDFEST, W. **Overview of Medical Applications and Cardiovascular Intervention**. Proc. Quantum Eletron. Laser Sci Conference. [S.l.]: [s.n.]. 1999. p. 23-28.

GUTIERREZ, E. A.; CLAYES, C. L. **Low temperature Electronics:** Physics, Devices, Circuits and Applications. [S.l.]: Academic Press, v. 964p., 1991.

HARRISM, T. **Optical Properties of Si at Elevated Temperature**. Air Force Institute of Technology. [S.l.]: [s.n.]. 2000.

HILLEBRAND, S. H. C. T. S. **High Speed Camera System Using a Cmos Image Sensor**. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. [S.l.]: [s.n.]. 2000. p. 656-661.

HIRSCH, R. **Exploring Colour Photography:** A Complete Guide. [S.l.]: Laurence King Publishing, 2004.

HO, J. Y. L.; WONG, K. S. High- Speed and High-Sensitivity SOI Metal-Semiconductor-Metal Photodetector with Trench Structure. **Appl. Phys. Letters**, v. 69, n. 1, p. 16-18, 1996.

HUNT, R. W. G. **The Reproduction of Color**. Chichester: Wiley IS&T, 2004.

INFO Escola. Disponivel em: <http://www.infoescola.com/fotografia/fotografia-digital/>.

INOKAWA, H.; HIROAKI, S.; ONO. **Evolution of Photodetectors by SOI Material**. IEEE Quality in Research. Japan: [s.n.]. 2013. p. 9-13.

ISHAK, W. **An Overview of Agilent Technologies and Agilent Laboratories**. IEEE KITCHENER-WATERLOO. Waterloo: [s.n.]. 2003. p. 1-2.

JANG, S. W. et al. **Adaptative Colorimetric Characterization of Digital Camera with White Balance**. [S.l.]: LNCS Springer, 2005.

JUNICHI, N. **Image Sensors and Signal Processing for Digital Cameras**. [S.l.]: CRC Press, 2005.

KAMRAN, A.; FAIZ, R. Gated Lateral PIN Junction Device for Light Sensing. **IEEE Photonics Technology Letters** , v. 23, n. 13, p. 911-913, July 2011.

KARCZEMSKA; SOKOLOWSKA. **Materials for DNA Sequencing Chip**. Proc. 3rd. Int. Conf. Novel Appl. Wide Bandgap Layers. Poland: [s.n.]. 2001. p. 176.

KERR. **The CIE XYZ and Color Spaces**. [S.l.]. 2010.

KERR, A. D. **The CIE XYZ and Color Spaces**. [S.l.]. 2010.

KILCHYTSKA, V.; LEVACQ, D.; RASKIN, J. P. Floating Effective Back-Gate Effect on the Small- Signal Output Conductance of SOI MOSFETs. **IEEE Electron Device Letters**, June 2003. 414-416.

KITTEL, C. **Introduction to Solid State Physics**. 6th Edition. ed. [S.l.]: J. Wiley and Sons, 1986. 81-85 p.

KLAASSEN, D. B. M. A Unified Mobility Model for Device Simulation – I. Model Equations and Concentration Dependence. **Solid State Electronic**, v. 35, n. 7, p. 953-959, 1992.

KLAASSEN, D. B. M. A Unified Mobility Model for Device Simulation – II.Temperature Dependence of Carrier Mobility and Lifetime. **Solid State Eletronics**, v. 35, n. 7, p. 961-967, 1992.

KNIGHT, G. **Monitoring of Ultra-Violet Light Sources for Water Desinfection**. Proc. IEEE Ind. Applic. Conf. 39th. IAS Annual Meeting. [S.l.]: [s.n.]. 2004. p. 1016-1018.

KNITTL, Z. **Optics of Thin Films**. Prague: Wiley & Sons, 1976.

KODAK. **Color Correction for Image Sensors**. [S.l.]: [s.n.]. 2003.

KOVALEV, D. et al. **The Temperature Dependence of the Absorption Coefficient of Porous Silicon**. American Institute of Physics. [S.l.]: [s.n.]. 1996.

KUSCHNERUS, P.; RABUS, H.; RICHTER, M. Characterization of Photodiodes as Transfer Detector Standards in 120nm to 600nm spectral range. **Metrologia**, v. 35, n. 4, p. 355-362, 1998.

LANYON, H.; TUFT, R. Bandgap Narrowing in Moderately to Heavily Doped Silicon. **IEEE Trans. On Electron Devices**, v. 26, n. 7, p. 1014-1018, 1979.

LEVINE, B. F. et al. 1Gb/s High Quantum Efficiency Monolithically Integrable Detector. **Appl. Phys. Letters**, v. 66, n. 22, p. 2984-2986, 1995.

LIU, M. Y.; CHEN, E.; CHOU, S. Y. 140GHz Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors on SOI Substrates with Scaled Active Layer. **Appl. Phys. Letters**, v. 65, n. 7, p. 887-888, 1994.

LONGONI, A.; ZARAGA, F.; BOMBELLI, G. L. A. L. The Tranverse Field Detector: a Novel Color Sensitive CMOS Device, v. 29, n. 12, 2008.

LULE, T. Sensitivity of CMOS Based Imagers and Scaling Perspectives. **IEEE Transactions On Electron Devices**, v. 47, n. 11, p. 2110-2121, November 2000.

LUNARDI, J. M. A. L. **Lateral Silicon Photodiodes with Extremely Low Dark Current for Visible and Infra-red Applications**. North Carolina: IEEE Science Foundation. 2015.

MADEIRA, F. M. **Estudo Comparativo entre Tecnologias CMOS, NMOS e SOI em um Circuito de APS**. Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo. 2012.

MALINOWSKI, P. E.; DUBOZ, J. Y.; MOOR, P. D. **10 um Pixel-to-Pixel Pitch Hybrid Backside Illuminated AlGaN-on-Si Imagers for Solar Blind EUV Radiation Detection**. Proc. IEEE Int. Electron Dev. Meet. São Francisco: [s.n.]. 2010. p. 348-351.

MARK, I. et al. Introduction to the issue on Photodetectors and Imaging. **IEEE Journal of selected topics in quantum electronics**, p. 665- 667, 2004.

MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONCK, P. B. **Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS**. São Paulo: Thomson, 2003.

MARUYAMA, T.; MAEKITA, K.; IIYAMA, K. **High Speed Operation of SOI PIN Photodiodes Fabricated by CMOS Compatible Process**. OECC Engineering. Australia: [s.n.]. 2014. p. 506-508.

MCKELVEY, J. P. **Solid State and Semiconductor Physics**. [S.l.]: Krieger Pub Co, v. 512p., 1982.

MENTOR GRAPHIC'S. **The Higher Education Program**. Oregon: [s.n.], 2005.

MERRIL, F. **Color Separation in an Active Pixel Cell Imaging Array using a Triple Well Structure**. 5 965 875, 12 October 1999.

MOORE, G. E. **Progress in Digital Integrated Electronics**. Internation Electron Devices Metting. [S.l.]: [s.n.]. 1975. p. 11-13.

MOSIS Integrated Circuit Fabrication Service. **Multi Projectt Wafer**, 2012. Disponivel em: <http://www.mosis.com/>.

MOSIS. **MOSIS**, 2015. Disponivel em: <https://www.mosis.com/vendors/view/on-semiconductor/lm-ami-c5n>. Acesso em: 06 Outubro 2015.

MURRAY, M. A. **Our Sense of Light: Part 3**. Washington University. 2006.

MURRAY, M. A. **Our Sense of Light: Part 3**. Washington University. 2006.

NAVARENHO, R.; SILVEIRA, M.; GIMENEZ, S. Mitigating MOSFET Radiation Effects by Using the Wave Layout in Analog ICs Applications. **JICS. Journal of Integrated Circuits and Systems**, São Paulo, v. 10, p. 30-37, 2015.

NOVO, C. **Optmized Design of Lateral PIN Photodiodes Regarding Responsivity and SNR as a Function of Operating Temperature**. Semiconductor Science Technology. [S.l.]: [s.n.]. 2014. p. 1-9.

NOVO, C. et al. **Back-gate Bias Influence on the Operation of Lateral SOI PIN**. 9th Workshop on SOI Semiconductors- EUROSOI. Paris: [s.n.]. 2013.

NOVO, C. et al. **Operation of Lateral SOI PIN Photodiodes With Back-Gate Bias and Intrinsic Length Variation**. Proc. of 223rd. Electrochemical Society Meeting. Toronto: [s.n.]. 2013. p. 121-126.

OCEAN, O. **Operating Manual and User's Guide Ocean Optics**. Netherlands: Ocean Optics, 2005.

PAVANELLO, M. et al. Analysis of Temperature Induced Saturation Threshold Voltage Degradation In Deep-Submicrometer Ultrathin SOI Mosfets.. **IEEE Transactions on Electron Devices**, 2005. 2236-2242.

RUDENKO, T.; RUDENKO, A.; AL., E. Determination of Film and Surface Recombination in Thin- Film SOI Devices Using Gated- Diode Technique. **Solid State Electronics**, v. 48, n. 3, p. 389-399, 2004.

SADIKU, M. N. O. **Optical and Wireless Communications**. 9th. Edition. ed. Los Angeles: CRC Press, v. 39, 2002.

SASSON; SANCHES. **Ciências Entendendo a Natureza**. São Paulo: Saraiva S A, 2009.

SEDRA, S.; SMITH, K. C. **Microelectronics Circuits**. Oxford: Makron Books, 1988.

SELBERHERR, S. MOS Device Modeling at 77K. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 36, n. 8, p. 1464-1474, 1989.

SHI, L. et al. Electrical and Optical Performance Investigation of Si- Based Ultrashallow Juction P+n-VUV/EUV Photodiodes. **IEEE Transaction on Electron Instrumentation and Measurement**, v. 61, n. 5, p. 1268-1271, 2012.

SILVACO. Santa Clara: Atlas User's Manual, v. 5.16.3.R, 2010.

SMITH, W. A.; LAM, K. P. **Exploratory Analysis Of UVvis absorption spectra**. Proc. 3rd. Int. Congr. Image Signal Process. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 3359-3363.

SOARES, A. J. M. **Comunicações Ópticas**. Brasília. 2005.

SOARES, A. J. M. **Comunicações Ópticas**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 36-38. 2005.

SOUZA, M. et al. Analysis of Lateral SOI PIN Diodes for The Detection of Blue and UV Wavelengths in a Wide Temperature Range. **ECS Transactions** , v. 31, n. 1, p. 199-206, 2010.

SOUZA, M. et al. Temperature and Silicon Film Thickness Influence on the Operation of Lateral SOI PIN Photodiodes for Detection of Short Wavelengths. **Journal of Integrated Circuits and Systems**, v. 6, n. 2, p. 107-113, September 2011.

SPEEDY Converter. **Top Conversions**, 2011. Disponivel em: <http://www.speedyconverter.com/?c=watt%2Fsquare+meter+to+lux>. Acesso em: Novembro 2012.

ST Microelectronics. **Datasheet ST0,13**. Disponivel em: <http://www.st.com>.

STAR, C. **Biology:** Concepts and Applications. [S.l.]: Thomson Brooks , 2005.

STEWART, M.; MILTIADIS, H. High Performance Gated Lateral Polysilicon PIN diodes. **Solid State Electronics**, v. 44, n. 2000, p. 1613-1619, May 2000.

STREEMAN, B. G.; BANERJEE, S. **Solid State Electronic Devices**. New Jersey: Prentice Hall, 2000.

SZE, S. M. **Physics of Semiconductor Devices**. New York: John Wiley & Sons, 1981.

THE Mosis Service. **IC Fabrication**, 2012. Disponivel em: <http://www.mosis.com/products/fab-processes>.

THEUWISSEN, A. **Ccd or CMOS Image Sensors for Consumer Digital Still Photography?** International Symposium on VLSI Technology, Systems, and Applications. [S.l.]: [s.n.]. 2001. p. 168-171.

WALKER, H. R. **Ótica e Física Moderna**. Sexta Edição. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 4, 2003.

WIKIPEDIA. Disponivel em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Largura_de_banda>.

WONG, H. Technology and Device Scaling Considerations for CMOS Imagers. **IEEE Transactions On Electron Devices**, v. 43, n. 12, p. 2131-2142, December 1996.

WONG, H. S. P. **Cmos Image Sensors-Recent Advances and Device Scaling Considerations**. International Electron Devices Meeting (IEDM). Chicago: [s.n.]. 1997. p. 201-204.

WOODWARD; KRISHNAMOORTHY. 1Gb/s Integrated Optical Detectors and Receivers in Commercial CMOS Technologies. **IEEE Journal of Select. Topics in Q. Electron**, v. 5, n. 2nd. Edition, p. 146-156, 1999.

WRIGHT, W. D. A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colors. **Transactions of Applied Society**, 4, 1928.

WYSZECKY, G.; STILES, W. S. **Colour Science:** Concepts and Methods, Quantitative Data and Formula. New York: Wiley Series in Pure and Applied Optics, 1981.

X FAB MIXED-SIGNAL FOUNDRY EXPERTS. **Data Sheet X-FAB Semiconductor Foundries AG CX06**. X FAB. [S.l.], p. 1-8. 2012.

XFAB MIXED-SIGNAL FOUNDRY EXPERTS. **Data Sheet X-FAB Semiconductor Foundries AG FC025**. XFAB. [S.l.], p. 1-8. 2012.

XFAB MIXED-SIGNAL FOUNDRY EXPERTS. **Data Sheet X-FAB Semiconductor Foundries AG XO35**. XFAB. [S.l.], p. 1-8. 2012.

YAHOO. Disponivel em: <http://br.answers.yahoo.com/question/index?qid=20100412155148AA7CU7f>.

YANG, B. et al. 10Gb/s All-Silicon Optical Receiver. **IEEE Photonics Technologie Letters**, v. 15, n. 5, p. 745-747, May 2003.

YOSHI, O. **CIE Fundamentals for Color Measurements**. [S.l.]: Digital Printing Technologies. 2000.

YOSHIDA, T.; OHTOMO, Y.; SHIMAYA, M. A Novel p-i-n Photodetector Fabricated on SIMOX for 1GHz 2V CMOS OEICs. **Technical Digest. of Electron Devices Meeting (IEDM)**, 6-9 December 1998. 29-32.

YOSHIKAWA. **Apparatus for sensing the wavelength and intensity of light**. 4.309.604, 5 Janeiro 1982.

ZHANG, W.; CHAN, M.; KO, C. H. Performance of Floating Gate/Body Tied NMOSFET Photodetector on SOI Substrate. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 47, n. 7, p. 1375-1384, July 2000.

ZHENG, X.; WRIGLEY, C. **High Responsivity CMOS Imager Pixel Implemented in SOI Technologie**. IEEE International SOI Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2000.

ZÍLIO, S. C. **Óptica Moderna Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Renovarum Ltda, 2000.

ZÍLIO, S. C. **Conceitos Básicos para Comunicações Óticas**. 2. ed. São Paulo: Renovarum Ltda, v. 1, 2001.

ZIMAN, J. M. **Principles of the Theory of Solids**. 2nd Edition. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 1972.

ZIMMERMANN, H. **Integrated Silicon Opto-electronics**. Berlin: Springer, 2000.

APÊNDICE A – EXEMPLO DE ESTRUTURA COM ÚNICO DEDO

```
##############################################################################
# Arquivo:PINBULK_LI1_lam200a1000_re0
# data: 08/08/2012
#
# Potência fixa de 1mW/cm2, com tensão fixa, variando lambda de 200 a 1000nm
#
##############################################################################

go atlas
TITLE PINBULK_Li1_lam200a1000_re0

################################
# Especifying the initial mesh #
################################

set Li=1
mesh space.mult=1.0
#
x.mesh loc=0.0   spac=0.5
x.mesh loc=2.1   spac=0.5
x.mesh loc=2.8   spac=0.1
x.mesh loc=4.5  spac=0.01
x.mesh loc=5.00  spac=0.01
x.mesh loc=5.5     spac=0.01
x.mesh loc=7.2   spac=0.1
x.mesh loc=7.9   spac=0.5
x.mesh loc=10   spac=0.5


y.mesh loc=-0.280 spac=0.05
y.mesh loc=0.0    spac=0.05
y.mesh loc=0.02   spac=0.01
y.mesh loc=0.3   spac=0.01
y.mesh loc=1      spac=0.01
y.mesh loc=500    spac=100

eliminate columns x.min=0 x.max=10 y.min=0.4 y.max=500

eliminate columns x.min=0 x.max=10 y.min=0.4 y.max=500

eliminate columns x.min=0 x.max=10 y.min=0.4 y.max=500

eliminate columns x.min=0 x.max=10 y.min=0.4 y.max=500

#*************** Regioes ****************************
region      num=1 x.min=0.0     y.max=500     x.min=0.0       x.max=10   silicon
region      num=2 x.min=0.0     x.max=2.1     y.min=-0.280    y.max=0.0    oxide
region      num=3 x.min=2.8     x.max=7.2     y.min=-0.280    y.max=0.0    oxide
region      num=4 x.min=7.9     x.max=10      y.min=-0.280    y.max=0.0    oxide



#**************** DEFINE THE ELECTRODES *****************

electrode   name=anode     x.min=2.1   x.max=2.8    y.min=-0.280 y.max=0.0

electrode   name=cathode   x.min=7.2   x.max=7.9    y.min=-0.280 y.max=0.0

#*********** DEFINING THE DOPING CONCENTRATIONS ********

doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=0        x.max=4.5        y.min=0
y.max=0.3
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=5.5      x.max=10         y.min=0
y.max=0.3
doping   uniform   conc=1E15 p.type reg=1 x.min=4.5      x.max=5.5        y.min=0
y.max=0.3
doping   uniform   conc=1E15 p.type reg=1 x.min=0        x.max=10         y.min=0.3
y.max=500
```

```
#*******************************************************************************
*

contact name=anode
contact name=cathode

save outf=PINBULK_Li$"Li"_lam200a1000.str
tonyplot PINBULK_Li$"Li"_lam200a1000.str


#****************** Definição feixe de luz
****************************************

beam  num=1   x.origin=5   y.origin=-5.5E4   angle=90.0   wavelength=0.2

output minset


#Definição de modelos

models kla bgn consrh fldmob optr klaaug print temp=300
solve init

method newton autonr trap maxtrap=10 carriers=2
solve prev

#Aplicação de tensão

solve vanode=0 vstep=-0.1 vfinal=-1.5 name=anode

log outf=PINBULK_Li$"Li"_lam200a1000.log master
solve b1=1E-3 lambda=0.2
solve b1=1E-3 lambda=0.22
solve b1=1E-3 lambda=0.24
solve b1=1E-3 lambda=0.26
solve b1=1E-3 lambda=0.28
solve b1=1E-3 lambda=0.30
solve b1=1E-3 lambda=0.32
solve b1=1E-3 lambda=0.34
solve b1=1E-3 lambda=0.36
solve b1=1E-3 lambda=0.38
solve b1=1E-3 lambda=0.39
solve b1=1E-3 lambda=0.40
solve b1=1E-3 lambda=0.41
solve b1=1E-3 lambda=0.42
solve b1=1E-3 lambda=0.43
solve b1=1E-3 lambda=0.44
solve b1=1E-3 lambda=0.45
solve b1=1E-3 lambda=0.46
solve b1=1E-3 lambda=0.47
solve b1=1E-3 lambda=0.48
solve b1=1E-3 lambda=0.49
solve b1=1E-3 lambda=0.5
solve b1=1E-3 lambda=0.52
solve b1=1E-3 lambda=0.54
solve b1=1E-3 lambda=0.56
solve b1=1E-3 lambda=0.58
solve b1=1E-3 lambda=0.6
solve b1=1E-3 lambda=0.62
solve b1=1E-3 lambda=0.64
solve b1=1E-3 lambda=0.66
solve b1=1E-3 lambda=0.68
solve b1=1E-3 lambda=0.7
solve b1=1E-3 lambda=0.72
solve b1=1E-3 lambda=0.74
solve b1=1E-3 lambda=0.76
solve b1=1E-3 lambda=0.78
solve b1=1E-3 lambda=0.8
```

```
solve b1=1E-3 lambda=0.82
solve b1=1E-3 lambda=0.84
solve b1=1E-3 lambda=0.86
solve b1=1E-3 lambda=0.88
solve b1=1E-3 lambda=0.9
solve b1=1E-3 lambda=0.92
solve b1=1E-3 lambda=0.94
solve b1=1E-3 lambda=0.96
solve b1=1E-3 lambda=0.98
solve b1=1E-3 lambda=1

Log off

#save outf=FINAL_Q_SOI2_HR_400.str
#tonyplot FINAL_Q_SOI2_HR_400.str


quit
```

APÊNDICE B – EXEMPLO DE ESTRUTURA MULTIFINGER

```
##############################################################################
# Arquivo:SOI_m40_ST013_HR
# data: 20/08/2012
#
# Potência fixa de 1mW/cm2, com tensão fixa, variando lambda de 200 a 1000nm
#
##############################################################################

go atlas
TITLE SOI_m40_ST013_HR

################################
# Especifying the initial mesh #
################################

set m=40
mesh space.mult=1.0
#
x.mesh loc=0.0     spac=0.5
x.mesh loc=0.33    spac=0.5
x.mesh loc=1.03    spac=0.5
x.mesh loc=1.36    spac=0.1
x.mesh loc=1.84    spac=0.1
x.mesh loc=2.17    spac=0.5
x.mesh loc=2.87    spac=0.5
x.mesh loc=3.2     spac=0.1
x.mesh loc=3.68    spac=0.1
x.mesh loc=4.01    spac=0.5
x.mesh loc=4.71    spac=0.5
x.mesh loc=5.04    spac=0.1
x.mesh loc=5.52    spac=0.1
x.mesh loc=5.85    spac=0.5
x.mesh loc=6.55    spac=0.5
x.mesh loc=6.88    spac=0.1
x.mesh loc=7.36    spac=0.1
x.mesh loc=7.69    spac=0.5
x.mesh loc=8.39    spac=0.5
x.mesh loc=8.72    spac=0.1
x.mesh loc=9.2     spac=0.1
x.mesh loc=9.53    spac=0.5
x.mesh loc=10.23   spac=0.5
x.mesh loc=10.56   spac=0.1
x.mesh loc=11.04   spac=0.1
x.mesh loc=11.37   spac=0.5
x.mesh loc=12.07   spac=0.5
x.mesh loc=12.4    spac=0.1
x.mesh loc=12.88   spac=0.1
x.mesh loc=13.21   spac=0.5
x.mesh loc=13.91   spac=0.5
x.mesh loc=14.24   spac=0.1
x.mesh loc=14.72   spac=0.1
x.mesh loc=15.05   spac=0.5
x.mesh loc=15.75   spac=0.5
x.mesh loc=16.08   spac=0.1
x.mesh loc=16.56   spac=0.1
x.mesh loc=16.89   spac=0.5
x.mesh loc=17.59   spac=0.5
x.mesh loc=17.92   spac=0.1
x.mesh loc=18.4    spac=0.1
x.mesh loc=18.73   spac=0.5
x.mesh loc=19.43   spac=0.5
x.mesh loc=19.76   spac=0.1
x.mesh loc=20.24   spac=0.1
x.mesh loc=20.57   spac=0.5
x.mesh loc=21.27   spac=0.5
x.mesh loc=21.6    spac=0.1
x.mesh loc=22.08   spac=0.1
x.mesh loc=22.41   spac=0.5
```

```
x.mesh loc=23.11   spac=0.5
x.mesh loc=23.44   spac=0.1
x.mesh loc=23.92   spac=0.1
x.mesh loc=24.25   spac=0.5
x.mesh loc=24.95   spac=0.5
x.mesh loc=25.28   spac=0.1
x.mesh loc=25.76   spac=0.1
x.mesh loc=26.09   spac=0.5
x.mesh loc=26.79   spac=0.5
x.mesh loc=27.12   spac=0.1
x.mesh loc=27.6    spac=0.1
x.mesh loc=27.93   spac=0.5
x.mesh loc=28.63   spac=0.5
x.mesh loc=28.96   spac=0.1
x.mesh loc=29.44   spac=0.1
x.mesh loc=29.77   spac=0.5
x.mesh loc=30.47   spac=0.5
x.mesh loc=30.8    spac=0.1
x.mesh loc=31.28   spac=0.1
x.mesh loc=31.61   spac=0.5
x.mesh loc=32.31   spac=0.5
x.mesh loc=32.64   spac=0.1
x.mesh loc=33.12   spac=0.1
x.mesh loc=33.45   spac=0.5
x.mesh loc=34.15   spac=0.5
x.mesh loc=34.48   spac=0.1
x.mesh loc=34.96   spac=0.1
x.mesh loc=35.29   spac=0.5
x.mesh loc=35.99   spac=0.5
x.mesh loc=36.32   spac=0.1
x.mesh loc=36.8    spac=0.1
x.mesh loc=37.13    spac=0.5
x.mesh loc=37.83   spac=0.5
x.mesh loc=38.16   spac=0.1
x.mesh loc=38.64   spac=0.1
x.mesh loc=38.97   spac=0.5
x.mesh loc=39.67   spac=0.5
x.mesh loc=40      spac=0.1
x.mesh loc=40.48   spac=0.1
x.mesh loc=40.81   spac=0.5
x.mesh loc=41.51   spac=0.5
x.mesh loc=41.84   spac=0.1
x.mesh loc=42.32   spac=0.1
x.mesh loc=42.65   spac=0.5
x.mesh loc=43.35   spac=0.5
x.mesh loc=43.68   spac=0.1
x.mesh loc=44.16   spac=0.1
x.mesh loc=44.49   spac=0.5
x.mesh loc=45.19   spac=0.5
x.mesh loc=45.52   spac=0.1
x.mesh loc=46      spac=0.1
x.mesh loc=46.33   spac=0.5
x.mesh loc=47.03   spac=0.5
x.mesh loc=47.36   spac=0.1
x.mesh loc=47.84   spac=0.1
x.mesh loc=48.17   spac=0.5
x.mesh loc=48.87   spac=0.5
x.mesh loc=49.2    spac=0.1
x.mesh loc=49.68   spac=0.1
x.mesh loc=50.01   spac=0.5
x.mesh loc=50.71   spac=0.5
x.mesh loc=51.04   spac=0.1
x.mesh loc=51.52   spac=0.1
x.mesh loc=51.85   spac=0.5
x.mesh loc=52.55   spac=0.5
x.mesh loc=52.88   spac=0.1
x.mesh loc=53.36   spac=0.1
x.mesh loc=53.69   spac=0.5
```

```
x.mesh loc=54.39   spac=0.5
x.mesh loc=54.72   spac=0.1
x.mesh loc=55.2    spac=0.1
x.mesh loc=55.53   spac=0.5
x.mesh loc=56.23   spac=0.5
x.mesh loc=56.56   spac=0.1
x.mesh loc=57.04   spac=0.1
x.mesh loc=57.37   spac=0.5
x.mesh loc=58.07   spac=0.5
x.mesh loc=58.4   spac=0.1
x.mesh loc=58.88   spac=0.1
x.mesh loc=59.21   spac=0.5
x.mesh loc=59.91   spac=0.5
x.mesh loc=60.24   spac=0.1
x.mesh loc=60.72   spac=0.1
x.mesh loc=61.05   spac=0.5
x.mesh loc=61.75   spac=0.5
x.mesh loc=62.08   spac=0.1
x.mesh loc=62.56   spac=0.1
x.mesh loc=62.89    spac=0.5
x.mesh loc=63.59   spac=0.5
x.mesh loc=63.92   spac=0.1
x.mesh loc=64.4    spac=0.1
x.mesh loc=64.73   spac=0.5
x.mesh loc=65.43   spac=0.5
x.mesh loc=65.76   spac=0.1
x.mesh loc=66.24   spac=0.1
x.mesh loc=66.57   spac=0.5
x.mesh loc=67.27   spac=0.5
x.mesh loc=67.6    spac=0.1
x.mesh loc=68.08   spac=0.1
x.mesh loc=68.41   spac=0.5
x.mesh loc=69.11   spac=0.5
x.mesh loc=69.44   spac=0.1
x.mesh loc=69.92   spac=0.1
x.mesh loc=70.25   spac=0.5
x.mesh loc=70.95   spac=0.5
x.mesh loc=71.28   spac=0.1
x.mesh loc=71.76   spac=0.1
x.mesh loc=72.09    spac=0.5
x.mesh loc=72.79   spac=0.5
x.mesh loc=73.12   spac=0.1
x.mesh loc=73.6   spac=0.1
x.mesh loc=73.93   spac=0.5
x.mesh loc=74.63   spac=0.5
x.mesh loc=74.96   spac=0.5

y.mesh loc=-0.031 spac=0.05
y.mesh loc=0.0    spac=0.05
y.mesh loc=0.075   spac=0.02
y.mesh loc=0.150  spac=0.05
y.mesh loc=0.550   spac=0.05


#*************** Regioes ****************************

region      num=1 y.min=0.0     y.max=0.150    x.min=0.0       x.max=74.96  silicon
region      num=2 x.min=0.0     x.max=0.33     y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=3 x.min=1.03    x.max=2.17     y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=4 x.min=2.87    x.max=4.01     y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=5 x.min=4.71    x.max=5.85     y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=6 x.min=6.55    x.max=7.69     y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=7 x.min=8.39    x.max=9.53     y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=8 x.min=10.23   x.max=11.37    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=9 x.min=12.07   x.max=13.21    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=10 x.min=13.91   x.max=15.05    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=11 x.min=15.75   x.max=16.89    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
```

```
region      num=12 x.min=17.59   x.max=18.73    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=13 x.min=19.43   x.max=20.57    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=14 x.min=21.27   x.max=22.41    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=15 x.min=23.11   x.max=24.25    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=16 x.min=24.95   x.max=26.09    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=17 x.min=26.79   x.max=27.93    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=18 x.min=28.63   x.max=29.77    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=19 x.min=30.47   x.max=31.61    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=20 x.min=32.31   x.max=33.45    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=21 x.min=34.15   x.max=35.29    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=22 x.min=35.99   x.max=37.13    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=23 x.min=37.83   x.max=38.97    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=24 x.min=39.67   x.max=40.81    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=25 x.min=41.51   x.max=42.65    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=26 x.min=43.35   x.max=44.49    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=27 x.min=45.19   x.max=46.33    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=28 x.min=47.03   x.max=48.17    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=29 x.min=48.87   x.max=50.01    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=30 x.min=50.71   x.max=51.85    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=31 x.min=52.55   x.max=53.69    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=32 x.min=54.39   x.max=55.53    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=33 x.min=56.23   x.max=57.37    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=34 x.min=58.07   x.max=59.21    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=35 x.min=59.91   x.max=61.05    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=36 x.min=61.75   x.max=62.89    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=37 x.min=63.59   x.max=64.73    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=38 x.min=65.43   x.max=66.57    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=39 x.min=67.27   x.max=68.41    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=40 x.min=69.11   x.max=70.25    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=41 x.min=70.95   x.max=72.09    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=42 x.min=72.79   x.max=73.93    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=43 x.min=74.63   x.max=74.96    y.min=-0.031    y.max=0.0    oxide
region      num=44 y.min=0.15       y.max=0.550    x.min=0.0       x.max=74.96
oxide


#**************** DEFINE THE ELECTRODES *****************

electrode   name=anode     x.min=0.33   x.max=1.03    y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=2.17   x.max=2.87    y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=4.01   x.max=4.71    y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=5.85   x.max=6.55    y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=7.69   x.max=8.39    y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=9.53   x.max=10.23   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=11.37  x.max=12.07   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=13.21  x.max=13.91   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=15.05  x.max=15.75   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=16.89  x.max=17.59   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=18.73  x.max=19.43   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=20.57  x.max=21.27   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=22.41  x.max=23.11   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=24.25  x.max=24.95   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=26.09  x.max=26.79   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=27.93  x.max=28.63   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=29.77  x.max=30.47   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=31.61  x.max=32.31   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=33.45  x.max=34.15   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=35.29  x.max=35.99   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=37.13  x.max=37.83   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=38.97  x.max=39.67   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=40.81  x.max=41.51   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=42.65  x.max=43.35   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=44.49  x.max=45.19   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=46.33  x.max=47.03   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=48.17  x.max=48.87   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=50.01  x.max=50.71   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=51.85  x.max=52.55   y.min=-0.031 y.max=0.0
```

```
electrode   name=cathode   x.min=53.69  x.max=54.39   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=55.53  x.max=56.23   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=57.37  x.max=58.07   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=59.21  x.max=59.91   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=61.05  x.max=61.75   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=62.89  x.max=63.59   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=64.73  x.max=65.43   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=66.57  x.max=67.27   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=68.41  x.max=69.11   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=70.25  x.max=70.95   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=cathode   x.min=72.09  x.max=72.79   y.min=-0.031 y.max=0.0
electrode   name=anode     x.min=73.93  x.max=74.63   y.min=-0.031 y.max=0.0


#*********** DEFINING THE DOPING CONCENTRATIONS ********

doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=0        x.max=1.36       y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=3.68     x.max=5.04       y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=7.36     x.max=8.72       y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=11.04    x.max=12.4       y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=14.72    x.max=16.08      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=18.4     x.max=19.76      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=22.08    x.max=23.44      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=25.76    x.max=27.12      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=29.44    x.max=30.80      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=33.12    x.max=34.48      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=36.8     x.max=38.16      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=40.48    x.max=41.84      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=44.16    x.max=45.52      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=47.84    x.max=49.20      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=51.52    x.max=52.88      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=55.2     x.max=56.56      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=58.88    x.max=60.24      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=62.56    x.max=63.92      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=66.24    x.max=67.6       y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=69.92    x.max=71.28      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=73.6     x.max=74.96      y.min=0
y.max=0.15


doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=1.84     x.max=3.2      y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=5.52     x.max=6.88     y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=9.2      x.max=10.56    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=12.88    x.max=14.24    y.min=0
y.max=0.15
```

```
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=16.56    x.max=17.92    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=20.24    x.max=21.6     y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=23.92    x.max=25.28    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=27.6     x.max=28.96    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=31.28    x.max=32.64    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=34.96    x.max=36.32    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=38.64    x.max=40       y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=42.32    x.max=43.68    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=46.00    x.max=47.36    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=49.68    x.max=51.04    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=53.36    x.max=54.72    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=57.04    x.max=58.40    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=60.72    x.max=62.08    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=64.4     x.max=65.76    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=68.08    x.max=69.44    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=71.76    x.max=73.12    y.min=0
y.max=0.15


doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=1.36     x.max=1.84     y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=3.2      x.max=3.68     y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=5.04     x.max=5.52     y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=6.88     x.max=7.36     y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=8.72     x.max=9.2     y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=10.56    x.max=11.04    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=12.4     x.max=12.88    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=14.24    x.max=14.72    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=16.08    x.max=16.56    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=17.92    x.max=18.4     y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=19.76    x.max=20.24    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=21.6     x.max=22.08    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=23.44    x.max=23.92    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=25.28    x.max=25.76    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=27.12    x.max=27.6     y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=28.96    x.max=29.44    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=30.8     x.max=31.28    y.min=0
y.max=0.15
```

```
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=32.64    x.max=33.12    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=34.48    x.max=34.96    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=36.32    x.max=36.8     y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=38.16    x.max=38.64    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=40       x.max=40.48    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=41.84    x.max=42.32    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=43.68    x.max=44.16    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=45.52    x.max=46.00    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=47.36    x.max=47.84    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=49.2     x.max=49.68    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=51.04    x.max=51.52    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=52.88    x.max=53.36    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=54.72    x.max=55.2     y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=56.56    x.max=57.04    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=58.4     x.max=58.88    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=60.24    x.max=60.72    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=62.08    x.max=62.56    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=63.92    x.max=64.4     y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=65.76    x.max=66.24    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=67.6     x.max=68.08    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=69.44    x.max=69.92    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=71.28    x.max=71.76    y.min=0
y.max=0.15
doping   uniform   conc=2E12 p.type reg=1 x.min=73.12    x.max=73.6     y.min=0
y.max=0.15


#*******************************************************************************
*

contact name=anode
contact name=cathode


#save outf=SOI_m$"m"_ST013_SR.str


#****************** Definição feixe de luz
****************************************

beam  num=1   x.origin=37.48   y.origin=-5.5E4   angle=90.0   wavelength=0.2

output minset


#Definição de modelos
```

```
models kla bgn consrh fldmob optr klaaug print temp=300
solve init

method newton autonr trap maxtrap=10 carriers=2
solve prev

#Aplicação de tensão

solve vanode=0 vstep=-0.1 vfinal=-1.5 name=anode

log outf=SOI_m$"m"_ST013_HR.log master
solve b1=1E-3 lambda=0.2
solve b1=1E-3 lambda=0.22
solve b1=1E-3 lambda=0.24
solve b1=1E-3 lambda=0.26
solve b1=1E-3 lambda=0.28
solve b1=1E-3 lambda=0.30
solve b1=1E-3 lambda=0.32
solve b1=1E-3 lambda=0.34
solve b1=1E-3 lambda=0.36
solve b1=1E-3 lambda=0.38
solve b1=1E-3 lambda=0.39
solve b1=1E-3 lambda=0.40
solve b1=1E-3 lambda=0.41
solve b1=1E-3 lambda=0.42
solve b1=1E-3 lambda=0.43
solve b1=1E-3 lambda=0.44
solve b1=1E-3 lambda=0.45
solve b1=1E-3 lambda=0.46
solve b1=1E-3 lambda=0.47
solve b1=1E-3 lambda=0.48
solve b1=1E-3 lambda=0.49
solve b1=1E-3 lambda=0.5
solve b1=1E-3 lambda=0.52
solve b1=1E-3 lambda=0.54
solve b1=1E-3 lambda=0.56
solve b1=1E-3 lambda=0.58
solve b1=1E-3 lambda=0.6
solve b1=1E-3 lambda=0.62
solve b1=1E-3 lambda=0.64
solve b1=1E-3 lambda=0.66
solve b1=1E-3 lambda=0.68
solve b1=1E-3 lambda=0.7
solve b1=1E-3 lambda=0.72
solve b1=1E-3 lambda=0.74
solve b1=1E-3 lambda=0.76
solve b1=1E-3 lambda=0.78
solve b1=1E-3 lambda=0.8
solve b1=1E-3 lambda=0.82
solve b1=1E-3 lambda=0.84
solve b1=1E-3 lambda=0.86
solve b1=1E-3 lambda=0.88
solve b1=1E-3 lambda=0.9
solve b1=1E-3 lambda=0.92
solve b1=1E-3 lambda=0.94
solve b1=1E-3 lambda=0.96
solve b1=1E-3 lambda=0.98
solve b1=1E-3 lambda=1

Log off

#save outf=FINAL_Q_SOI2_HR_400.str
#tonyplot FINAL_Q_SOI2_HR_400.str

quit
```