CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
EDSON JOSÉ RODRIGUES

SIMULAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE DISPOSITIVOS FOTOSSENSORES IMPLEMENTADOS EM TECNOLOGIA SOI

São Bernardo do Campo

2020

EDSON JOSÉ RODRIGUES

SIMULAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE DISPOSITIVOS FOTOSSENSORES IMPLEMENTADOS EM TECNOLOGIA SOI

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro Universitário FEI, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Orientado pela Profª. Drª Michelly de Souza.

São Bernardo do Campo
2020

Rodrigues, Edson José.
SIMULAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE DISPOSITIVOS FOTOSSENSORES IMPLEMENTADOS EM TECNOLOGIA SOI / Edson Rodrigues. São Bernardo do Campo, 2020.
103 p. : il.
Dissertação - Centro Universitário FEI.
Orientadora: Prof.ª Dra. Michelly de Souza.
1. Silício sobre isolante. 2. fotodiodos PIN. 3. absorção óptica. 4. eficiência quântica. 5. responsividade. I. Souza, Michelly de, orient. II. Título.

centro universitário FEI

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica

Mestrado

PGE-10

Aluno: Edson José Rodrigues **Matrícula:** 118103-1

Título do Trabalho: SIMULAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE DISPOSITIVOS FOTOSSENSORES IMPLEMENTADOS EM TECNOLOGIA SOI.

Área de Concentração: Nanoeletrônica e Circuitos Integrados

Orientador: Profª Drª Michelly de Souza

Data da realização da defesa: 21/12/2020

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

A banca considerou o candidato aprovado por unanimidade e solicitou a entrega de versão revisada considerando os comentários recebidos.

São Bernardo do Campo, / / .

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA	
Profª Drª Michelly de Souza	Ass.: _____
Prof. Dr. Rodrigo Trevisoli Doria	Ass.: _____
Profª Drª Luciana Pedrosa Salles	Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

_____

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

_____

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Aos meus pais Antonio (in memorian) e Ana Maria, que dignamente me apresentaram à importância da fé em Deus e dos valores da família no caminho da honestidade e persistência.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a DEUS por ter me dado fé, gratidão, sabedoria, persistência e livre arbítrio nas minhas escolhas.

À Prof. Dra. Michelly de Souza, minha orientadora, pela paciência, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho, pela motivação nos momentos mais críticos.

Aos amigos de pesquisa Felipe Furlan, Natasha Merzbahcer pela troca de experiências, pelos debates científicos e pelas conversas nos momentos de descontração.

Aos professores Dr. Rodrigo T. Doria, Dr. Marcelo A. Pavanello, Dr. Renato C. Giacomini e Dr. Rudolf T. Buhler, pela troca de experiências e pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso e deste trabalho.

À minha família, que sempre acreditou e me incentivou a trabalhar incessantemente na busca pelos meus objetivos.

À minha esposa Marineusa, que me ajudou em todos os momentos difíceis, pelo seu amor, companheirismo, paciência, pela compreensão e parceria.

Aos meus filhos, André e Pedro, que de alguma forma me inspiram a ser exemplo de persistência e dedicação.

Ao Centro Universitário FEI, por oferecer toda a infraestrutura necessária para alcançar os objetivos propostos neste trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro indispensável para a realização deste trabalho.

Ao Centro Paula Souza, por conceder o afastamento parcial das minhas atividades em prol do meu desenvolvimento e qualificação para melhor exercício do meu trabalho.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado e por mais esta conquista.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin Luther King)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise das principais características de desempenho de fotodiodos PIN laterais implementados em tecnologia SOI de camada fina, quando iluminados por comprimentos de onda, na faixa entre azul e ultravioleta (UV), e submetidos a variações de temperaturas. Simulações numéricas bidimensionais foram realizadas para analisar características tais como corrente fotogerada, absorção, eficiência quântica e responsividade. Nesta análise foi considerada a influência da variação entre 40 nm e 500 nm da espessura da camada de silício (t_{Si}) e do comprimento da região intrínseca (L_i) entre 5 e 30 μm para avaliação do desempenho do fotodiodo em diferentes comprimentos de onda, na faixa do azul e ultravioleta (UV). Foram estudados diferentes conjuntos de modelos físicos nas simulações, com o objetivo de reproduzir tendências reportadas na literatura. Através de medidas experimentais das intensidades de potências incidentes em função da distância, foram caracterizadas as fontes luminosas com o uso de diodos emissores de luz nos comprimentos de onda, ultavioleta UV (390 nm), violeta (410 nm) e azul (460 nm), adaptados para fornecerem a energia luminosa na região fotossensível dos fotodiodos experimentais também caracterizados para temperaturas entre 100 K e 400 K. As simulações mostram que há uma relação de dependência entre a espessura do filme de silício (t_{Si}) e o comprimento de região intrínseca (L_i), que quando avaliados e dimensionados simultaneamente possibilitam a otimização da eficiência quântica e da responsividade dos fotodiodos PIN SOI na definição da tecnologia para aplicações em comprimentos de ondas específicos. Os resultados mostram que eficiência quântica em torno de 28 % e responsividade em torno de 85 mA/W para uma dada tecnologia apresentaram a mesma tendência que os resultados experimentais, levando-se em conta a faixa de comprimento de onda e temperatura. Os resultados também mostram uma tendência quase linear da relação entre espessura do filme de silício (t_{Si}) e a absorção (profundidade de penetração da luz), de modo que, em espessuras mais finas de filme de silício o dispositivo será mais seletivo para comprimentos de ondas baixos, ou seja, mais próximos a UV.

Palavras-chave: Silício sobre isolante, fotodiodos PIN, fotodetector, absorção óptica, eficiência quântica, responsividade

ABSTRACT

This work presents an analysis of the main performance characteristics of lateral PIN photodiodes implemented in thin layer SOI technology, when illuminated by wavelengths, in the range between blue and ultraviolet (UV), and subjected to temperature variations. Two-dimensional numerical simulations were performed to analyze characteristics such as photocurrent, absorption, quantum efficiency, and responsivity. In this analysis, the influence of the variation between 40 nm and 500 nm of the silicon film thickness (t_{Si}) and the intrinsic length region (L_i) between 5 and 30 μm was considered to evaluate the performance of the photodiode at different wavelengths, in the range blue and ultraviolet (UV). Different sets of physical models were studied in the simulations, to reproduce trends reported in the literature. Through experimental measurements of the intensities of incident powers as a function of distance, light sources were characterized using light-emitting diodes at wavelengths, UV (390 nm), violet (410 nm), and Blue (460 nm), adapted for providing light energy in the photosensitive region of experimental photodiodes also characterized for temperatures between 100 K and 400 K. The simulations show that there is a dependency relationship between the silicon film thickness and the intrinsic length region (L_i), that when evaluated and scaled simultaneously it is possible to optimize the quantum efficiency and responsivity of the PIN SOI photodiodes in the definition technology for specific wavelength applications. The results show that the quantum efficiency around 28 % and responsiveness around 85 mA / W for a given technology showed the same trend as the experimental results, taking into account the wavelength and temperature range. The results also show an almost linear trend in the relationship between silicon film thickness (t_{Si}) and absorption (light penetration depth), so that, in thinner silicon film thickness, the device will be more selective for low wavelengths, that is, closer to UV.

Keywords: Silicon on insulator, PIN photodiodes, photodetector, optical absorption, quantum efficiency, responsivity

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Onda eletromagnética representada por um raio de duas frentes de onda. 15
Figura 2 - O espectro Eletromagnético, as frequências e os comprimentos de ondas encontrados na natureza em uma larga faixa mostrados em escala logarítmica para ilustrar todas as faixas importantes. 16
Figura 3 - Forma de uma onda eletromagnética. 17
Figura 4 – Reflexão e refração (absorção e transmissão) de um raio luminoso incidente entre dois meios distintos m e m'. 17
Figura 5 - Elétrons são ejetados da superfície do metal quando expostos a uma luz de frequência (f) com energia dos fótons (E) chamado Efeito Fotoelétrico. 19
Figura 6 - Célula de Brillouin da estrutura cúbica face-centrada. 21
Figura 7 - Banda de energia da estrutura do silício em função do momento de portadores (k). 22
Figura 8 - Transição direta de elétrons (esquerda), indireta (direita) em semicondutores como GaAs e Si respectivamente. 22
Figura 9 - Dependência do coeficiente de absorção (α_m) por comprimento de onda (λ) de luz incidente. 25
Figura 10 - Coeficiente de absorção óptica em função da energia do fóton e comprimento de onda e da faixa proibida do Ge (0,68 eV), Si (1,12 eV) e do GaAs (1,42 eV). 27
Figura 11 - Representação do nível de energia de absorção por Éxciton. 28
Figura 12 - Representação do nível de energia de absorção por impurezas dopantes e imperfeições. 28
Figura 13 - Profundidade de penetração no silício em função do comprimento de onda. 29
Figura 14 - Difusão de elétrons a um impulso no tempo t=0. 31
Figura 15 - Movimento de elétrons: A) Na ausência de campo elétrico. B) Na presença de campo elétrico. As estrelas representam as colisões. 32
Figura 16 - Processos de Recombinação através de Centros de Recombinação. 34
Figura 17 - Variação da concentração intrínseca de portadores e da largura da faixa proibida do silício para faixa de temperatura de 100 a 400 K. 36
Figura 18 - Comportamento da mobilidade em semicondutores do tipo P e tipo N com a variação de temperatura. 37
Figura 19 - Dependência aproximada da mobilidade com a temperatura devido ao espalhamento da rede e de impurezas. 38
Figura 20 - Coeficientes de absorção do Ge, Si e GaAs intrísencos, a temperaturas de 77 K e 300 K. 38
Figura 21 - Diagrama de bandas de Energia em regiões tipo P e tipo N separadas. 39
Figura 22 - Região de Depleção criada pelo processo de difusão de elétrons e lacunas 39
Figura 23 - Junção abrupta em equilíbrio térmico, distribuição da carga espacial, campo elétrico e potencial de junção (V_{Bi}). 40
Figura 24 - Representação esquemática de um fotodiodo PIN SOI. 43
Figura 25 - Módulo da corrente de escuro e com iluminação UV em função da tensão no fotodiodo para temperaturas entre 100 e 400 K. 45
Figura 26 - Módulo da Corrente total (I_D) simulado em três comprimentos de onda (UV, violeta e azul) e tensões reversas (V_D) entre -0,5 V é -1,5 V. 46

Figura 27 - Gráficos do módulo da corrente total I_D para os seis conjuntos de modelos simulados em função da temperatura, para diferentes comprimentos de onda incidentes. 54
Figura 28 - Módulo da Corrente Total (I_D) e da absorção em função do comprimento de onda(λ) simulada para V_D=-1 V para o conjunto 6. 56
Figura 29 - Módulo da corrente total (I_D) em função do comprimento de onda (λ) simulados para diferentes espessuras de camada de silício (t_{Si}). 57
Figura 30 - Absorção em função do comprimento de onda (λ) simulados para diferentes valores de espessura da camada de silício (t_{Si}), submetidos a uma potência luminosa incidente (P_{IN}) de 1 mW/cm^2.....58
Figura 31 - Comprimento de onda crítico em função da espessura de filme de silício. 59
Figura 32 - Absorção em função do comprimento de onda (λ), simulados para diferentes comprimentos de região intrínseca (L_i) submetidos a uma potência luminosa incidente (P_{IN}) de 1 mW/cm^2.....60
Figura 33 - Módulo da Corrente de escuro normalizada ($|I_{DARK}/W|$) simulada em função da tensão no fotodiodo V_D e da temperatura. 61
Figura 34 - Módulo da corrente total normalizada ($|I_D\backslash W|$) simulada em função da Potência luminosa Incidente (P_{IN}) por espessura de camada de silício (t_{Si}). 62
Figura 35 - Módulo da corrente total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função do comprimento da região intrínseca (L_i) para faixa de potências de incidência luminosa (P_{IN}) entre 100nW/cm^2 e 1 mW/cm^2. 63
Figura 36 - Módulo da Corrente total normalizada ($|I_D/W|$) em função do comprimento de onda (λ) simulada para comprimentos de região intrínseca (L_i) ente 5 μm e 30 μm e espessuras de camada de silício (t_{Si}) entre 40 nm e 500 nm em temperatura de 300 K, polarização V_D=-1 V e P_{IN} de 1 mW/cm^2. 64
Figura 37 - Módulo da Corrente Total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função do comprimento de onda (λ), para comprimentos de região intrínseca (L_i) ente 5 μm e 30 μm e espessuras de camada de silício (t_{Si}) entre 40 nm e 500 nm em temperatura de 300 K, polarização V_D=-1 V e P_{IN} de 1 mW/cm^2. 66
Figura 38 - Módulo da Corrente Total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função do comprimento de região intrínseca (L_i) para faixa de comprimento de onda e a uma Potência Luminosa incidente (P_{IN}). 67
Figura 39 - Módulo da Corrente Total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função do comprimento de região intrínseca (L_i) para o comprimento de onda UV, violeta e azul. 69
Figura 40 - Módulo da Corrente Total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função da espessura de silício (t_{Si}) para faixa de comprimento de onda a uma Potência Luminosa incidente (P_{IN}).....70
Figura 41 - Módulo da corrente total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função da espessura de filme de silício (t_{Si}) para comprimentos de ondas UV, violeta e azul. 71
Figura 42 - Módulo da corrente total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função da temperatura (T) considerando λ=390 nm e P_{IN}=1 mW/cm^2 para os seis conjuntos. 72
Figura 43 - Módulo da corrente total e da absorção para diferentes dispositivos com comprimentos intrínsecos (L_i) e espessuras de silício (t_{Si}) para uma faixa de temperatura de 100K a 450K.....74
Figura 44 - Análise de eficiência espectral em função do comprimento de onda (λ). 76

Figura 45 - Eficiência quântica total em função do comprimento de região intrínseca (L_i) e da espessura da camada de silício (t_{Si}). 76
Figura 46 - Responsividade e eficiência quântica externa em função do comprimento de região intrínseca para espessuras de filme de silício entre 80 nm e 1000 nm quando iluminados com UV, violeta e azul. 77
Figura 47 - Responsividade e eficiência quântica total em função da espessura de filme de silício para uma faixa de comprimentos de ondas entre 360 nm e 470 nm. 78
Figura 48 - Câmera escura para caracterização da fonte luminosa 80
Figura 49 – Exemplo de montagem dos LEDs em tampos de PVC com resistores e cabos para a caracterização das fontes luminosas. 81
Figura 50 - Espectrômetro RED TIDE USB650 Open Optics com cabo de USB e Fibra óptica em (a) e a fonte luminosa padrão para Calibração em (b). 81
Figura 51 - Câmera escura para caracterização das fontes luminosas a, b e c. 82
Figura 52 - Resultados experimentais da Potência Óptica Incidente por área (W/m^2). 83
Figura 53 - Dados experimentais da Potência óptica Incidente Total (P) em função da distância em mm. 84
Figura 54 – Microprovador LMTP com controlador modelo K20 da MMR Technologies disponíveil na sala de caracterização do Centro Universitário FEI. 85
Figura 55 - Vista frontal em corte da montagem da fonte luminosa no microprovador modelo K20 da MMR Technologies. 85
Figura 56 - Imagem microscópica de parte do fotodiodo PIN SOI lateral. 87
Figura 57 - Módulo da Corrente de escuro (I_{DARK}) em função da tensão no fotodiodo V_D e da temperatura. 88
Figura 58 - Módulo da corrente de escuro normalizada pela largura em função da temperatura para tensão V_D entre -0,25 a -1,5 V. 89
Figura 59 - Corrente total absoluta normalizada em função da temperatura para diferentes V_D e iluminada por três fontes luminosas. 90
Figura 60 - Responsividade e eficiência quântica total do fotodiodo em função da temperatura quando iluminado com luz UV, violeta e azul. 91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros tecnológicos e dimensões dos fotodiodos PIN SOI CMOS. 50
Tabela 2 - Conjuntos de modelos físicos utilizados para análise da corrente total I_D com variação da temperatura. 53
Tabela 3 - Coeficiente da corrente total (I_D) em relação à potência luminosa incidente (P_{IN}) para alguns fotodiodos PIN. 63
Tabela 4 - Resumo das especificações dos LEDs.....79
Tabela 5 - Parâmetros para a correção das medidas de distância entre a fonte luminosa e o difusor. 80
Tabela 6 - Intensidades de Potências luminosas medidas a 58 ± 2 mm de distância. 86
Tabela 7 - Parâmetros de diodos SOI PIN laterais. 87

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{FS}	Área fotossensível do dispositivo [m^2]
A	Área [m^2]
A_T	Área total do dispositivo [m^2]
c	Velocidade de propagação da luz no vácuo [3×10^8 m/s]
C_{OX}	Capacitância do óxido [F]
d	Largura da região de depleção total [m]
D	Coeficiente de difusão [cm^2/s]
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	Largura da região de depleção [m]
$\boldsymbol{E}$	Campo elétrico [V/m]
E	Energia do fóton [eV]
E_p	Energia do fônon [eV]
E_a	Energia do nível permitido para impurezas aceitadoras dentro do bandgap [eV]
E_C	Energia mínima da banda de condução [eV]
E_d	Energia do nível permitido para impurezas doadoras dentro do bandgap [eV]
E_e	Energia do nível de Exciton dentro do bandgap [eV]
E_F	Energia do nível de Fermi [eV]
E_g	Bandgap ou faixa proibida [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	Energia máxima da banda de valência [eV]
F (E)	Distribuição de Fermi-Dirac [adimensional]
F_N	Fluxo de elétrons devido a difusão [cm^{-2}/s]
F_P	Fluxo de lacunas devido a difusão [cm^{-2}/s]
f	Frequência [Hertz]

g_i	Taxa de geração [cm^{-3}/s]
G_{Ter}	Taxa de geração térmica [cm^{-3}/s]
h	Constante de Planck [$6,63x10^{-34}$J.s=$4,14x10^{-15}$eV.s]
I_{ACU}	Corrente de acumulação [A]
I_D	Corrente total [A]
I_{DARK}	Corrente de escuro [A]
I_{DISP}	Corrente disponível no dispositivo sem recombinação [A]
$I_{FG\,(max)}$	Corrente fotogerada máxima [A]
I_{FG}	Corrente gerada pela incidência de luz [A]
I_{INV}	Corrente de inversão [A]
I_{Ndif}	Corrente de difusão dos elétrons [A]
I_{Pdif}	Corrente de difusão das lacunas [A]
I_{RG}	Corrente de geração [A]
I_S	Corrente de saturação reversa [A]
J	Densidade de corrente total ideal [A/m^2]
J_n	Densidade de corrente de elétrons por unidade de área [A/m^2]
J_p	Densidade de corrente de lacunas por unidade de área[A/m^2]
J_{rg}	Densidade de corrente de geração e recombinação [A/m^2]
J_S	Densidade de corrente de saturação [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	Coeficiente de extinção [adimensional]
L	Comprimento de difusão [m]
L_{ABS}	Profundidade de penetração [m]
L_{dif}	Comprimento de difusão [m]
L_{Zd}	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]
m	meio de incidência de luz [adimensional]
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_C	Densidade de estados da banda de condução [adimensional]

N_D	Concentração de dopantes do tipo N [cm^{-3}]
N_i	Concentração de dopantes na região intrínseca [cm^{-3}]
n_i	Concentração intrínseca de portadores [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]
p	Momento linear da partícula de fóton [kg .m/s]
p	Concentração de lacunas em um semicondutor intrínseco [cm^{-3}]
p_0	Concentração de lacunas em equilíbrio [cm^{-3}]
P_a	Potência luminosa absorvida [W/cm^2]
P_{IN}	Potência luminosa incidente [W/cm^2]
P_r	Potência luminosa refletida [W/cm^2]
P_t	Potência luminosa transmitida [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_A	Fração da potência luminosa absorvida [adimensional]
P_R	Fração da potência luminosa refletida [adimensional]
P_T	Fração da potência luminosa transmitida [adimensional]
P (y)	Intensidade da potência dentro de um dado material [J/m^2 ou W/m^2]
q	Carga elementar do elétron [$1,6 \times 10^{-19}$ C]
R	Responsividade [A/W]
R_{ec}	Coeficiente de recombinação [cm^3/s]
T	Temperatura absoluta [K]
t_{ox}	Espessura do óxido de passivação [m]
t_{Box}	Espessura do óxido enterrado [m]
t_N	Profundidade das regiões N+ [m]
t_P	Profundidade das regiões P+ [m]
t_{Si}	Espessura da camada de silício [m]
U	Taxa de geração-recombinação intrínseca total [cm^{-3}/s]
U_R	Taxa de recombinação final [cm^{-3}/s]

V_{Bi}	Potencial de junção [V]
V_D	Tensão externa aplicada a uma junção PN [V]
V_T	Potencial térmico [V]
W	Largura do fotodiodo [m]
y	Distância de propagação dentro de um dado material [m]
α_m	Coeficiente de absorção [m^{-1}]
ε_{si}	Permissividade do silício [F/m]
ε_o	Constante Dielétrica absoluta [F/m]
ε_r	Constante Dielétrica relativa [F/m]
ζ	Campo elétrico originado pelos íons da região de depleção [V/m]
η	Máxima eficiência alcançável [adimensional]
λ	Comprimento de onda [nm]
λ_c	Maior comprimento de onda que pode ser absorvido pelo silício [m]
μ_N	Mobilidade dos elétrons [m^2/V.s]
μ_P	Mobilidade das lacunas [m^2/V.s]
v	Velocidade de propagação da luz em um dado material [m/s]
ρ	Densidade de cargas em um material [C.cm^{-3}]
ρ	Resistividade [Ω.cm]
σ	Condutividade [Ω^{-1}.cm^{-1}]
τ_e	Tempo de vida efetivo da geração térmica na região de depleção [s]
τ_{eff}	Tempo de vida efetivo dos elétrons [s]
τ	Tempo de vida dos portadores [s]
τ_0	Tempo de vida dos portadores gerados [s]
τ_n	Tempo de relaxação de elétrons [s]
τ_p	Tempo de relaxação de lacunas [s]
ω	Frequência angular [s^{-1}]
Φ_F	Potencial de Fermi [V]
ϕ	Ângulo de Incidência [°]
ϕ'	Ângulo Refletido [°]
ϕ''	Ângulo de Absorção [°]

LISTA DE ABREVIATURAS

AM	*Amplitude Modulation* - Amplitude Modulada
BGN	*Band Gap Narrowing* - Estreitamento da faixa proibida
BOX	*Buried Oxide* - Óxido Enterrado
CI	*Intergrated Circuit* - Circuito Integrado
CCD	*Charge Coupled Device* - Dispositivo de Acoplamento de Carga
CMOS	*Complementary Metal Oxide Semiconductor* - Semicondutor de Óxido de Metal Complementar
DAP	*Donnor-Acceptor Pair* - Par doador-aceitador
DNA	Ácido Desoxirribonucléico
DVD	Digital Versatile Disc - Disco Versátil Digital
EHP	Electron-Hole Pair - Par elétron-lacuna
ESD	Electrostatic Discharge - Descarga Eletrostática
FET	Field Effect Transistor - Transistor de Efeito de Campo
FM	*Frequency Modulation* -Frequência Modulada
IONIZ	*Ionization* - Ionização
IR	*Infrared* -Infravermelho
LASER	*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* - Amplificação de luz por estímulo de emissão de radiação
LED	*Light Emitting Diode* - Diodo Emissor de Luz
MOS	*Metal Oxide Semiconductor* - Semicondutor de Óxido de Metal
PN	Diodo de Junção PN positivo-negativo
PIN	Diodo de Junção PN positivo -intrínseco-negativo
RDD	Região de Depleção
RNA	Ácido Ribonucléioco
SHI	Shirahata
SNR	*Signal Noise Ratio* - Relação sinal-ruído [adimensional]
SOI	*Silicon On Insulator* - Silício Sobre Isolante
SRH	Shockley Read Hall
TV	*Television* - Televisão
UV	*Ultraviolet* - Ultravioleta

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **11**
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS **15**
2.1 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS 15
2.2 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO 16
2.3 REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ 17
2.4 EFEITO FOTOELÉTRICO 18
3. FÍSICA DOS SEMICONDUTORES **20**
3.1 BANDAS DE ENERGIA E PORTADORES DE CARGA 20
3.2 ABSORÇÃO ÓPTICA 24
3.3 TEORIA DE SEMICONDUTORES 29
3.3.1 Equações Básicas dos Semicondutores **30**
3.3.2 Difusão **31**
3.3.3 Deriva **32**
3.3.4 Processos de Geração e Recombinação **33**
3.4 EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM SEMICONDUTORES 35
3.4.1 Concentração intrínseca de portadores **35**
3.4.2 Mobilidade **36**
3.4.3 Coeficiente de absorção **38**
3.5 JUNÇÃO PN 39
3.5.1 Junção PN polarizada **41**
3.6 FOTODIODOS 42
3.6.1 Fotodiodo PIN SOI **42**
3.6.2 Desempenho em fotossensores **46**
3.6.3 Eficiência Quântica **46**
3.6.4 Responsividade **47**
3.6.5 Detectividade ou sensibilidade **48**
3.6.6 Outras tecnologias **48**
4. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS **49**

4.1 DISPOSITIVOS SIMULADOS 49
4.1.1 Estrutura 49
4.1.2 Modelos 50
4.2 ANÁLISE DOS DISPOSITIVOS SIMULADOS E RESULTADOS 52
4.2.1 Definição dos modelos e comportamentos elétricos 52
4.2.2 A absorção (%) e comprimento de onda crítico (λ_c) 56
4.2.3 Corrente de Escuro (I_{Dark}) 60
4.2.4 Influência da Potência Luminosa Incidente (P_{IN}) 61
4.2.5 Influência do comprimento da região intrínseca (L_i) 67
4.2.6 Influência da Espessura da camada de silício (t_{Si}) 69
4.2.7 Análise dos efeitos com a variação de temperatura 71
4.2.8 Análise da Eficiência Quântica Espectral 75
5. ANÁLISE EXPERIMENTAL 79
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES LUMINOSAS 79
5.1.1 Características dos LEDs 79
5.1.2 Aparato Experimental 80
5.1.3 Potência Óptica Incidente 82
5.2 RESULTADOS DAS MEDIDAS EXPERIMENTAIS 84
5.2.1 Características das Fontes luminosas 86
5.2.2 Características dos Fotodiodos SOI PIN 86
5.2.3 Resultados Experimentais 87
6. CONCLUSÕES 92
APÊNDICE A – Simulação de curva de corrente de um diodo PIN SOI lateral 98
APÊNDICE B – Artigo Publicado 100

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico da microeletrônica tem proporcionado a criação de componentes cada vez mais específicos e direcionados à novas tendências. O modelamento, caracterização e a fabricação desses novos dispositivos semicondutores tem facilitado a implementação e desenvolvimento de componentes cada vez menores, com baixo consumo de potência, largas faixas de temperaturas, detecção e sensoreamento integrados no mesmo chip (CHEN et al., 2019).

A luz é, provavelmente, a fonte de vida mais importante na terra ao lado do oxigênio. As interações com a luz são numerosas e tornaram-se objeto de estudos por muitos anos. Essas interações incluem a emissão de luz, propagação, recepção e todas as formas de modulações descritas pela fotônica, uma ciência focada em parte do espectro eletromagnético correspondente à luz. Particularmente, a luz pode ser emitida de várias maneiras, como por emissão solar, lâmpadas, lasers e diodos emissores de luz (LED). Neste trabalho será discutida a propagação da luz num semicondutor, a recepção da luz que constitui a maior parte desse trabalho será detalhada através do estudos dos fotodetectores (BULTEEL, 2011).

Sistemas ópticos são aplicados na elaboração de sensores com baixo consumo de potência que operam em comprimentos de onda desde a faixa de ultravioleta até o infravermelho.

Em comunicações com fibra ópticas, apresentam melhores desempenhos em comprimentos de onda em 1300 nm e 1550 nm, na faixa do infravermelho próximo (DEEN, 2014) e (SZE, 1981, p. 743). Uma das soluções no mercado das comunicações ópticas que tem sido considerada muito promissora é a implementação da tecnologia do Lifi na faixa de luz visível (ABDALLAH; KRICHEN; BOUDRIGA, 2020) , ou seja, oportunidade de uso de azul e ultravioleta.

Comprimentos de ondas entre azul e ultravioleta provaram sua importância em sistemas de comunicações especiais como, por exemplo, Blu-Ray (BULTEEL, 2011). Outra característica importante é que fotodetectores implementados em tecnologia SOI, 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 onde os portadores são gerados e o substrato, além de diminuir 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 390 nm.

No setor do meio ambiente, menciona-se a medição da taxa do ultravioleta na luz solar, a absorção de UV pelo ozônio ou a turbidez de um líquido caracterizado por um fator de reflexão dos raios ultravioleta através do líquido, analisadores de gás, sensores de chama no monitoramento em processos de combustão (LI et al., 2017) e monitoramento por radiação UV (FADHALI, 2008).

No campo biomédico, as aplicações dizem respeito, por exemplo, à absorção por bactérias nos baixos comprimentos de onda ou na quantificação da concentração de uma solução de DNA. Tais aplicações podem exigir uma precisão, miniaturização e sistemas portáteis. Graças a esta oportunidade de progressão tecnológica e miniaturização de fontes de luz, a busca pelo desenvolvimento de sistemas portáteis completos em um único chip tem aumentado o interesse para o campo biológico(BULTEEL; AFZALIAN; FLANDRE, 2010).

Dentre outras inúmeras aplicações de radiação UV, poderiam ser apresentadas aqui, vale lembrar que a exposição excessiva à radiação UV em humanos podem também causar queimaduras nas retinas, de pele e até mesmo o câncer de pele(SHAMSURI et al., 2017).

A incidência de luz em um dispositivo semicondutor promove a geração de portadores, o que pode contribuir para o aumento da corrente no dispositivo se o par elétron-lacuna gerado não se recombinar, mas for rapidamente separado pela ação de um campo elétrico. 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(BULTEEL; AFZALIAN; FLANDRE, 2010).

Isso é feito com ajuda de junções PN, que são frequentemente usadas como fotodetectores. Nestes dispositivos, pares elétron-lacuna são gerados por incidência de fótons em sua superfície e contribuem para aumentar a corrente reversa do diodo. A largura da região depletada, é então, um compromisso entre velocidade e sensibilidade (SZE, 1981, p. 749), ou seja, deve ser suficientemente grande para permitir a absorção de um número de fótons incidentes, o que gerará portadores e contribuirá para o aumento da fotocorrente, mas suficientemente curto para reduzir o tempo de vida para a deriva de portadores fotogerados (DE SOUZA et al., 2011). Uma maneira comum de aumentar a largura da região depletada é usar fotodiodos PIN. Estes diodos consistem em uma junção PN separada por uma região intrínseca(SZE, 1981, p. 754) com comprimento L_i, que, na prática, pode corresponder a um tipo P ou região do tipo N com baixa concentração de dopantes(STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015, p. 437; SZE, 1981, p. 754).

Este trabalho está dividido em sete capítulos, os quais estão organizados conforme descrito:

O segundo capítulo apresenta os principais fundamentos da óptica que descrevem as ondas eletromagnéticas, as principais fontes de radiação, a divisão entre as faixas de comprimentos de onda UV, visível e IR, como se interagem com os seres vivos e o meio ambiente.

O terceiro capítulo aborda as características relevantes dos semicondutores ópticos. Inicialmente, é apresentada a estrutura de bandas de energia e os principais fenômenos como absorção óptica, efeitos da temperatura que afetam a mobilidade de portadores e seus mecanismos de espalhamento e, consequentemente, na corrente de deriva sob alto campo elétrico. São estudados também os tempos de vida de geração e recombinação de portadores, o processo de difusão de portadores até que a estrutura atinja o equilíbrio térmico e os conceitos fundamentais de junção PN. Apresenta-se o desempenho de fotodiodos PIN implementados em tecnologia SOI e suas aplicações, são definidos parâmetros como eficiência quântica, absorção, transmissão, sensibilidade e responsividade. Estuda-se como o comportamento da concentração de portadores, da mobilidade e da corrente de escuro afetam o desempenho de fotodiodos quando submetidos a variações de temperaturas.

No quarto capítulo são apresentadas as simulações de fotodiodos PIN SOI. Foram simulados dispositivos com comprimentos da região intrínseca (L_i) entre 5 μm e 30 μm e espessura da camada de silício (t_{Si}) entre 40 nm e 500 nm. Além das estruturas, são descritos os modelos físicos utilizados para as simulações realizadas na faixa de temperaturas de 100 K a 400 K. Os resultados obtidos são utilizados para avaliar a corrente fotogerada, a absorção, a eficiência quântica e a responsividade em comprimentos de onda na faixa entre 200 nm e 800 nm.

No quinto capítulo, apresenta-se a metodologia aplicada para a obtenção de dados experimentais, a configuração do dispositivo para o levantamento e caracterização da fonte luminosa através do levantamento das intensidades luminosas com espectrômetro Ocean Optics USB640 em 6 LEDs na faixa do azul e ultravioleta variando-se a distância entre a fonte luminosa e o medidor, os resultados são apresentados através dos gráficos de intensidade de potência luminosa em função da distância. Através de um analisador de parâmetros de semicondutor marca Agilent e um sistema de microprovador com temperatura variável foram levantadas as curvas da corrente total do fotodiodo (I_D) em função da tensão aplicada para diferentes temperaturas e variando-se as fontes luminosas em um fotodiodo multidedos SOI

PIN lateral. Os resultados obtidos auxiliam na análise da eficiência quântica e da responsividade.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões relevantes acerca dos resultados obtidos através das simulações e dos dados práticos. Os modelos aplicados na análise das simulações auxiliam a compreensão dos efeitos elétricos estudados e com isso, a proposição de um conjunto de modelos elétricos que quando combinados, apresentam características muito similares aos resultados experimentais obtidos, o que facilita na previsão de resultados de eficiência quântica e de responsividade quando aplicados em dispositivos com outras tecnologias, levando em consideração o uso e aplicação para uma faixa de temperatura e faixa de comprimento de onda definidos.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

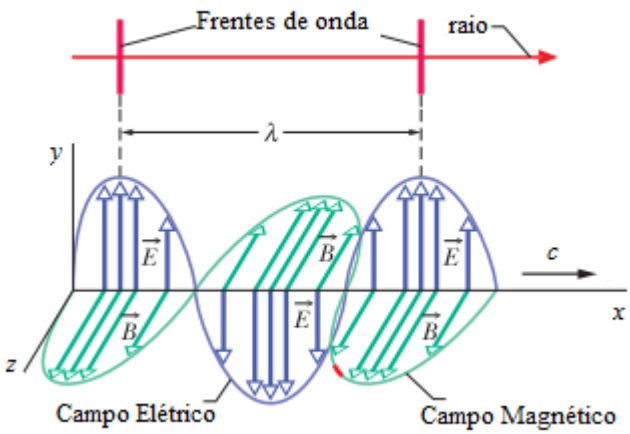
Serão abordados os conceitos básicos sobre a propagação ondas eletromagnéticas na faixa de espectro visível, UV e IR, bem como a reflexão e refração em diferentes meios de propagação e o conceito do efeito fotoelétrico na conversão de energia.

2.1 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A luz visível emitida pelo filamento brilhante de uma lâmpada é um exemplo onda eletromagnética. Outros tipos de ondas eletromagnéticas são produzidas por estações de TV e rádio, máquinas de raio X e núcleos radioativos (YOUNG; FREEDMAN, 2012).

As equações de Maxwell fornecem uma base teórica para compreensão das ondas eletromagnéticas. Ele reúne as leis de Coulomb, Gauss, Ampère e Faraday, reconhecendo suas importâncias e, particularmente, define as relações que preveem a existência eletromagnética através de distúrbios que consistem em campos elétrico $\vec{E}$ e magnético $\vec{B}$ perpendiculares e variáveis no tempo que viajam ou propagam-se de uma região do espaço para outra com velocidade de propagação da luz no vácuo c conforme ilustrado na Figura 1, mesmo que não exista matéria no espaço intermediário. Tais distúrbios, chamados ondas eletromagnéticas, fornecem a base física para ondas de luz, rádio e televisão, infravermelho, ultravioleta, raios X, e o restante do espectro eletromagnético (YOUNG; FREEDMAN, 2012, p. 1052).

Figura 1 - Onda eletromagnética representada por um raio de duas frentes de onda.



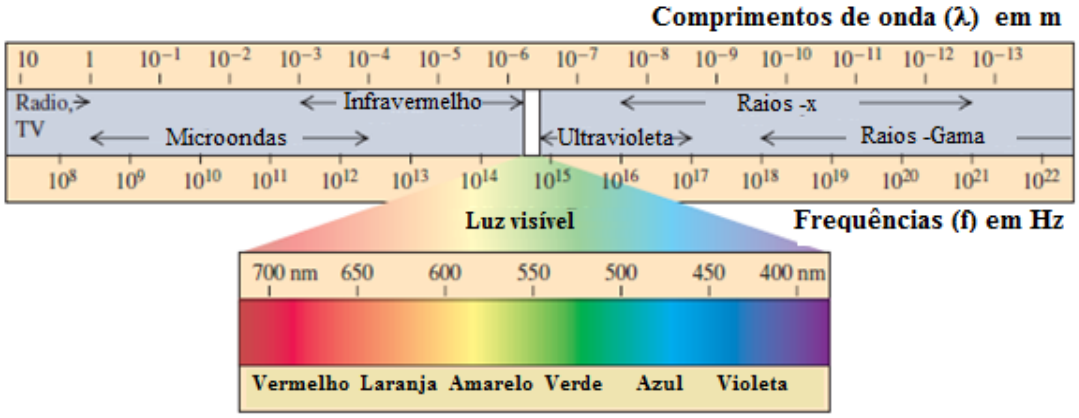
Fonte : Autor "adaptado de" (DAVID HALLIDAY, ROBERT RESNICK, 2014, p. 976)

Essas ondas carregam energia e momento, e no caso das ondas eletromagnéticas senoidais, os campos E são funções senoidais de tempo e posição, com frequência (*f*) e comprimento de onda (λ) definidos. Luz visível, rádio, raios X e outros tipos de ondas eletromagnéticas diferem somente em sua frequência e comprimento de onda (DAVID HALLIDAY, ROBERT RESNICK, 2014, p. 974). Este trabalho aborda o estudo da óptica na faixa do espectro eletromagnético onde os efeitos da luz ocorrem.

2.2 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

O espectro eletromagnético abrange ondas eletromagnéticas de todas as frequências e comprimentos de onda. A Figura 2 mostra em intervalos aproximados o comprimento de onda e a frequência para a porção mais importante do espectro eletromagnético. Apesar da vasta diferença de aplicações e meios de produção, todos eles são ondas eletromagnéticas, com a mesma velocidade de propagação no vácuo (YOUNG; FREEDMAN, 2012, p. 1053).

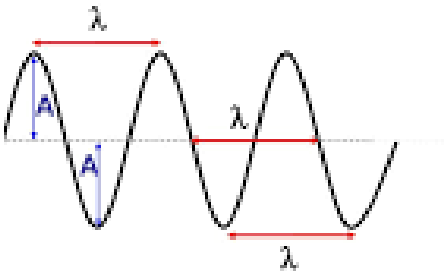
Figura 2 - O espectro Eletromagnético, as frequências e os comprimentos de ondas encontrados na natureza em uma larga faixa mostrados em escala logarítmica para ilustrar todas as faixas importantes.



Fonte: Autor "adaptado de"(YOUNG; FREEDMAN, 2012, p. 1054)

A Figura 3 indica a forma de uma onda eletromagnética e a equação (1) representa a relação entre frequência (*f*), a velocidade de propagação no vácuo (*c*), seu comprimento de onda (λ) e sua amplitude (A) (DAVID HALLIDAY, ROBERT RESNICK, 2014, p. 1154).

Figura 3 - Forma de uma onda eletromagnética.



Fonte: Autor

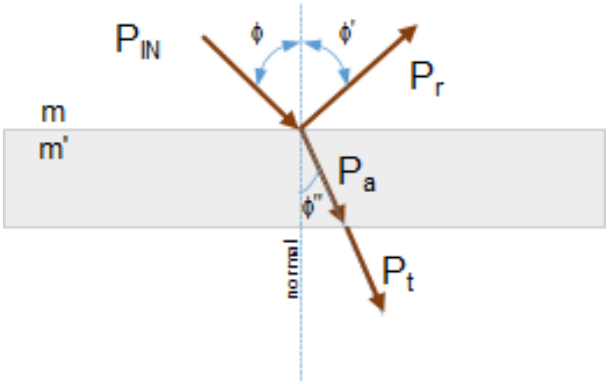
$$f = \frac{c}{\lambda} \tag{1}$$

2.3 REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ

Embora as ondas luminosas se espalhem ao se afastar de uma fonte, a hipótese de que a luz se propaga em linha reta constitui, frequentemente, uma boa aproximação. A incidência da luz sobre dois meios diferentes (m e m'), com diferentes índices de refração resulta na divisão em duas frações e direções diferentes, uma refletida e outra refratada (DAVID HALLIDAY, ROBERT RESNICK, 2014).

Conforme apresentado na Figura 4, sendo potência da luz incidente sobre o objeto (P_{IN}), potência refletida pela superfície do objeto (P_r), a potência refratada, sendo que esta parcela ainda pode ser dividida em duas como Potência absorvida (P_a) representada pela absorção óptica (STENZEL, 2016, p. 98) e Potência Transmitida (P_t).

Figura 4 – Reflexão e refração (absorção e transmissão) de um raio luminoso incidente entre dois meios distintos m e m'.



Fonte: Adaptado de " (DAVID HALLIDAY, ROBERT RESNICK, 2014, p. 991; STENZEL; OHLIDAL, 2018, p. 409)

De acordo com a lei de conservação de Energia a soma de cada uma das frações resulta em (2). Assim, tem se:

$$\frac{P_r}{P_{IN}} + \frac{P_a}{P_{IN}} + \frac{P_t}{P_{IN}} = 1 \tag{2}$$

A relação entre a potência refletida e a potência incidente ($\frac{Pr}{P_{IN}}$) é chamada de Refletividade, que ocorrerá sempre que houver mudança do meio, pois com meios diferentes haverá ângulos de incidências e polarizações diferentes e, portanto, parte da energia será refletida. Cada meio (m) é caracterizado por um parâmetro chamado índice de refração, (N_m), que determina a velocidade com que o raio se propaga naquele meio. O índice de refração (N_m) é, na verdade, um índice complexo (AFZALIAN; FLANDRE, 2003), pois a propagação da onda eletromagnética tem natureza complexa, já que é composta dos vetores $\vec{E}$ e $\vec{B}$ (campo elétrico e magnético) e é dado pela equação (3).

$$N_m = n_m - j\, k_m \tag{3}$$

A grande maioria dos objetos em seu ambiente são visíveis porque refletem a luz de maneira difusa de suas superfícies. O índice de refração de um material óptico em um meio (também chamado de refração), denotado por n_m é a razão entre a velocidade de propagação da luz no vácuo (c) e a velocidade de propagação da luz no meio ou material (v) é a parte real do índice de refração (YOUNG; FREEDMAN, 2012, p. 1081):

$$n_m = \frac{c}{v} \tag{4}$$

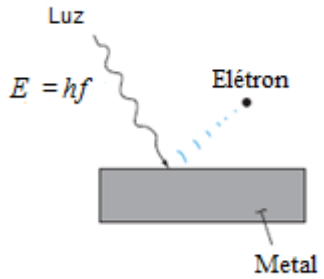
2.4 EFEITO FOTOELÉTRICO

Uma observação importante feita por Planck indicou que a radiação de uma amostra, conhecida como radiação de corpo negro, é emitida em unidades discretas de energia chamadas de quanta (fótons). As unidades de energia do fóton (E) foram descritas por hf, onde f é a freqüência da radiação e h é uma quantidade agora chamada constante de Planck (DAVID HALLIDAY, ROBERT RESNICK, 2014, p. 1154).

Logo depois que Planck desenvolveu essa hipótese, Einstein interpretou um importante experimento que demonstrou claramente a discreta natureza (quantização) da luz. Uma luz

monocromática é incidente na superfície de uma placa de metal no vácuo. Os elétrons no metal absorvem a energia da luz, e alguns dos elétrons recebem energia suficiente para serem ejetados da superfície do metal no vácuo. Esse fenômeno chamado de Efeito Fotoelétrico é representado esquematicamente na Figura 5 (STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015, p. 54).

Figura 5 - Elétrons são ejetados da superfície do metal quando expostos a uma luz de frequência (*f*) com energia dos fótons (*E)* chamado Efeito Fotoelétrico.



Fonte: Autor "adapatado de" (STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015, p. 54)

As relações de Planck e De Broglie são fundamentais em fisica quântica e são válidas para todas as situações e objetos, incluindo fótons e elétrons. Elas conectam a descrição do fenômeno da onda através da frequência (*f*) e comprimento de onda (λ) com a partícula através da energia (*E*) e o momento linear da partícula de fóton (*p*), também conhecida como equação (5) do movimento de partícula do comprimento de onda De Broglie (RUDAN, 2015, p. 143) .

$$\lambda = \frac{h}{p} \Rightarrow \; p = \frac{h}{\lambda} = \frac{hf}{\lambda f} = \frac{E}{c} \tag{5}$$

Dispositivos ópticos são elementos que operam com partículas básicas de luz, que utilizam o fóton como elemento principal para transporte de energia. Estes dispositivos ópticos podem ser divididos em três grupos básicos: dispositivos que convertem energia elétrica em radiação ótica, podemos citar como exemplo diodos LED e laser, dispositivos que detectam sinais ópticos através de processos eletrônicos, a exemplo dos fotodetectores e fotossensores e os dispositivos que convertem radiação ótica em energia elétrica observado nas células solares e dispositivos fotovoltaicos (SZE, 1981, p. 681).

3. FÍSICA DOS SEMICONDUTORES

Neste capítulo, são introduzidos conceitos básicos da física dos semicondutores, tais como bandas de energia. São descritos os conceitos de transições diretas e indiretas em semicondutores aplicados em optoeletrônica. Avalia-se também o princípio de operação de fotodiodos, mostrando uma pequena parte da vasta literatura. O processo de difusão e deriva em junções PN dentro da região de depleção, passando pela geração/recombinação, pelos efeitos causados na mobilidade com a variação da temperatura, tempo de vida de portadores em fotodiodos, explorando as diferentes formas de absorção e suas características são também apresentados.

3.1 BANDAS DE ENERGIA E PORTADORES DE CARGA

A estrutura eletrônica dos semicondutores tem sido extensivamente estudada nas últimas decadas, esta área de pesquisa agora está completamente madura e pode ser usada para prever as propriedades eletrônicas, ópticas, térmicas, magnéticas e mecânicas dos semicondutores na fabricação de dispositivos (GUTIERREZ; DEEN; CLAEYS, 2001, p. 2).

A estrutura das bandas de energia de um semicondutor determina não apenas as suas propriedades elétricas, mas também suas propriedades ópticas, como a absorção de fótons e a probabilidade de transições radiativas de elétrons da banda de condução para a banda de valência (ZIMMERMANN, 2010, p. 3).

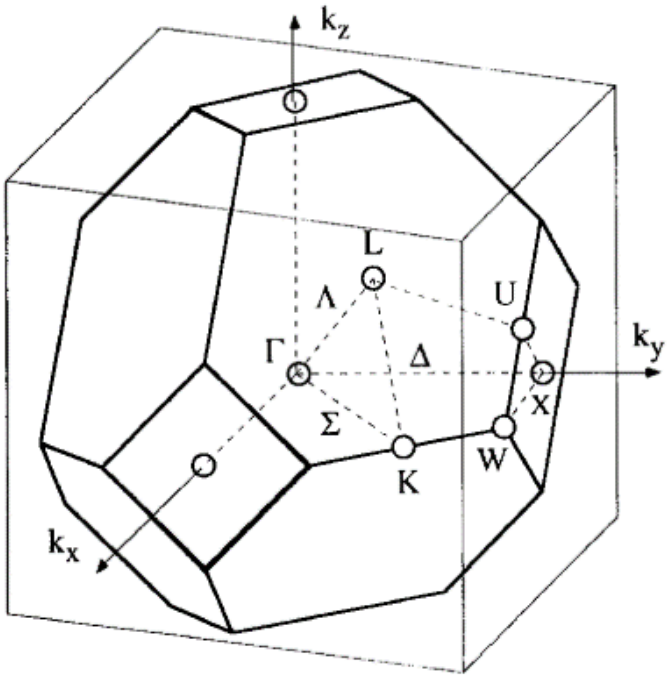
No silício a estrutura de bandas de energia pode ser entendida se considerarmos o modelo de um cristal com os átomos em suas posições adequadas, separados por distâncias definidos pela estrutura de sua rede cristalina.

Cada posição define os níveis de energia que refere-se a quantidade de energia de cada átomo idêntico isolado somados. Para N átomos idênticos em tal rede, existem N níveis de energia iguais. Essas energias são discretas e separadas por amplas faixas de energias proibidas. À medida que os átomos se aproximam, os níveis discretos de energia se ampliam em faixas de níveis através da interação dos átomos em regiões/posições definidas, tendo níveis de energia ligeiramente diferente umas das outras. A faixa de energia de uma banda é independente do número de átomos no cristal, mas dependente de seu espaçamento interatômico e do nível de energia a partir do qual a banda de energia (Eg) surgiu (GUTIERREZ; DEEN; CLAEYS, 2001, p. 7).

Devido à periodicidade da rede, a estrutura da banda de energia E em função do momento de portadores (k) pode ser expressa em um período da rede recíproca denominado a

primeira zona de Brillouin, que é um período centrado na origem do cubo (Γ). A célula de Brillouin é construída desenhando planos bisectores perpendiculares na rede recíproca do centro escolhido para os locais de rede recíproca equivalentes mais próximos. As linhas traçadas do ponto central (Γ) aos oito cantos do cubo formam os planos bissetores. O resultado é um octaedro truncado dentro do cubo (GUTIERREZ; DEEN; CLAEYS, 2001, p. 3) conforme mostrado na Figura 6.

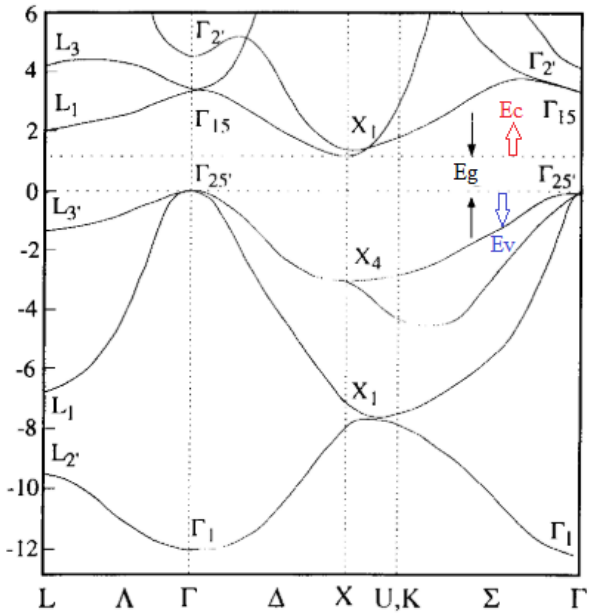
Figura 6 - Célula de Brillouin da estrutura cúbica face-centrada.



Fonte: (GUTIERREZ; DEEN; CLAEYS, 2001, p. 7)

A estrutura da banda de energia para o silício foi calculada ao longo dos pontos de simetria e linhas de simetria mais importantes, como o centro da célula (Γ), os eixos <111>, (Λ) e suas interseções com a borda da célula (L), os eixos <100> , (Δ) e suas interseções, X e os eixos <110> ,(Σ) e suas interseções (K). A Figura 7 mostra as bandas de energia calculadas para o silício ao longo do eixo principal de simetria. Como pode ser visto, existe uma região de energia na qual os estados eletrônicos não são encontrados, essa região é conhecida como faixa proibida ou *bandgap* de energia (Eg) e os estados eletrônicos são permitidos acima e abaixo desse *bangap* de energia. As bandas acima desse *bandgap* são chamadas de bandas de condução (E_C) e as bandas abaixo, de bandas de valência (E_V). A região de *bandgap* é definida em torno dos mínimos da banda de condução, ou os máximos da banda de valência (GUTIERREZ; DEEN; CLAEYS, 2001, p. 8).

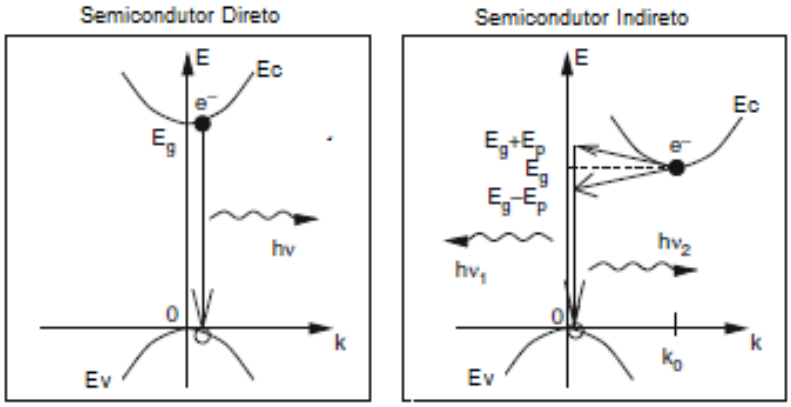
Figura 7 - Banda de energia da estrutura do silício em função do momento de portadores (k).



Fonte: Autor "adaptado de" (GUTIERREZ; DEEN; CLAEYS, 2001, p. 8)

A maneira como se dá a transição de energia dos portadores (elétrons e lacunas) entre as bandas de valência (Ev) e banda de condução (Ec) definem se o semicondutor é direto ou indireto. Existem dois requisitos para transições de elétrons entre as bandas de valência e condução e vice-versa: (a) a energia deve ser conservada e (b) o vetor de onda ou momento dos portadores (*k*) deve ser conservado, ou seja, deve ser o mesmo. De fato, elétrons e lacunas podem se mover entre as bandas de valência e condução, por diversos mecanismos que determinam se o semicondutor apresenta uma faixa proibida (*bandgap* - E_g) direto ou indireto (SZE, 1981). A Figura 8 apresenta a transiçãode elétrons entre as bandas de valência (Ev) e banda de condução (Ec) em semicondtores direto e indireto.

Figura 8 - Transição direta de elétrons (esquerda), indireta (direita) em semicondutores como GaAs e Si respectivamente.



Fonte: Autor "adaptado de" (YACOBI, 2004, p. 84; ZIMMERMANN, 2010)

Em um semicondutor de *bandgap* direto, como o arseneto de gálio (GaAs), o mínimo nível da banda de condução (onde elétrons livres estão localizados) ocorre no mesmo vetor de onda ou momento de portadores (k) onde ocorre o nível máximo da banda de valência. Portanto, quando um elétron da banda de condução se recombina com uma lacuna na banda de valência, no mesmo momento (k) é chamado de semicondutor de banda direta e o "salto" de um elétron da banda de condução para a banda de valência é chamada "recombinação banda-para-banda" ou entrebandas (COLINGE, 2002),(YACOBI, 2004, p. 83) (GRUNDMANN, 2006, p. 221).

Como o momento k é conservado neste exemplo, o evento de recombinação requer apenas um elétron e uma lacuna ambos em $k = 0$. Como a maioria dos elétrons ocupa a banda de condução em $k = 0$ ou próximo, a recombinação é um mecanismo muito provável.

Quando um evento de recombinação ocorre, a lei de conservação de energia também implica que um quantum de energia é liberado na forma de um fóton. A equação (6), corresponde a energia do *bandgap* E_g de transição da banda de valência (E_V) para a banda de condução (E_C) e a equação (7), descreve energia como uma relação da constante de Plank h, a velocidade da luz no vácuo (c), e o comprimento de onda (λ) que também podem ser associados, à energia equivalente a transição da banda proibida combinados com a energia proveniente da geração (E_g - E_p) ou consumo (E_g + E_p) de fônons(ZIMMERMANN, 2010, p. 4).

$$E_g = E_C - E_V \tag{6}$$

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = E_g \pm E_p \tag{7}$$

Em semicondutores de *bandgap* direto como GaAs e InP, os fótons emitidos por eventos de recombinação têm uma energia correspondente à luz visível (400nm - 700nm) (ZIMMERMANN, 2010, p. 5). Um evento de recombinação onde os fótons são emitidos é chamada de recombinação radiativa e é explorada em dispositivos como diodos emissores de luz.

Em semicondutores de *bandgap* indireto como Germânio e o Silício, a transição de um elétron entre o máximo da banda de valência e o mínimo da banda de condução, ou vice-versa, não pode ser satisfeita, pois como ocorrem em momentos de portadores (k) distintos (COLINGE, 2002, p. 75).

Como não há conservação do momento de potadores (k), a geração de um fônon (Ep) para que a lei de conservação de energia seja satisfeira possui maior probabilidade de ocorrer

do que o consumo de um fônon. Da mecânica quântica, no entanto, é sabido que a probabilidade de todas as transições eletrônicas combinadas com transições fonônicas é muito pequena.A probabilidade de transições radiativas em semicondutores indiretos é de fato quatro a seis ordens de grandeza inferiores às dos semicondutores diretos. Dispositivos de silício, portanto, geralmente são emissores de luz muito fracos (ZIMMERMANN, 2010, p. 4).

A energia de um fóton pode ser transferida para um elétron na banda de valência que é levado para a banda de condução, quando a energia do fóton é maior que a energia do *bandgap*. O fóton é absorvido durante esse processo e um par elétron-lacuna é gerado. Fótons com uma energia menor, no entanto, não podem ser absorvidos e o semicondutor se torna transparente para luz com comprimentos de onda maiores que λ_c. Logo, o λ_{max} será (8) (ZIMMERMANN, 2010, p. 4):

$$\lambda_c \leq \frac{h\,c}{E_g} = \lambda_{max} \tag{8}$$

3.2 ABSORÇÃO ÓPTICA

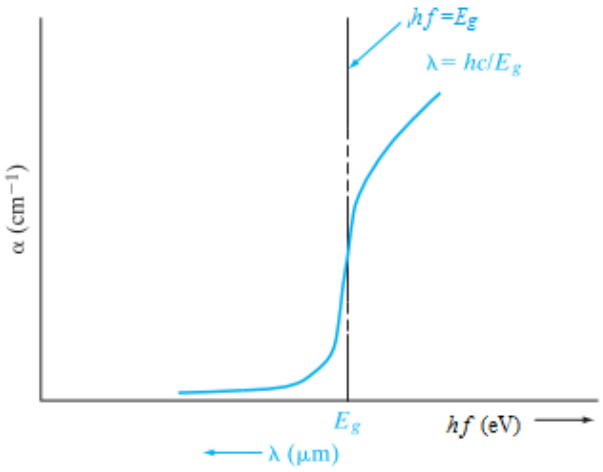
A propagação da luz é melhor descrita por um modelo de onda, mas a compreensão das emissões e da absorção requerem uma abordagem de partículas. Dessa forma, a parte imaginária do índice de refração é chamada de coeficiente de extinção (k_m) e determina o coeficiente de absorção (α_m) de acordo com a equação (9) (AFZALIAN; FLANDRE, 2003, p. 55), (SOFTWARE, 2017, p. 631):

$$\alpha_m(\lambda) = \frac{4\pi k_m}{\lambda} \tag{9}$$

A absorção de luz em um semicondutor é indicada pelo coeficiente de absorção (α_m), Como o coeficiente de absorção óptica é uma função do comprimento de onda (9) e também do tipo de material (8) (STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015, p. 143), a faixa de comprimentos de onda que contribui para uma fotoexcitação considerável é limitada. Como a maioria dos fotodiodos usa a fotoexcitação entre bandas, o comprimento de onda máximo ou crítico (λ_c) é estabelecido pelo intervalo de energia do semicondutor onde $hf = E_g$. Para comprimentos de onda maiores que λ_c ou seja, para $hf < E_g$, os valores de α_m são muito pequenos para permitir uma absorção apreciável. Para comprimentos de onda menores que λ_c, ou seja, $hf > E_g$, os valores de α_m são muito grandes e a radiação é absorvida muito perto da superfície,

onde a recombinação é mais provável,(SZE; NG, 2007, p. 672), Figura 9 mostra o gráfico do coeficiente de absorção em função de λ e de E_g.

Figura 9 - Dependência do coeficiente de absorção (α_m) por comprimento de onda (λ) de luz incidente.



Fonte: Autor "adaptado de" (STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015, p. 145)

A absorção, portanto, não determina apenas se a luz pode ser absorvida para fotoexcitação considerável, mas também indica onde a luz é absorvida. Um alto valor do coeficiente de absorção indica que a luz é absorvida perto da superfície onde a luz incide. Um valor baixo significa que a absorção é baixa e a luz pode penetrar mais profundamente no semicondutor. Para longos comprimentos de onda, a luz pode ser transparente sem fotoexcitação (SZE; NG, 2007, p. 664).

Em geral, existem vários processos de absorção óptica, e cada um deles contribui para o coeficiente de absorção total α. Esses mecanismos incluem (i) processo de absorção fundamental, (ii) absorção por exciton, (iii) absorção devido a dopantes e imperfeições, (iv) absorção devido a transições entrebandas e (v) absorção de portador livre. Em energias de fótons maiores que o *bandgap* (E_g), o mecanismo de absorção é devido à transferência de elétrons da banda de valência para a banda de condução (REICHARDT; HEBBINK; DRIVE, 2002, p. 81).

Em energias ligeiramente abaixo do E_g, o mecanismo de absorção é devido aos excitons e transições entre impureza e estados de banda (por exemplo, aceitador para banda de condução e valência para doador). A absorção de portadores livres devida às transições nas faixas de energia resulta em uma absorção contínua com energias mais baixas.

O processo de absorção fundamental, em geral, ocorre em semicondutores de E_g de transição direta, pois em semicondutores de *bandgap* indireto, a absorção é relativamente mais fraca em comparação com os materiais com *bandgap* direto. A absorção óptica é descrita por um coeficiente de absorção para transições diretas (α_d) entre as bandas de valência e de condução conforme (10), sendo A uma constante ($A=10^4$) (YACOBI, 2004, p. 82):

$$\alpha_d(hf) = A(hf - Eg)^{1/2} \tag{10}$$

Para transições indiretas (α_i), que também envolvem a participação dos fônons, o coeficiente de absorção pode ser escrito conforme (11):

$$\alpha_i(hf) = \frac{A(hf - Eg + E_p)^2}{e^{(E_p/kT)} - 1} \tag{11}$$

Este coeficiente de absorção e a espessura da camada de absorção desempenham um papel importante na determinação da potência absorvida, P_{abs}. De fato, devido à absorção, depois de percorrer uma distância (y) no meio absorvente m, a intensidade de potência luminosa incidente (P_{IN}) diminui conforme previsto (ZIMMERMANN, 2010, p. 6) pela lei de Lambert-Beer para:

$$P(y) = P_{IN} . e^{-\alpha_m y} \tag{12}$$

O coeficiente de absorção determina a profundidade de penetração $1/\alpha_m$ da luz no material semicondutor. É possível observar que haverá uma parcela desprezível de absorção para grandes comprimentos de onda (λ) e uma considerável parcela para comprimentos de ondas pequenos, em faixas de energia maiores que E_g. A equação (13) estabelece um parâmetro de relação entre o comprimento de onda (λ) e a energia de faixa proibida (E_g) (COLINGE, 2002, p. 75), (STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015, p. 144):

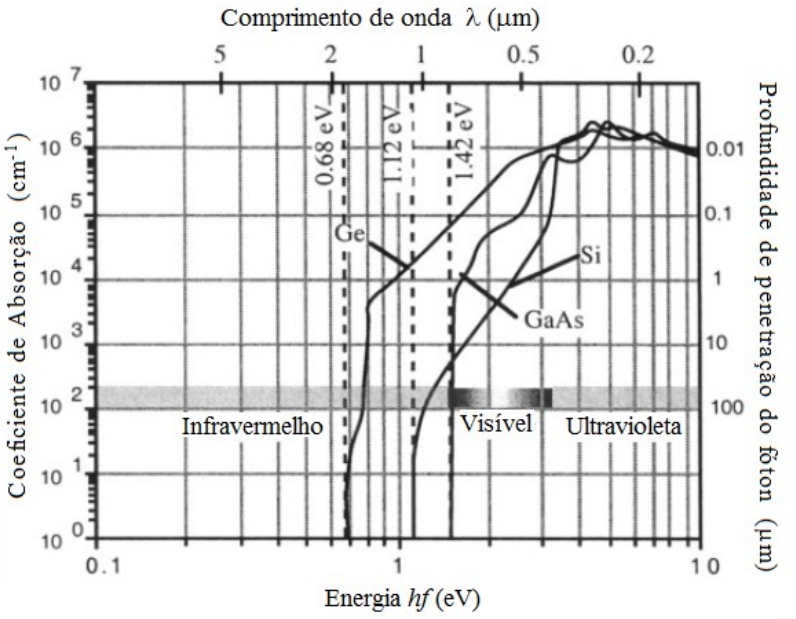
$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1{,}24}{\lambda} \geq E_g \tag{13}$$

O silício possui um *bandgap* indireto, o comprimento de onda de absorção máxima é cerca de 1100 nm, próximo do infravermelho. Contrariamente, germânio e arseneto de gálio são semicondutores de *bandgap* direto. Devido ao seu pequeno *bandgap*, o germânio é preferido para absorção máxima em um comprimento de onda maior, cerca de 1880 nm, enquanto que o GaAs é usado para absorção máxima em comprimentos de onda em torno de 870 nm (Bulteel, 2011, p. 9).

Os semicondutores são transparentes aos fótons com energia (*hf*) menor que a energia da faixa proibida. Os fótons com energia (*hf)* igual ou superior à energia da faixa proibida dos semicondutores, podem ser absorvidos para gerarem pares elétron-lacuna(COLINGE, 2002, p. 76).

O coeficiente de absorção é uma medida da distância que uma onda de luz viaja através do material antes de ser absorvida. Coeficientes de absorção óptica para alguns materiais semicondutores são mostrados na Figura 10. Nota-se que a faixa proibida destes semicondutores, apresentam absorção máxima da luz em uma porção do espectro próximo à luz visível, infravermelho e ultravioleta (COLINGE, 2002, p. 76).

Figura 10 - Coeficiente de absorção óptica em função da energia do fóton e comprimento de onda e da faixa proibida do Ge (0,68 eV), Si (1,12 eV) e do GaAs (1,42 eV).

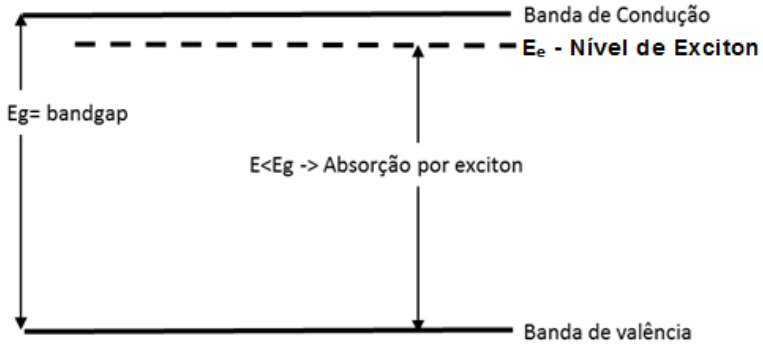


Fonte: Autor "adaptado de"(COLINGE, 2002, p. 77).

A inclinação do início da absorção depende do tipo de transição entre as bandas. Para transições diretas, a inclinação é grande. O Germânio (Ge) cobre a mais ampla faixa de comprimento de onda, incluindo 1,3 μm e 1,54 μm que são usados para transmissão de dados ópticos de longa distância por meio de fibras ópticas. Os detectores de silício também são apropriado para a faixa espectral do visível ao infravermelho próximo. O coeficiente de absorção do Si, no entanto, é de uma a duas ordens de magnitude menor que os semicondutores diretos nessa faixa espectral. Para detectores de Si, portanto, é necessária uma zona de absorção muito mais espessa do que para os semicondutores diretos(ZIMMERMANN, 2010, p. 6).

A absorção por exciton é observada na Figura 11, em energias ligeiramente inferiores ao *bandgap* de um semicondutor. Os estados excitônicos estão com energias logo abaixo da banda de condução e podem existir em uma série de estados ligados entre o nível de condução e um nível exciton. Níveis excitônicos são normalmente observáveis a temperaturas tão baixas, que kT são menores que a energia de ligação excitônica. (REICHARDT; HEBBINK; DRIVE, 2002, p. 85),(GRUNDMANN, 2006, p. 225).

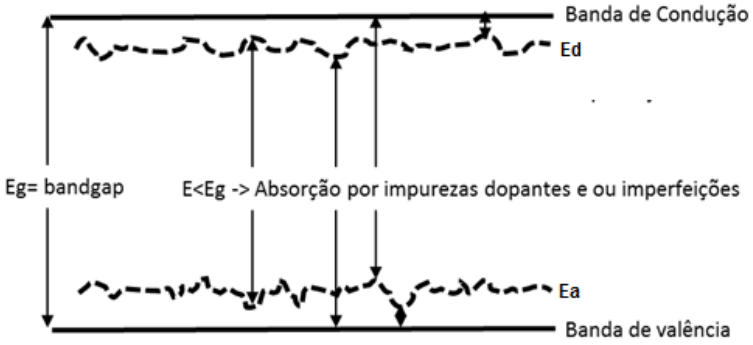
Figura 11 - Representação do nível de energia de absorção por Éxciton.



Fonte : Autor

A absorção também pode ocorrer devido às imperfeições na rede cristalina, defeitos de superfície, interfaces indesejadas formadas entre as junções PN e os contatos, por desorientação da estrutura cristalina. Essas condições introduzem níveis de energias intermediárias dentro da faixa proibida do semicondutor, que resulta em transições como mostrado na Figura 12. Elas ocorrem entre a faixa de impurezas doadoras e a banda de valência, entre a faixa de impurezas aceitadoras e a banda de condução, bem como, transições entre a banda de nível de doador para a banda de condução e entre a banda de nível aceitador para a banda de valência(YACOBI, 2004, p. 86).

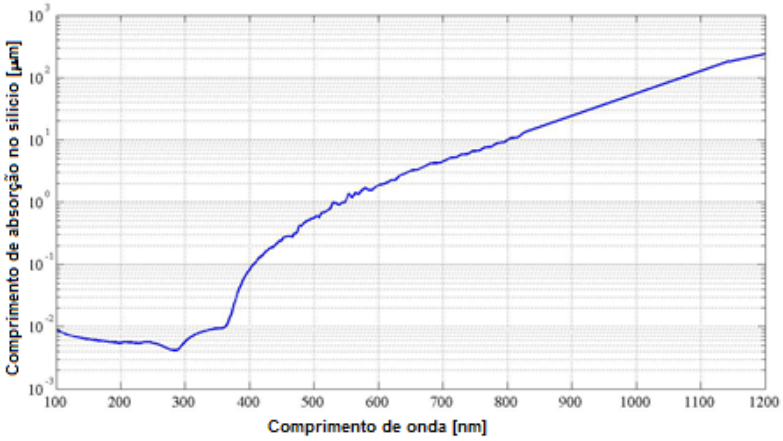
Figura 12 - Representação do nível de energia de absorção por impurezas dopantes e imperfeições.



Fonte : Autor

O silício é o semicondutor economicamente mais importante e, desta forma, vale a pena investigar dispositivos optoeletrônicos de silício e circuitos integrados, apesar da absorção óptica do silício não ser ótima. A Figura 13 mostra que os fótons de alta energia em comprimentos de onda abaixo de 360 nm têm pequeno comprimento de absorção e, portanto, são diretamente absorvidos pelo silício enquanto a influência da partícula de fônon pode ser vista a partir de 400 nm, onde o comprimento de absorção aumenta, bem como a absorção do fóton com menos energia diminui. A maioria dos baixos comprimentos de onda são rapidamente absorvidos nas primeiras centenas de nanômetros a partir da superfície do silício, e são influenciados pela recombinação de superfície, onde o tempo de recombinação é muito curto e os fotoportadores se recombinam antes de serem coletados (BULTEEL, 2011, p. 10).

Figura 13 - Profundidade de penetração no silício em função do comprimento de onda.



Fonte: Autor "adaptado de" (BULTEEL; AFZALIAN; FLANDRE, 2010)

3.3 TEORIA DE SEMICONDUTORES

Nesta seção são apresentados, de forma resumida, os fundamentos da física de dispositivos semicondutores, modelagem de dispositivos eletrônicos de estado sólido através da apresentação das equações implementadas. Os modelos de mobilidade de portadores usados nos simuladores de dispositivos também serão listados. São, ainda, apresentados conceitos de deriva, difusão e processo de recombinação de portadores, bem como suas conseqüências para a velocidade e a eficiência quântica de fotodetectores(ZIMMERMANN, 2010, p. 10).

O cristal de semicondutor contém defeitos intersticiais e espaços vazios devido ao deslocamento de átomos ou átomos ausentes. Além disso, os átomos vibram em torno da sua própria posição de equilíbrio. A amplitude destas vibrações depende da temperatura. Desta forma, surge o conceito de fônon, a qual é uma quase partícula que representa a propagação da

vibração ou calor, através do cristal. Tanto as imperfeições do cristal quanto os fônons podem interagir com os elétrons através das distorções que induzem no potencial periódico da rede cristalina (COLINGE, 2002, p. 51).

A interação entre um elétron livre e fônons ou defeitos do cristal pode ser vista como uma série de colisões que obedecem aos princípios de conservação de energia e momento. Como consequência, os elétrons nunca estão em repouso e são submetidos a um movimento aleatório perpétuo, esses processos afetarão a facilidade com que elétrons e lacunas podem fluir através do cristal, ou seja, sua mobilidade dentro do sólido. Esses processos de colisão e espalhamento dependem da temperatura, o que afeta o movimento térmico dos átomos da rede e a velocidade dos portadores (STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015, p. 120) .

3.3.1 Equações Básicas dos Semicondutores

As equações básicas dos semicondutores descrevem o comportamento de dispositivos como diodos, MOSFETs, transistores bipolares e fotodetectores. Essas equações já têm sido implementadas em muitos programas de simulação de dispositivos(ZIMMERMANN, 2010, p. 11). Modelos físicos que descrevem os comportamento elétrico de semicondutores são implementados em programas de simulação de dispositivos e constituem ferramentas valiosas para o desenvolvimento de dispositivos semicondutores há muitos anos. Muito tempo e dinheiro podem ser economizados com a ajuda deles nesse processo. Simuladores numéricos de dispositivos também são valiosos para o desenvolvimento de fotodetectores. Neste trabalho, será utilizado o simulador de dispositivo bidimensional Atlas (SOFTWARE, 2017, p. 101). O modelo de deriva-difusão implementado neste simulador resolve a equação de Poisson (14), as equações de transporte e as equações de continuidade para elétrons e lacunas (COLINGE, 2002, p. 62):

$$\Delta\Psi = \frac{-\varepsilon}{\rho} \tag{14}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \tag{15}$$

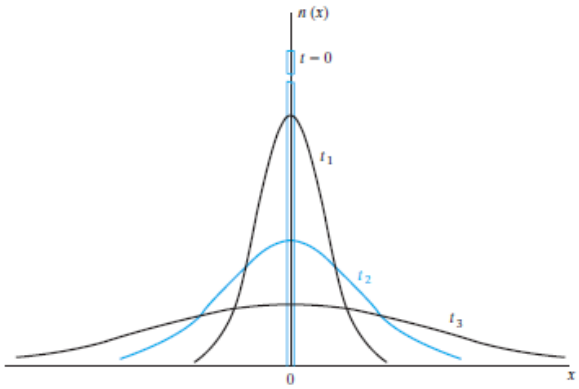
A grandeza ε é o produto das constantes dielétricas relativa ε_r e absoluta ε_0. O símbolo ρ representa a densidade de cargas, que é dado pelo produto da carga elementar q com a soma das concentrações de lacunas p (carga positiva), de elétrons n (carga negativa), de cargas doadoras N_D (carga positiva), e de cargas aceitadoras N_A (carga negativa), dada na equação (16) (COLINGE, 2002, p. 62):

$$\rho = q\ (p - n + N_D - N_A) \tag{16}$$

3.3.2 Difusão

O mecanismo de difusão consiste da movimentação térmica natural, que ocorre entre as partículas de um meio de maior concentração para um de menor concentração até que se atinja o equilíbrio. Em outras palavras, portadores em um semicondutor se difundem em um gradiente dn/dx de portador por movimento térmico aleatório com o espalhamento da rede e impurezas. Por exemplo, um pulso de excesso de elétrons injetado em x = 0 no tempo t = 0 se espalhará no tempo (STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015, p. 158), como mostrado na Figura 14. Inicialmente, o excesso de elétrons é concentrado em x=0; com o passar do tempo, no entanto, os elétrons se difundem para regiões de baixa concentração de elétrons até que finalmente n (x) seja constante (STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015, p. 159). Podemos calcular a taxa na qual os elétrons se difundem considerando uma distribuição arbitrária n (x). Esta taxa de difusão é chamada de coeficiente de difusão de elétrons (D_N) .

Figura 14 - Difusão de elétrons a um impulso no tempo t=0.



Fonte : (STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015, p. 158)

Essa mesma analogia ocorre com as lacunas, definindo o coeficiente de difusão das lacunas (D_P). Assim, pode-se definir a densidade de corrente por unidade de área de elétrons e lacunas como (COLINGE, 2002, p. 60):

$$J_n = +q\ D_N \frac{dn\ (x)}{dx} \tag{17}$$

$$J_p = -q\ D_P \frac{dp\ (x)}{dx} \tag{18}$$

Essa importante definição leva a outro conceito importante sobre a relação da mobilidade de elétrons (μ_N) ou lacunas (μ_P) e o coeficiente de difusão no equilíbrio térmico, chamada relação de Einstein (COLINGE, 2002, p. 60):

$$D_N = \frac{kT}{q}\,\mu_N \tag{19}$$

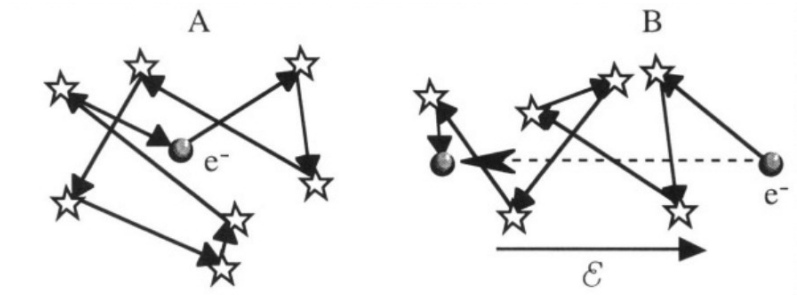
$$D_P = \frac{kT}{q}\,\mu_P \tag{20}$$

O fator multiplicador, *kT/q*, é chamado de termo de geração/recombinação térmica ou potencial térmico (V_T) e vale 25,9 mV em temperatura ambiente.

3.3.3 Deriva

Com a ausência de uma força externa, todos estes movimentos são em média neutros e o deslocamento da carga é nulo como mostrado em Figura 15-A. Porém, ao se aplicar um campo elétrico, surge uma corrente de deriva na direção oposta, como mostra a Figura 15-B (COLINGE, 2002, p. 52).

Figura 15 - Movimento de elétrons: A) Na ausência de campo elétrico. B) Na presença de campo elétrico. As estrelas representam as colisões.



Fonte:(COLINGE, 2002, p. 52)

A média de tempo entre duas colisões de elétrons é chamada de tempo de relaxação (τ_n e τ_p), para elétrons e lacunas, respectivamente. Este tempo é da ordem de dezenas de pico segundos em temperatura ambiente, durante o qual um elétron pode se movimentar na ordem de dez nanômetros. Adicionalmente, as velocidades de deriva dos elétrons (v_{dn}) e das lacunas (v_{dp}), resultantes da aplicação de um campo elétrico são dadas pelas equações (SZE; NG, 2007, p. 54).

$$v_{dn} = -\frac{q\,\tau_n}{m_e^*}E \equiv -\mu_N\,E \tag{21}$$

$$v_{dp} = \frac{q\,\tau_p}{m_h^*}E \equiv \mu_P\,E \tag{22}$$

Onde m_e^* representa a massa efetiva do elétron, m_h^* representa a massa efetiva da lacuna, q é a carga elementar e E é o campo elétrico. Assim, podemos definir como a densidade de corrente por unidade de área de elétrons e lacunas como (23) e (24) :

$$j_n = -q\, n\, v_{dn} = q\, n\, \mu_N\, E \tag{23}$$

$$j_p = -q\, n\, v_{dp} = q\, p\, \mu_P\, E \tag{24}$$

As densidades de correntes dos elétrons e lacunas são a somatória das densidades de correntes de difusão e de deriva (COLINGE, 2002, p. 62):

$$j_n = q\, n\, \mu_N\, E + D_N \frac{dn}{dx} \tag{25}$$

$$j_p = q\, p\, \mu_P\, E - D_P \frac{dp}{dx} \tag{26}$$

A densidade de corrente total resultante das densidades de correntes dos elétrons e lacunas (COLINGE, 2002, p. 60) é dada por:

$$j = j_n + j_p \tag{27}$$

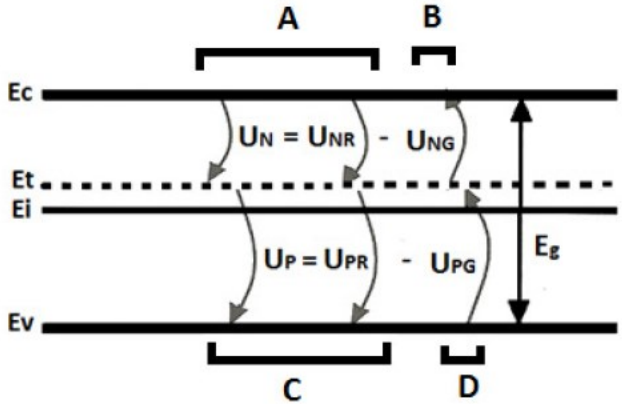
3.3.4 Processos de Geração e Recombinação

Em semicondutores, várias excitações (por exemplo, irradiação de fótons ou elétrons) podem levar à geração de portadores de carga, acima das densidades do equilibrio térmico. Assim, pares elétron-lacuna são gerados causando desequilíbrio. Um processo de recombinação para esses pares elétron-lacuna gerados (em excesso) deve restaurar o equilíbrio. Os centros de recombinação com níveis de energia dentro do *bandgap* em um semicondutor definem se são transições radiativas ou não-radiativas, dependendo se a recombinação resulta na emissão de um fóton ou não(YACOBI, 2004, p. 87).

A Figura 16 representa os eventos de geração/recombinação de pares elétron-lacuna que envolvem a transição de um elétron dentro da faixa proibida através dos centros de recombinação (Shockley-Read-Hall). As transições A e C correspondem a eventos de recombinação e as transições B e D correspondem a eventos de geração. Os índices $_{NG}$ e $_{PG}$ 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. A taxa de geração-

recombinação intrínseca total (U) pode ser escrita como sendo $U=U_{NR}-U_{NG}$ que será igual a zero em equilíbrio termodinâmico(COLINGE, 2002, p. 78).

Figura 16 - Processos de Recombinação através de Centros de Recombinação.



Fonte : Autor "adaptado de" (COLINGE, 2002, p. 82)

Em equilíbrio termodinâmico, a taxa de geração-recombinação intrínseca pode ser descrita pelas estatísticas de Shockley-Read-Hall, conforme a equação (28) :

$$U = \frac{pn - n_i^2}{\tau_N\left[n + n_i e^{\frac{E_t - E_i}{kT}}\right] + \tau_P\left[p + n_i e^{\frac{E_i - E_t}{kT}}\right]} \tag{28}$$

onde *n* e o *p* são as seções transversais de captura de elétrons e lacunas, τ_P e τ_N são os tempos de vida das lacunas e dos elétrons em estado estacionários, respectivamente, E_t é o nível intermediário de estados estacionários onde ocorre a recombinação (ou centros de recombinação) dentro da faixa proibida(COLINGE, 2002, p. 85).

Pode-se observar que a taxa de geração-recombinação é proporcional a $pn - n_i^2$ e o sinal de U determina se há geração ou recombinação, sendo que U pode ser maximizado se $E_i=E_t$, indicando que a recombinação ocorre dentro do nível do intrínseco, assim pode-se definir se:

$$\begin{aligned} &U=0 \text{ se } pn=ni^2 \text{ (equilíbrio)} \\ &U>0 \text{ se } pn>ni^2 \text{ (recombinação)} \\ &U<0 \text{ se } pn<ni^2 \text{ (geração)} \end{aligned} \tag{29}$$

A taxa de geração-recombinação *U* é uma função da temperatura e também depende da estrutura da banda do semicondutor. Um semicondutor de *bandgap* direto, sendo mais eficiente

nas transições, tem um *U* muito maior do que um semicondutor de banda indireta(COLINGE, 2002, p. 85).

Em fotodiodos PIN, que operam em regime de injeção de portadores minoritários (representam os elétrons em um material P e as lacunas em um material N), o tempo de vida destes é muito importante para a eficiência dos dispositivos. Na maioria dos casos a ordem de magnitude de injeção que contribui para o aumento da concentração dos portadores minoritários é muito menor que a dos portadores majoritários. A taxa de geração-recombinação intrinseca é definida pelo tempo de vida dos portadores minoritários dada pelas equações (30) (31)(COLINGE, 2002, p. 86):

Em um material do tipo P:

$$U = \frac{n - n_0}{\tau_N} \tag{30}$$

Em um material tipo N será:

$$U = \frac{p - p_0}{\tau_P} \tag{31}$$

3.4 EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM SEMICONDUTORES

O estudo dos efeitos da variação da temperatura em fotodiodos se faz necessário visto que as características elétricas como mobilidade, concentração intrínseca e ionização incompleta de portadores, afetam a corrente total no fotodiodo. Uma breve descrição destes efeitos é apresentada nesta seção.

3.4.1 Concentração intrínseca de portadores

A concentração intrínseca de portadores (n_i) no semicondutor indica a quantidade de portadores livres gerados por excitação térmica e depende apenas do tipo do material e da temperatura. Na temperatura de 0 K não há portadores livres. Com o aumento da temperatura, os elétrons ganham energia suficiente para se tornarem livres, gerando pares elétron-lacuna. A concentração intrínseca é dada pela equação (32) (SZE, 1981, p. 19):

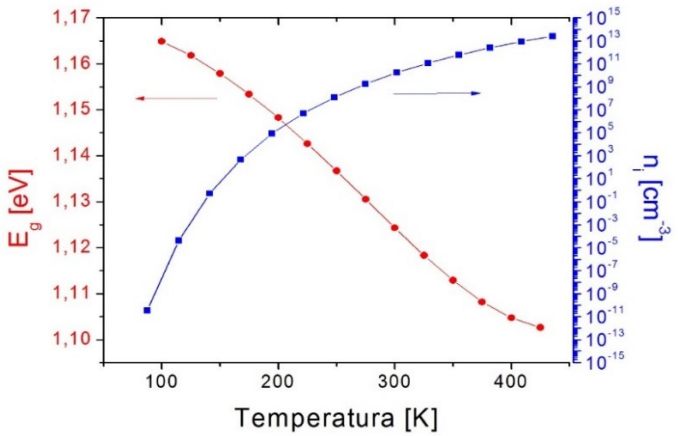
$$n_i = \sqrt{N_c N_V}\, exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \tag{32}$$

Onde N_c e N_v são, respectivamente, as densidades de estados das bandas da condução e valência. A largura da faixa proibida (*bandgap*) do silício (E_g) também depende da temperatura e é dada pela equação (33), segundo(GUTIERREZ; DEEN; CLAEYS, 2001, p. 11):

$$E_g = 1{,}1702 - 3{,}6277 \cdot 10^{-6} \cdot T - 3{,}9703 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 1{,}3207 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 3{,}2798 \cdot 10^{-12} \cdot T^2 \quad (33)$$

A Figura 17 apresenta a variação da concentração intrínseca de portadores (n_i) e da largura de faixa proibida do silício (E_g) com a temperatura entre 100 K e 400 K. No cálculo de n_i, as densidades de estados N_c e N_v foram calculadas considerando a massas efetivas dos elétrons conforme(SZE, 1981, p. 18). Pode-se notar que há apenas uma pequena redução de E_g com o aumento da temperatura, enquanto n_i aumenta muitas ordens de grandeza na mesma faixa.

Figura 17 - Variação da concentração intrínseca de portadores e da largura da faixa proibida do silício para faixa de temperatura de 100 a 400 K.



Fonte: Autor

3.4.2 Mobilidade

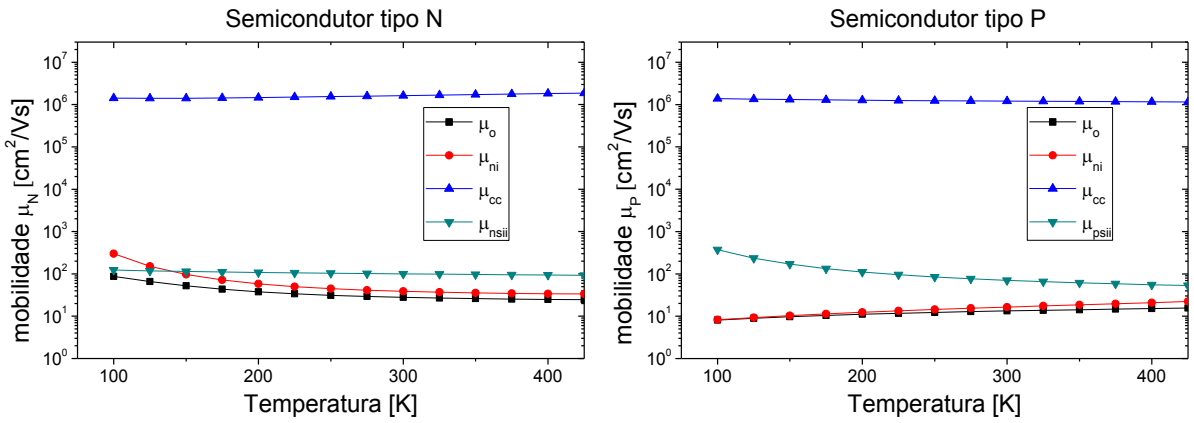
A facilidade com que os elétrons e lacunas podem fluir através do cristal é chamada de mobilidade. É necessário conhecer as concentrações de portadores em um sólido afim de se calcular o fluxo de corrente na presença de campos elétricos ou magnéticos.

Além dos valores de n e p, é preciso levar em consideração as colisões dos portadores de carga com a rede e com as impurezas. Esses processos afetarão a facilidade com que elétrons e lacunas podem fluir através do cristal dependem da temperatura, o que afeta o movimento térmico dos átomos da rede e a velocidade dos portadores(STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015, p. 120).

A Figura 18 apresenta o comportamento da mobilidade em semicondutores do tipo P e tipos N com a variação da temperaturas e os diversos efeitos influenciam a mobilidade dos elétrons e lacunas no cristal (μ_o) (SZE; NG, 2007, p. 28). Naturalmente, há uma movimentação por agitação térmica dos elétrons e lacunas na rede cristalina e, portanto, ocorrem colisões devido aos mecanismos de espalhamento que influenciam a movimentação de elétrons e lacunas como(GUTIERREZ; DEEN; CLAEYS, 2001, p. 3): espalhamento de rede, por impurezas ionizadas (μ_{sii}) e portador-portador (μ_{cc}) e por impurezas neutras (μ_{ni}).

No espalhamento da rede, um portador que se move através do cristal é espalhado por uma vibração da rede (fônons), resultante da temperatura. A frequência desses eventos de espalhamento aumenta à medida que a temperatura aumenta, uma vez que a agitação térmica da rede se torna maior(SZE; NG, 2007, p. 29). Portanto, devemos esperar que a mobilidade diminua à medida que a amostra é aquecida.

Figura 18 - Comportamento da mobilidade em semicondutores do tipo P e tipo N com a variação de temperatura.



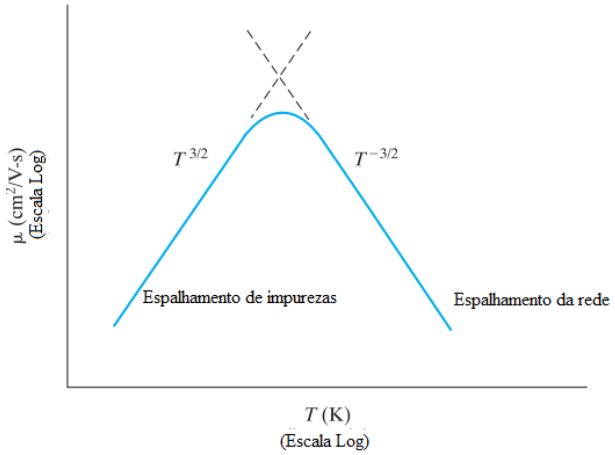
Fonte: Autor

Por outro lado, o espalhamento por defeitos críticos como impurezas ionizadas se torna o mecanismo dominante em baixas temperaturas. Como os átomos da rede em temperaturas baixas são menos agitados, o espalhamento da rede é menos importante. Entretanto, o movimento térmico das portadores também é mais lento. Como um portador que se move lentamente é provável que seja espalhado mais fortemente por uma interação com um íon carregado do que um portador com maior momento, os eventos de espalhamento por impureza causam uma diminuição da mobilidade com o aumento da temperatura(GUTIERREZ; DEEN; CLAEYS, 2001, p. 3).

Portanto, os efeitos combinados dos diversos efeitos da mobilidade causam a redução da mobilidade de elétrons e lacunas no cristal (μ_o), conforme mostrado. A Figura 19 mostra as

dependências aproximadas do espalhamento de rede e do espalhamento de impurezas com relação à variação de temperatura(STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015, p. 126).

Figura 19 - Dependência aproximada da mobilidade com a temperatura devido ao espalhamento da rede e de impurezas.

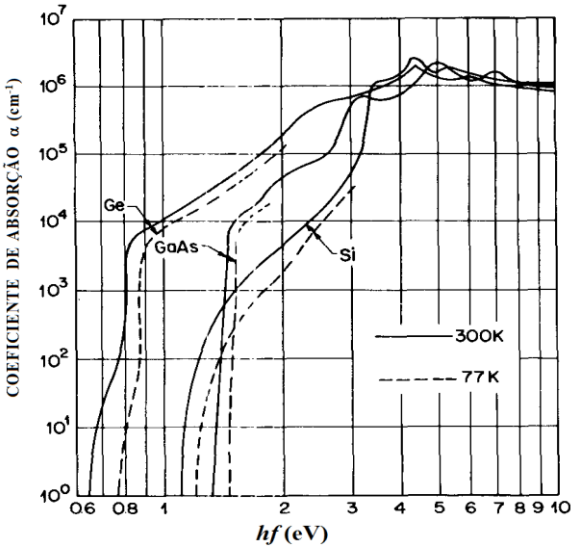


Fonte : Autor "adaptado de"(STREETMAN; SANJAY; BANERJEE, 2015)

3.4.3 Coeficiente de absorção

A Figura 20 mostra dados experimentais dos coeficientes de absorção próximos e acima da absorção fundamental (transição entre bandas) para Si e GaAs. O deslocamento das curvas em direção a energias mais altas de fótons em temperatura mais baixa está associado à dependência de temperatura da faixa proibida (33) (SZE, 1981, p. 42) .

Figura 20 - Coeficientes de absorção do Ge, Si e GaAs intrísencos, a temperaturas de 77 K e 300 K.



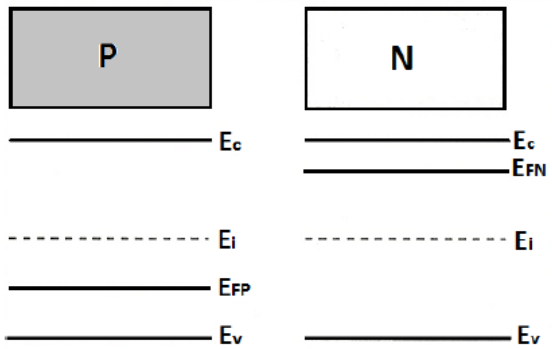
Fonte: Autor "adaptado de" (SZE, 1981, p. 42)

3.5 JUNÇÃO PN

O estudo de junções PN oferece conceitos básicos do comportamento da teoria dos semicondutores. Características como geração e recombinação na região de depleção, injeção de portadores e efeitos da resistência série facilitam a compreensão e serão a base para o estudo dos fotodiodos.

Uma junção PN é formada pelo contato de um material N com um material P. O material P é composto por concentração de dopantes aceitadores, N_A (cm^{-3}) e o material N é composto por concentração de dopantes doadores, N_D (cm^{-3}). A Figura 21 ilustra o diagrama de bandas de energia das regiões P e N (COLINGE, 2002, p. 97).

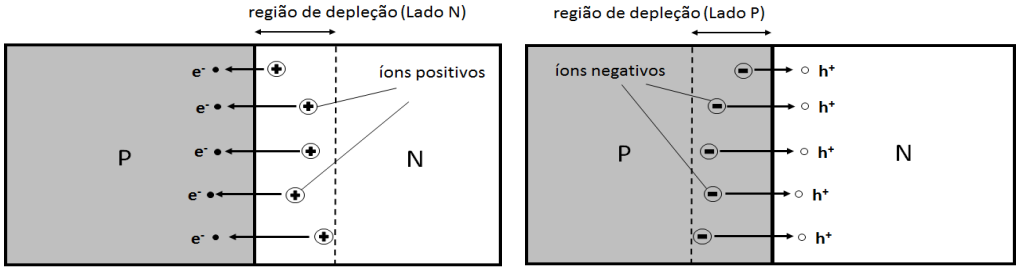
Figura 21 - Diagrama de bandas de Energia em regiões tipo P e tipo N separadas.



Fonte: Autor "adaptado de"(COLINGE, 2002, p. 97)

Durante a formação da junção PN, uma junção metalúrgica se formará e ocorrerá o processo de difusão. Os elétrons saem do lado N para o lado P deixando íons positivos do lado N. As lacunas saem do lado P para o lado N deixando íons negativos no lado P. Esses íons (positivos do lado N e negativos do lado P) não podem se mover pelo cristal. A essa região de carga espacial formada por esses íons do lado N (íons positivos) e do lado P (íons negativos) é chamada de região de Depleção (RDD) ilustrado na Figura 22 . Esses íons dão origem a um campo elétrico ζ nessa região (com sentido de N para P) (COLINGE, 2002, p. 99).

Figura 22 - Região de Depleção criada pelo processo de difusão de elétrons e lacunas



Fonte: Autor " adaptado de " (COLINGE, 2002, p. 99)

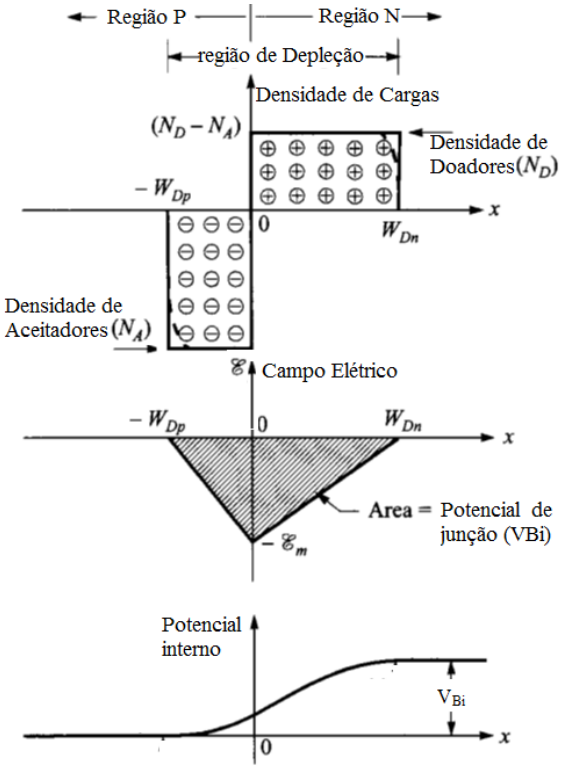
A Figura 23 ilustra uma junção abrupta em equilíbrio térmico, no processo de formação, uma junção metalúrgica se formará. Um processo de difusão de portadores da região N para região P e da região P para a região N ocorrerá, e após o equilíbrio termodinâmico, um potencial de junção (V_{Bi}) se formará (SZE, 1981, p. 75), o qual é descrito pela equação (34).

$$V_{Bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right) \tag{34}$$

A partir desse campo elétrico e da diferença de potencial criada entre os dois lados da RDD surgirá uma corrente de deriva, de forma que os portadores minoritários (lacunas) do lado N se movimentem para o lado P e portadores minoritários (elétrons) no lado P se desloquem para a região N.

Com isso, um novo processo de difusão se reinicia, aumentando a diferença de potencial entre os lados P e N e, consequentemente, uma elevação do campo elétrico, aumentando assim a corrente de deriva reduzindo a corrente de difusão até que se atinja um equilíbrio e a diferença de potencial seja suficiente para que as correntes se igualem (Ideriva=Idifusão) em valor absoluto mas em sentidos opostos (COLINGE, 2002, p. 106).

Figura 23 - Junção abrupta em equilíbrio térmico, distribuição da carga espacial, campo elétrico e potencial de junção (V_{Bi}).



Fonte: Autor "adaptado de" (SZE, 1981, p. 74)

3.5.1 Junção PN polarizada

Ao se aplicar uma tensão externa numa junção PN (V_D) a largura da RDD será alterada e pode-se verificar duas condições(COLINGE, 2002, p. 104).

Na Polarização direta, ou seja, com V_D positivo (potencial do lado P maior que o potencial do lado N) a RDD diminuirá, devido ao campo elétrico externo se contrapor ao campo elétrico interno, isso fará com que a corrente de difusão (portadores majoritários) seja maior que a corrente de deriva (portadores minoritários).

Na polarização reversa, ou seja, V_D negativo (potencial do lado N maior que o potencial do lado P) a RDD aumentará, a corrente de difusão diminuirá, a corrente de deriva será muito pequena pois envolverá apenas portadores minoritários nas interfaces das regiões de transição (COLINGE, 2002, p. 102).

As larguras das regiões RDD do lado P (*dp*) e lado N (*dn*) podem ser escritas por:

$$dp = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}\,(V_{Bi}-V_D)\,N_D}{qN_A\,(N_A+N_D)}} \tag{35}$$

$$dn = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}\,(V_{Bi}-V_D)\,N_A}{qN_D\,(N_A+N_D)}} \tag{36}$$

A densidade de corrente numa junção PN ideal é dada por (COLINGE, 2002, p. 113):

$$J = Js\left[\exp\left(\frac{q\,V_D}{kT}\right) - 1\right] \tag{37}$$

Onde Js é a densidade de corrente de saturação ou densidade de corrente reversa máxima numa junção PN reversamente polarizada. Essa densidade independe da tensão reversa aplicada e do campo elétrico. No entanto, depende das concentrações de dopantes, do coeficiente de difusão e do tempo de vida das cargas minoritárias, conforme a equação (COLINGE, 2002, p. 114):

$$Js = \frac{q\,D_N n_{PO}}{L_N} + \frac{qD_P p_{NO}}{L_p} = qn_i^2\left(\frac{1}{N_A}\sqrt{\frac{D_N}{\tau_N}} + \frac{1}{N_D}\sqrt{\frac{D_P}{\tau_P}}\right) \tag{38}$$

Onde n_{PO} é definido como a concentração de elétrons no equilíbrio dentro da região P e p_{NO} é definido como a concentração de lacunas no equilíbrio dentro da região N.

D_N, D_P são os coeficientes de difusão de elétrons e lacunas, respectivamente, L_N e L_P são os comprimentos de difusão dos portadores minoritários (elétrons e lacunas), antes de se recombinarem nas regiões P e N. São definidos pelo tempo de vida (τ_N e τ_P) e pelos coeficientes de difusão D_N e D_P, de acordo com (COLINGE, 2002, p. 110):

$$L_P = \sqrt{D_P\tau_P} \quad \text{e} \quad L_N = \sqrt{D_N\tau_N} \tag{39}$$

3.6 FOTODIODOS

Embora existam fotocondutores e fototransistores, o fotodiodo é o sensor óptico típico em silicio (CRISTOLOVEANU; LI, 1995, p. 72). Pares elétron-lacuna fotogerados são separados pelo campo elétrico gerado a partir da aplicação de uma tensão externa, dando origem a uma fotocorrente. A intensidade da luz é determinada a partir da amplitude da fotocorrente na polarização reversa, ou a partir da mudança na tensão medida no diodo em condições de circuito aberto ou para uma corrente direta fixa. Fotodiodos de silício podem ser do tipo PN ou PIN e podem ter configurações verticais ou laterais (CRISTOLOVEANU; LI, 1995, p. 72) .

3.6.1 Fotodiodo PIN SOI

O fotodiodo PIN é um caso especial dos fotodiodos de junção PN e é um dos os fotodetectores mais comuns, porque a espessura da região de depleção (a camada intrínseca) pode ser adaptada para otimizar a eficiência quântica e a freqüência de resposta (SZE; NG, 2007, p. 674).

Fotodiodos PIN implementados em diversas tecnologias tem sido estudados e testados em diferentes processos de fabricação, comprimentos intrínsecos, espessuras de silicio e de óxido enterrado, em diversas tecnologias (ZIMMERMANN, 2010, p. 156). A fim de evitar a difusão lenta de portadores fotogerados com o substrato, a tecnologia de camada SOI foi aplicada (ZIMMERMANN, 2010, p. 75).

Diodos PIN SOI laterais fabricados em tecnologia com camada fina de silício com polarização reversa também podem ser usados como fotossensores (COLINGE, 2004, p. 287). A maioria dos dispositivos optoeletrônicos de filme fino SOI são coletores de portadores laterais: o dispositivo eletrônico é fabricado lateralmente e a luz é coletada perpendicularmente ao fluxo elétrico dos portadores (BULTEEL, 2011, p. 18).

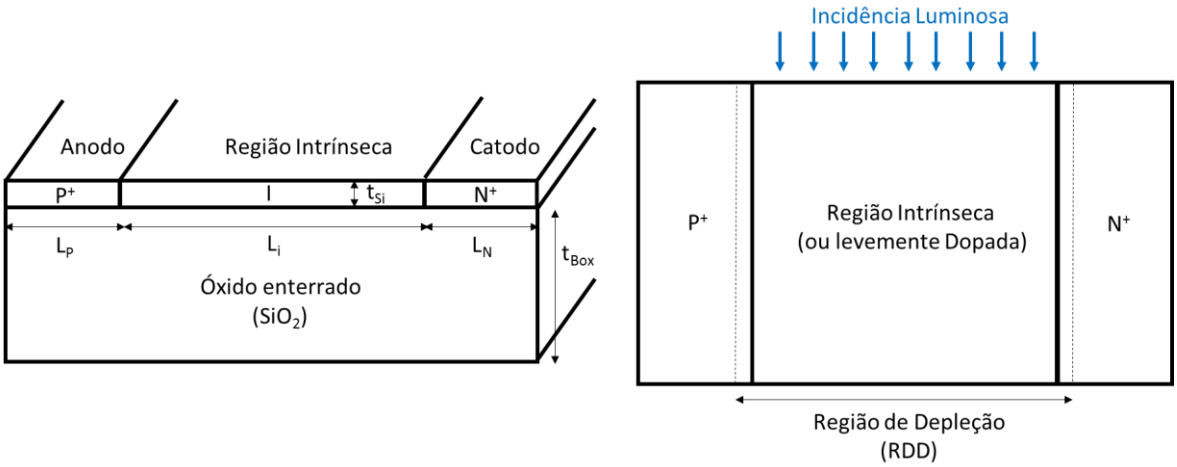
Estudos recentes têm avaliado a influência da região de comprimento intrinseco no comportamento de fotodiodos PIN operando como célula solar (SILVA; DORIA; DE SOUZA, 2018), como detector de radiação espacial (ZAINUDIN et al., 2015).

Para luz azul ou UV, um fotodiodo SOI, seria uma boa escolha (COLINGE, 1986). No entanto, possui uma baixa responsividade à luz vermelha devido à pequena espessura da camada de Silicio . Portanto, o fotodiodo foi otimizado com multidedos para as faixas espectrais UV / azul e vermelho ao mesmo tempo, variando a concentração de dopagem da camada epitaxial (ZIMMERMANN, 2010, p. 78).

A Figura 24 mostra a representação esquemática da estrutura do fotodiodo PIN SOI, formado por uma junção PN separada por uma região intrínseca de comprimento (L_i), onde ocorrem interferências de luz. Feitos com espessura de silício (t_{Si}) fina na região intrínseca, a estrutura absorve mais de alguns comprimentos de onda do que outros(COLINGE, 2004, p. 287).

Na prática, esta região intrínseca L_i pode ser tanto N quanto P com baixa concentração de portadores, que pode estar totalmente depletada ou não. Ela simula a região de depleção de uma junção PN com um comprimento definido que pouco varia com a tensão de polarização reversa.

Figura 24 - Representação esquemática de um fotodiodo PIN SOI.



Fonte: Autor

Sob iluminação na área fotossensível, pares elétron-lacuna são formados dentro da região intrínseca totalmente depletada, se estendendo nas regiões de difusão dos lados P e N em uma região chamada de região de depleção (RDD). Com polarização reversa, os portadores são separados pelo campo elétrico criado nesta região e coletados pelas difusões N+ e P+ antes de se recombinarem, fazendo com que uma corrente flua pelo dispositivo (COLINGE, 2004, p. 287).

Conforme visto em (12) e (13), a profundidade de penetração da onda eletromagnética varia de acordo com o seu comprimento de onda, ou seja, quanto menor o comprimento de onda, menor será sua profundidade de penetração (HAGIWARA, 2020).

Os dispositivos feitos em uma camada de silício de espessura fina (t_{Si}), são capazes de absorver bem, comprimentos de ondas curtos. O silício é o semicondutor mais comum, mas outros materiais podem ser usados para implementar um fotossensor como (SiGe) (ZIMMERMANN et al., 2009) que absorvem o UV e o azul, dentre outros materiais baseados

em nitreto de gálio (GaN), podem absorver mais facilmente os fótons associados a comprimentos de onda baixos, independentemente da sua espessura. Outra tecnologia usada com freqüência é o carboneto de silício (SiC) (BULTEEL, 2011, p. 20) e (BENEDETTO; LICCIARDO; RUBINO, [s.d.]).

Assim, os portadores gerados na superfície da região intrínseca se movem rapidamente para as regiões P e N, devido à menor profundidade de absorção, além de reduzir as reflexões e contribuir de forma eficiente para a geração de fotocorrente.

Em geral, a luz vermelha não é absorvida em camadas finas de silício, mas os picos de absorção podem ser obtidos para luz entre azul e ultravioleta do espectro visível.

O comportamento do fotodiodo, no escuro, é descrito pela equação I_D=f (V_D) (40):

$$I_{D,Dark}(V_D) = I_S.\left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1\right) + I_{RG} \tag{40}$$

Onde I_{RG} é a corrente de recombinação/geração e V_T é o potencial térmico:

$$I_{RG}(V_D) = I_{Srg}.\left(e^{\frac{V_D}{2\,V_T}} - 1\right) \tag{41}$$

No silício, o I_{Srg} é geralmente maior que o I_S, por isso, a corrente de recombinação/geração predomina quando V_D está bem acima de V_T em polarização reversa (BULTEEL, 2011, p. 12), ou quando a tensão positiva no diodo é pequena (isto é, de 0 a 300 mV, normalmente). Essa corrente específica será discutida em mais detalhes neste trabalho devido à sua importância para os dispositivos estudados. No entanto, quando o diodo é iluminado, devido ao processo de geração de portadores, a corrente reversa aumenta, assumindo um valor constante de corrente gerada, I_{FG}, chamado fotocorrente.

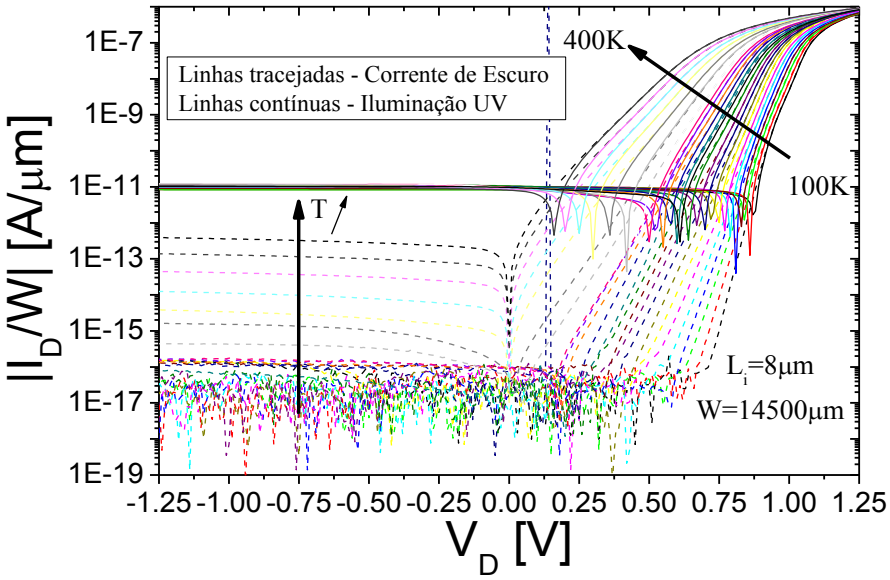
Dessa forma, podemos descrever o comportamento da corrente total I_D no diodo conforme abaixo:

$$I_{D,tot}\,(V_D) = I_{D,DARK} - I_{FG} \tag{42}$$

A corrente fotogerada (I_{FG}) é diretamente proporcional à largura de depleção e aos comprimentos de difusão dos elétrons e lacunas. Por esse motivo que os diodos PIN foram otimizados com uma região intermediária quase intrínseca (L_i), com intuito de aumentar a região de depleção e contribuir para o aumento da corrente fotogerada (BULTEEL, 2011, p. 13).

Com base na literatura (DE SOUZA et al., 2011), a Figura 25 apresenta a curva do módulo da corrente total (I_D), normalizada em função da tensão aplicada ao fotodiodo (V_D) entre 1,25 V e -1,25 V para fotodiodos PIN SOI laterais com comprimentos de região intrínseca (L_i) de 8 μm e espessura de camada de silício com 80 nm. É possível notar que para valores de temperatura mais baixas, em torno de 250 K os resultados ficam muito próximos à precisão numérica do simulador 10^{-16} A, que tornam os resultados sujeitos inconsistências e ruídos, o que dificulta a obtenção de resultados estáveis. A baixa corrente de escuro (I_{DARK}) é favorecida pela implementação da tecnologia SOI que reduz a corrente através do substrato.

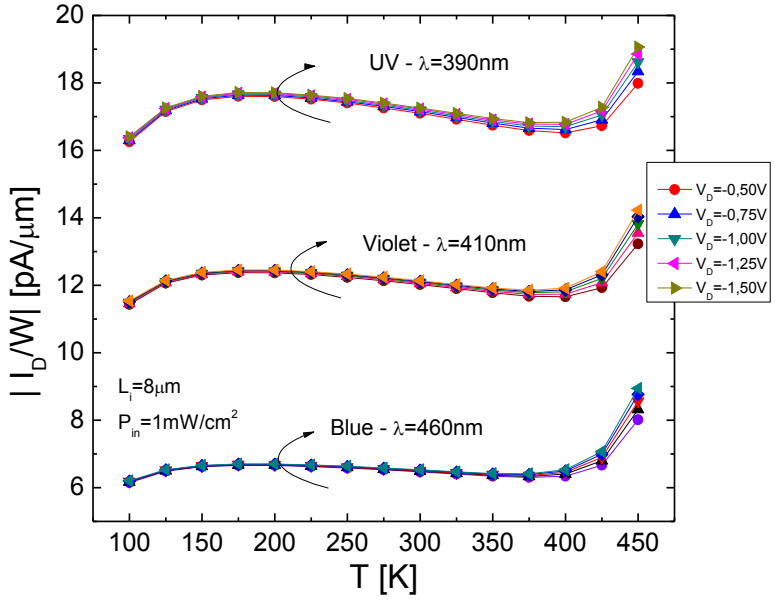
Figura 25 - Módulo da corrente de escuro e com iluminação UV em função da tensão no fotodiodo para temperaturas entre 100 e 400 K.



Fonte : (DE SOUZA et al., 2011)

A Figura 26 apresenta o módulo da corrente total (I_D) simulado em três comprimentos de onda (UV, violeta e azul) e tensões reversas (V_D) entre -0,5 V é -1,5V(DE SOUZA et al., 2011), é possível notar o quanto as variações de comprimento de ondas e de temperatura afetam na corrente fotogerada e consequentemente na corrente total do dispositivo. Adaptações e mudanças nestes processos buscam otimizar as suas características elétricas como eficiência quântica, responsividade, detectividade e relação sinal ruído, que também têm sido extensivamente estudados (AFZALIAN, 2006; AFZALIAN; FLANDRE, 2003; BULTEEL; AFZALIAN; FLANDRE, 2010; DE SOUZA et al., 2010, 2011; LI et al., 2017; NOVO et al., 2014; ZIMMERMANN et al., 2002).

Figura 26 - Módulo da Corrente total (I_D) simulado em três comprimentos de onda (UV, violeta e azul) e tensões reversas (V_D) entre -0,5 V é -1,5 V.



Fonte:(DE SOUZA et al., 2011)

3.6.2 Desempenho em fotossensores

Os fotossensores tem a função de converter um sinal óptico em um sinal elétrico. Um fotosensor ideal deveria detectar todos os fótons incidentes independente da frequência, sem que nenhum ruído fosse introduzido. Isso não é possível em fotossensores reais, tais como os fotodiodos PIN. Os principais parâmentros de medida de desempenho dos fotodiodos PIN que serão abordados neste trabalho são: a eficiência quântica e a responsividade. Outras medidas de desempenho importantes como: a sensibilidade, relação sinal ruído e velocidade de resposta que não serão tratados aqui (AFZALIAN, 2006, p. 11).

3.6.3 Eficiência Quântica

Para simular e medir a eficiência espectral de um dispositivo óptico, a literatura menciona duas medidas de eficiências :

A eficiência quântica total QE_t é definida como a relação entre a corrente fotogerada no anodo, I_{FG}, e a máxima corrente fotogerada que pode ser atingida se todos os fotons aplicados fossem convertidos I_{FGMAX}:

$$QE_t = \frac{I_{FG}}{I_{FGMAX}} \tag{43}$$

Idealmente, a eficiência quântica total seria 100% se fossem considerados que todos os pares elétron-lacuna gerados na região fotossensível, fossem coletados nos eletrodos (anodo e

catodo). Como este fato não acontece, a QE_t está limitada a três tipos de perdas como seguem (AFZALIAN, 2006, p. 12):

1) Para se formarem os eletrodos, uma porção da área total, A_T, será coberta por metal. Do ponto de vista óptico, essa área coberta é considerada inativa, o que reduz a área fotossensível, A_{FS}. A eficiência quântica externa, pode ser definida, como sendo correspondente à área fotossensível e não a área total:

$$QE_t = EQ_E \frac{A_{FS}}{A_T} \tag{44}$$

2) Devido às perdas por reflexões e transmissões na incidência da luz, como vimos em 2.3, nem toda a Potência luminosa Incidente (P_{IN}) é absorvida pelo fotodetector (P_a), portanto, a relação P_a e P_{IN} depende da profundidade do semicondutor e do comprimento de onda da luz incidente. Essa relação é chamada de eficiência alcançável:

$$\eta = \frac{P_a}{P_{IN}} \tag{45}$$

3)A eficiência quântica interna (EQ_I), leva em consideração, as perdas entre os portadores coletados nos eletrodos comparados aos portadores gerados na região de absorção. Se os portadores são fotogerados dentro da RDD sob o efeito de um alto campo elétrico os pares elétron-lacuna podem ser separados na região de difusão e coletados antes de se recombinarem. Se os portadores são fotogerados fora da RDD, deverão primeiro se difundir para dentro da RDD para serem coletados antes de se recombinarem. Como o processo de difusão é lento, os portadores fotogerados se recombinam diminuindo a corrente fotogerada (AFZALIAN, 2006, p. 12). Dessa forma, a EQ_I leva em consideração apenas as perdas por recombinação através da equação (46) será igual a 1. Na prática, somente os portadores fotogerados na RDD que estão próximos da pequena região de difusão, podem ser coletados antes de se recombinarem.

$$QE_t = \eta \frac{A_{FS}}{A_T} EQ_I \tag{46}$$

3.6.4 Responsividade

A responsividade espectral também é um parâmentro de medida da eficiência da conversão óptica em elétrica, é a razão da fotocorrente total I_{FG} dividida pela potência óptica incidente. É um parâmetro que pode estimar diretamente a fotocorrente induzida pela

iluminação em função da potência da luz em cada comprimento de onda (BULTEEL, 2011, p. 17).

$$R = \frac{I_{FG}}{P_{IN}} = \frac{q\,\lambda}{hc} QE_t = \frac{\lambda\, QE_t}{1{,}243} \tag{47}$$

A responsividade de detectores reais é sempre menor devido à reflexão parcial da luz na superfície do semicondutor e devido à recombinação parcial de portadores fotogerados no semicondutor ou em sua superfície (ZIMMERMANN, 2010, p. 7).

3.6.5 Detectividade ou sensibilidade

A sensibilidade ou detectividade de um sensor é definida como a mínima potência do sinal incidente que é detectável (AFZALIAN, 2006, p. 13) 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 sejam distinguíveis uma da outra.

3.6.6 Outras tecnologias

Fotodiodos PIN implementados em tecnologia SOI se beneficiam das vantagens desta tecnologia como baixo consumo de energia, temperatura e resistência à radiação(BULTEEL, 2011, p. 18).

O desempenho de fotodiodos PIN tem sido extensivamente estudado e aprimorado em diversas tecnologias e materiais, apresentaremos os resultados das simulações e das medidas experimentais nos próximos capítulos, entretanto é possível notar os avanços destes estudos.

Fotodiodos PIN Bulk implementados em SiGe com camada fina apresentaram responsividade de 200 mA/W e eficiência quântica de 61 % em comprimentos de onda UV e azul (ZIMMERMANN et al., 2009).

Fotodiodos PIN verticais de alto desempenho de junção heterogênea GeSn/Ge no substrato, apresentaram responsividade de 120 mA/W em comprimentos de onda de 1608 nm e 200 mA/W em comprimentos de onda de 1550 nm (CONG et al., 2015).

Resultados experimentais em fotodiodos PIN laterais implementados com semicondutor 4H-SiC apresentaram responsividade máxima de 169 mA/W para comprimentos de onda de 320nm e uma eficiência quântica de 69 % (BENEDETTO; LICCIARDO; RUBINO, [s.d.]).

4. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

As simulações apresentadas neste trabalho foram desenvolvidas utilizando o simulador de dispositivos Atlas (SOFTWARE, 2017), da empresa Silvaco. O Atlas é uma poderosa ferramenta de soluções de equações diferenciais derivadas das leis de Maxwell, com uma técnica de discretização precisa e robusta. Utiliza técnicas de iterações não lineares pelos métodos Gummel, Newton e Block (SOFTWARE, 2017, p. 80).

O Atlas interage com outras ferramentas da empresa Silvaco para simulação de processos como Athena e o Tonyplot, que é uma ferramenta capaz de fornecer visualização de variáveis internas da estrutura, grade de pontos, concentração de dopantes, tensão, densidade de corrente, densidade de cargas, potencial elétrico, campo elétrico, bem como as características ópticas do tipo: absorção, transmissão, comprimento de onda, dentre outros(SOFTWARE, 2017, p. 29).

4.1 DISPOSITIVOS SIMULADOS

Neste capítulo, será apresentada uma descrição dos dispositivos simulados, os modelos físicos de mobilidade, recombinação e estatísticas de portadores para as simulações numéricas realizadas neste trabalho.

4.1.1 Estrutura

Para a simulação foram descritos no Atlas, fotodiodos PIN SOI laterais semelhantes ao perfil apresentado na Figura 24. Foram simulados diodos PIN com comprimentos de região intrínseca (L_i) de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 μm e espessuras de camada de silício (t_{Si}) de 40, 80, 160, 320 e 500 nm. Em todas as simulações, a espessura da camada de óxido enterrado foi de 390 nm. Foram utilizadas concentrações de dopantes de $2x10^{20}$ cm^{-3} para a região P, $4x10^{20}$ cm^{-3} para a região N, e a região intrínseca foi mantida com a concentração natural da lâmina, de $1x10^{15}$ cm^{-3} do tipo P (DE SOUZA et al., 2011).

As simulações foram realizadas com o objetivo de avaliar o comportamento dos fotodiodos em uma faixa de comprimento de onda (λ) entre 0,2 e 0,8 μm, aplicando-se uma potência de incidência de 1 mW/cm^2 com ângulo incidente de 90 graus para uma tensão reversa (V_D) de -1 V. A temperatura foi variada entre 100 e 450 K.

A Tabela 1 sumariza os parâmetros tecnológicos e as dimensões dos dispositivos simulados:

Tabela 1 - Parâmetros tecnológicos e dimensões dos fotodiodos PIN SOI CMOS.

Parâmetros	Dimensões dos Fotodiodos simulados	Dimensões do Fotodiodo PIN de referência
Comprimento da Região Intrínseca (L_i)	5, 10, 15, 20, 25 e 30 µm	8 e 9 µm
Espessura da camada de silício (t_{Si})	40, 80, 160, 320 e 500 nm	80 nm
Espessura do Óxido Enterrado (T_{BOX})	390 nm	390 nm
Concentração de Dopantes da Região Intrínseca (N_i)	$1x10^{15}$ cm^{-3}	$1x10^{15}$ cm^{-3}
Concentração de Dopantes P+ (N_A)	$2x10^{20}$ cm^{-3}	$2x10^{20}$ cm^{-3}
Concentração de Dopantes N+ (N_D)	$4x10^{20}$ cm^{-3}	$4x10^{20}$ cm^{-3}
Comprimento das Regiões P+, N+ (L_P, L_N)	9 µm	9 µm

Fonte : Autor

4.1.2 Modelos

Os modelos físicos utilizados em simuladores numéricos podem ser agrupados em cinco classes: mobilidade, recombinação, estatísticas de portadores, ionização por impacto e tunelamento.

Com o objetivo de descrever a tendência de comportamento da corrente fotogerada em função da temperatura em fotodiodos PIN SOI reportada na literatura(DE SOUZA et al., 2011), foram simuladas diferentes combinações de modelos de mobilidade, geração/recombinação e estatísticas de portadores.

A seguir são descritos brevemente os modelos utilizados nestes conjuntos de parâmetros testados.

a) Mobilidade

A escolha dos modelos de mobilidade, levaram em consideração as características descritas dos dispositivos da Tabela 1, sendo estes, submetidos a campo elétrico paralelo, ou seja, a velocidade de saturação deve ser avaliado, a dependência da concentração de portadores majoritário e minoritário com as variações de temperatura. Com base nestas características, os modelos de mobilidade abaixo foram selecionados:

FLDMOB (*Parallel Electric Field Dependence*): modelo de degradação da mobilidade que considera o efeito do campo elétrico lateral (SOFTWARE, 2017, p. 76) e (ZIMMERMANN, 2010, p. 17).

KLAASSEN: considera a dependência da mobilidade inicial com a temperatura e concentração de dopantes; este modelo inclui os mecanismos de espalhamento de rede, por impurezas ionizadas, portador-portador e por impurezas neutras (SOFTWARE, 2017, p. 76).

b) Recombinação

A escolha dos modelos de recombinação, levaram em consideração as características descritas dos dispositivos da Tabela 1, ou seja, o tempo de vida dependente da concentração de dopantes e das variações de temperatura, para o silício. Com base nestas características, dois modelos de recombinação abaixo foram selecionados:

CONSRH: modelo de recombinação Shockley-Read-Hall considerando o tempo de vida dependente da concentração de dopantes (SOFTWARE, 2017, p. 77) e (ZIMMERMANN, 2010, p. 20).

O modelo SRH (modelo de recombinação Shockley-Read-Hall, considera o tempo de vida fixo para os dopantes (SOFTWARE, 2017, p. 77), também foi simulado, no entanto, foi descartado pois notou-se que devido ao tempo de vida de dopantes ser fixo, não foi notado variações na corrente total do dispositivo quando submetidos a temperaturas acima de 275K.

c) Estatísticas de Portadores

A escolha dos modelos de estatísticas de portadores, levaram em consideração as características descritas dos dispositivos da Tabela 1, ou seja, o estreitamento da largura de banda proibida dependente da concentração de dopantes e das variações de temperaturas, ionização imcompleta de impurezas, para o silício. Com base nestas características, os modelos de estatísticas de portadores abaixo foram selecionados:

BGN (*Band Gap Narrowing*): considera o estreitamento da largura da faixa proibida, sendo importante em regiões com altas concentrações de dopantes (SOFTWARE, 2017, p. 75).

INCOMPLETE: considera a ionização incompleta das impurezas com a redução da temperatura (SOFTWARE, 2017, p. 75).

IONIZ: usado como complemento do modelo INCOMPLETE, considerando ionização completa em silício com alta concentração de dopantes (SOFTWARE, 2017, p. 75).

d) Ionização por impacto

Leva em consideração que, devido ao alto campo elétrico, os portadores são acelerados adquirindo energia cinética suficiente para colidir com outros átomos e romper ligações covalentes gerando pares elétron-lacuna. No Silício, para elétrons, é considerado alto campo elétrico acima de 0,3V/μm (TSIVIDIS; MCANDREW, 2011, p. 12). Os parâmetros tecnológicos, as dimensões dos dispositivos, bem como, a faixa de tensão reversa simuladas nesse trabalho, que resultam em campo elétrico menor que 0,3V/μm que pode ser considerado

baixo campo elétrico (TSIVIDIS; MCANDREW, 2011, p. 12) e portanto, os efeitos de ionização por impacto foram considerados irrelevantes e não foram usados nos conjuntos de modelos simulados.

e) Tunelamento

Numa junção PN, leva em consideração dispositivos com altas concentrações de dopantes (N_A e N_D) e também devido ao alto campo elétrico aplicado (SZE; NG, 2007, p. 103). Em ambas as situações a largura da região de depleção fica extremamente reduzida e os elétrons podem passar diretamente da banda de valência do material P para a banda de condução do material N. Em fotodiodos PIN o comprimento de região intrínseca (I) causa um aumento na largura da região de depleção que além de levemente dopada reduz significativamente o campo elétrico aplicado. Os parâmetros tecnológicos, as dimensões dos dispositivos, bem como, a faixa de tensão reversa simuladas nesse trabalho, que resultam em campo elétrico menor que 0,3V/μm que pode ser considerado baixo campo elétrico (TSIVIDIS; MCANDREW, 2011, p. 12) e portanto, os efeitos de tunelamento foram considerados irrelevantes e não foram usados nos conjuntos de modelos simulados.

Um exemplo de arquivo de simulação é apresentado no Apêndice A.

4.2 ANÁLISE DOS DISPOSITIVOS SIMULADOS E RESULTADOS

Neste capítulo, será feita uma análise dos fotodiodos PIN em tecnologia SOI, suas principais características como a corrente total no diodo (I_D), a corrente fotogerada (I_{FG}), a corrente de escuro (I_{DARK}), a eficiência quântica, absorção e responsividade para diodos PIN com diferentes espessuras de silício (t_{Si}), comprimentos de região intrínseca (L_i) submetidos a variações da tensão reversa (V_R), comprimentos de onda de luz (λ) potência de luz incidente (P_{IN}) e faixa de temperatura através das simulações numéricas 2D com ATLAS.

4.2.1 Definição dos modelos e comportamentos elétricos

A literatura sugere o agrupamento de modelos físicos do simulador para análise dos efeitos elétricos (AFZALIAN; FLANDRE, 2005) (DE SOUZA et al., 2011), alguns destes modelos serão apresentados neste trabalho.

Com o objetivo de apresentar as tendências reportadas na literatura da Figura 26 representada com o módulo da corrente total (I_D) em um fotodiodo PIN com L_i=8 μm e espessura da camada de silício t_{Si}=80 nm, submetido à uma tensão reversa entre -0,5 e -1,5 V,

iluminado por uma potência incidente de 1 mW/cm^2 com comprimentos de onda de 390 nm, 410 nm e 460 nm, ângulo de incidência (θ) de 90° e uma faixa de temperatura entre 100 e 450 K. Tal gráfico foi extraído de(DE SOUZA et al., 2011) para servir como referência nos resultados da simulação.

A Tabela 2 apresenta os conjuntos com os modelos utilizados em cada um. O objetivo destes conjuntos é avaliar, com as variações de temperatura, os efeitos causados na corrente total (I_D) do fotodiodo bem como comparar a predominância do efeito de um modelo sobre o outro quando utilizados individualmente ou combinados. Para as simulações destes conjuntos de modelos físicos, foi utilizado um fotodiodo PIN de referência indicado na Tabela 1 com comprimento de região intrínseca L_i=8 μm e espessura da camada de silício t_{Si}=80 nm e demais características foram mantidas conforme descritas.

Tabela 2 - Conjuntos de modelos físicos utilizados para análise da corrente total I_D com variação da temperatura.

Efeito elétrico	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5	Conjunto 6
bgn			★	★	★	★
fldmob	★			★		★
kla	★					★
consrh		★			★	★
Incomplete ioniz	100 K a 275 K					

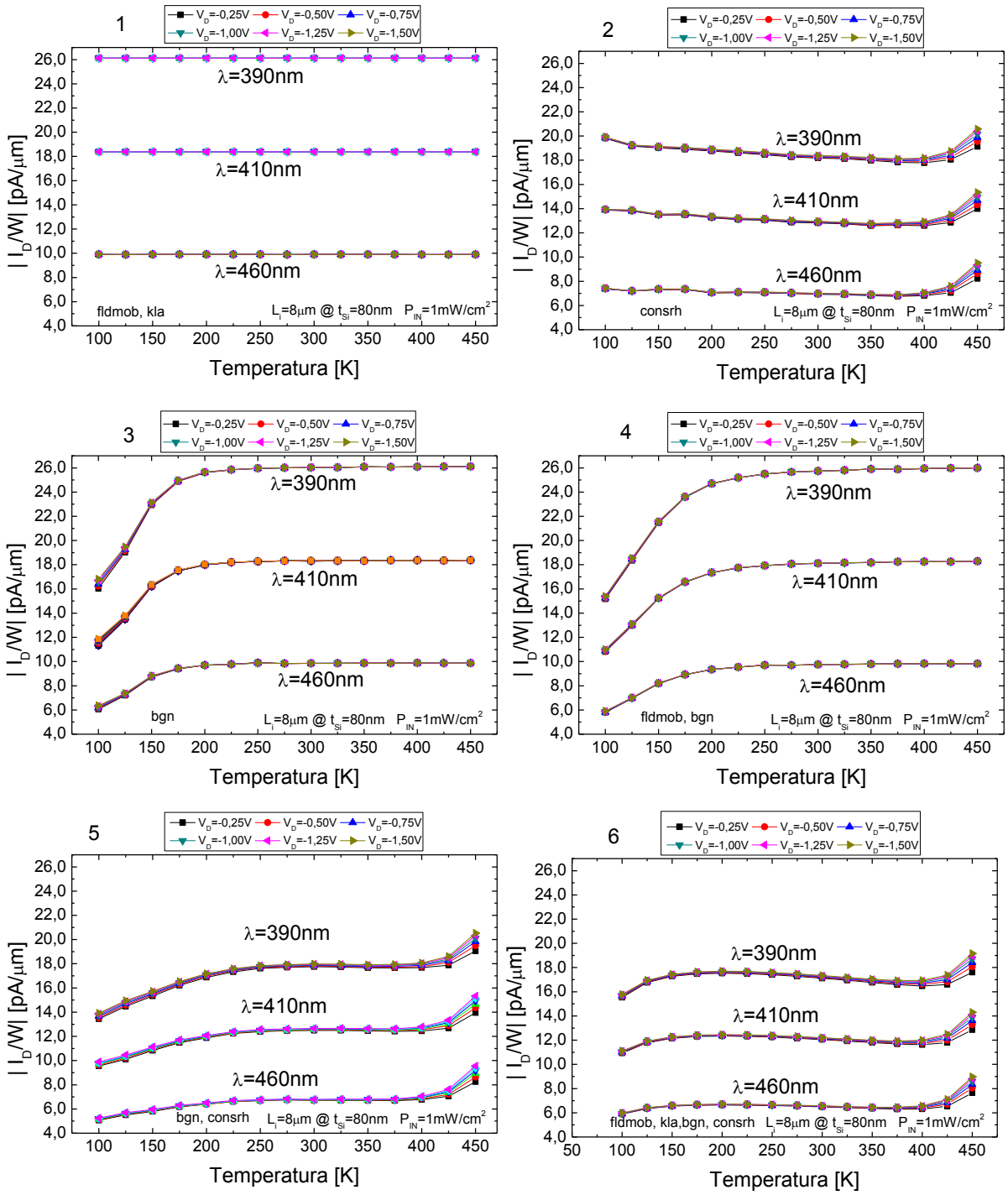
Fonte: Autor

Ao se comparar os resultados obtidos na Figura 27, que apresenta corrente total (I_D) para uma potência incidente de 1 mW/cm^2, para os comprimentos de onda λ=390 nm, 410 nm e 460 nm e tensão de polarização V_D entre -0,25 V e -1,5 V com as curvas da Figura 26 é possível avaliar que, alguns modelos físicos quando combinados podem prevalecer ou não sobre os outros. A seleção dos conjuntos da Tabela 2 leva em consideração os efeitos que apresentaram variações significativas na corrente total I_D, para que se possa compreender a contribuição de cada modelo visto que experimentalmente essa separação não é possível.

No conjunto 1 percebe-se um aumento mais pronunciado da corrente I_D em toda faixa de temperatura, isso mostra o quanto que ambos os modelos (kla e fldmob) afetam na mobilidade, apesar do baixo campo lateral implicar em pouca influência da mobilidade em temperaturas mais baixas se comparada, a pequena variação da degradação da mobilidade ao longo de toda faixa de temperatura como pudemos ver em Figura 18, podemos notar a predominância do efeito do espalhamento da mobilidade sobre o efeito de campo elétrico.

No conjunto 2 percebe-se uma redução na corrente I_D mais acentuada entre 250 e 425k avalia-se o efeito da recombinação (consrh) dependente da concentração, isso significa que o aumento da recombinação diminui a corrente fotogerada, é possivel notar que esse modelo prevalece quando combinado com os demais modelos em outros conjuntos.

Figura 27 - Gráficos do módulo da corrente total I_D para os seis conjuntos de modelos simulados em função da temperatura, para diferentes comprimentos de onda incidentes.



Fonte: Autor

No conjunto 3, nota-se a influência do estreitamento de faixa proibida (bgn) em temperaturas baixas, um aumento na corrente I_D de até 40 % entre 100 e 250 K, nota-se que esse modelo prevalece quando combinado com outros modelos exceto consrh.

No conjunto 4 observa-se uma pequena redução da corrente I_D devido a inclusão do campo elétrico lateral, no entanto, o estreitamento de faixa proibida é o modelo que prevalece

No conjunto 5 nota-se que a corrente I_D tem maior predominância do efeito de estreitamento de faixa em temperaturas até 250 K, no entanto, o aumento do efeito da recombinação dependente da concentração e do tempo de vida dos portadores são favorecidos pelo estreitamento de faixa proibida, o que acarreta pouca variação na corrente I_D, em temperaturas até 400 K.

No conjunto 6 considera-se todos os efeitos dos modelos combinados, nota-se uma redução da corrente total I_D, sendo que em temperaturas menores que 250 K foram considerados o efeito de ionização incompleta de portadores aliados aos modelos de estreitamento de faixa e de campo elétrico contribuem para o aumento da corrente total enquanto que o modelo dependente da concentração que aumenta a recombinação contribuem para a redução da corrente, o resultado apresentado é uma curva ligeiramente suave da corrente total nessa faixa. Em temperaturas acima de 400K o efeito do espalhamento da mobilidade e da variação do campo elétrico contribuem para uma dispersão da corrente total I_D, ou seja, um campo elétrico maior aumenta a velocidade aproximação de portadores próximos a região de depleção e aumentando a coleta de portadores fotogerados antes de se recombinarem.

É possível notar que em polarização reversa, o diodo PIN SOI lateral apresenta uma variação muito pequena da corrente total (I_D) em uma extensa faixa de polarização reversa quando iluminado. Conforme descrito na literatura, foi adotada uma tensão fixa aplicada ao anodo (V_D) de -1 V para esta análise.

Avaliados e conhecidos os efeitos apresentados pelos resultados dos conjuntos da Tabela 2, é possível avaliar individualmente o efeito de cada modelo numérico escolhido, podendo ser usado para a simulações dos diferentes dispositivos. Comparando os resultados do conjunto que aplica todos os efeitos combinados, representados pelo conjunto 6 com as curvas apresentadas na Figura 27 é possível notar que as características elétricas são semelhantes à curva apresentada na Figura 26. Esse será o conjunto de modelos para a análise das variações do comprimento de região intrínseca (L_i) e da espessura de camada de silício (t_{Si}) nos fotodiodos simulados da Tabela 1 que serão apresentados neste trabalho.

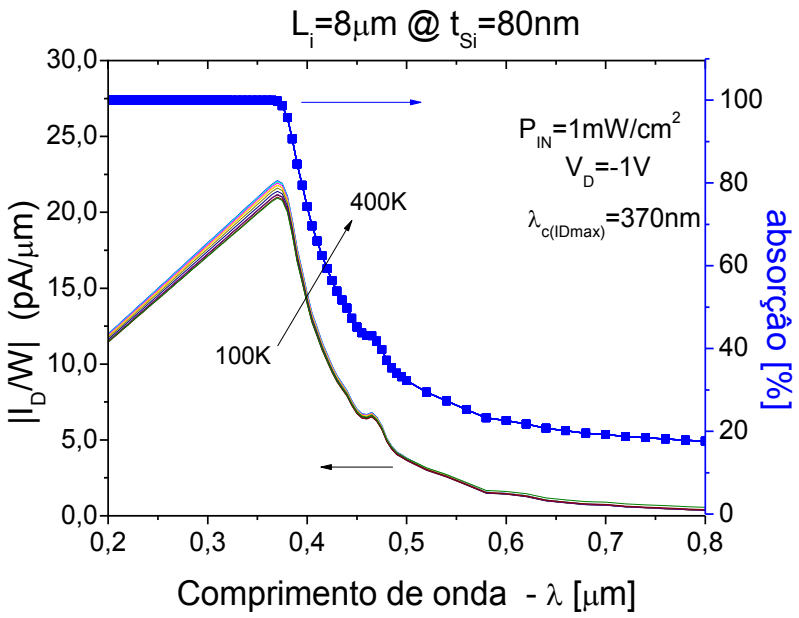
4.2.2 A absorção (%) e comprimento de onda crítico (λ_c)

A Figura 28 apresenta o módulo da corrente total (I_D) em função do comprimento de onda, simulada para V_D=-1 V para o conjunto 6, em temperaturas entre 100 K e 400 K. O coeficiente de absorção também é apresentado nestas figuras.

Para comprimentos de onda até 200 nm a energia do fóton é maior do que a faixa proibida. A incidência de luz atingirá a superfície da espessura da camada de silício (t_{Si}), não atingindo a região de depleção, os pares elétron-lacuna gerados se recombinarão antes de serem coletados, isso reduz a contribuição para corrente fotogerada.

Para comprimentos de onda entre 200 nm e 370 nm, a absorção é máxima, pois a energia do fóton é capaz de atingir uma região na profundidade da espessura de silício (t_{Si}) que garante que os pares elétron-lacuna gerados na região de depleção sejam difundidos na região de depleção e contribuam para o aumento da corrente fotogerada e para a corrente total I_D nota-se um crescimento linear com o aumento do comprimento de onda até 370 nm, onde atinge a máxima corrente, ponto esse, denominado de comprimento de onda crítico (λ_c).

Figura 28 - Módulo da Corrente Total (I_D) e da absorção em função do comprimento de onda(λ) simulada para V_D=-1 V para o conjunto 6.



Fonte: Autor

O aumento do comprimento da região intrínseca (L_i) deve ser suficiente para que os pares elétron-lacuna fotogerados sejam coletados na região de depleção, veremos mais adiante que há um comprimento de região intrínseca máximo que favorece o aumento de fótons a serem

coletados. Pode-se dizer que todos os pares elétron-lacuna gerados na região de depleção serão difundidos e contribuirão para o aumento da corrente total (I_D).

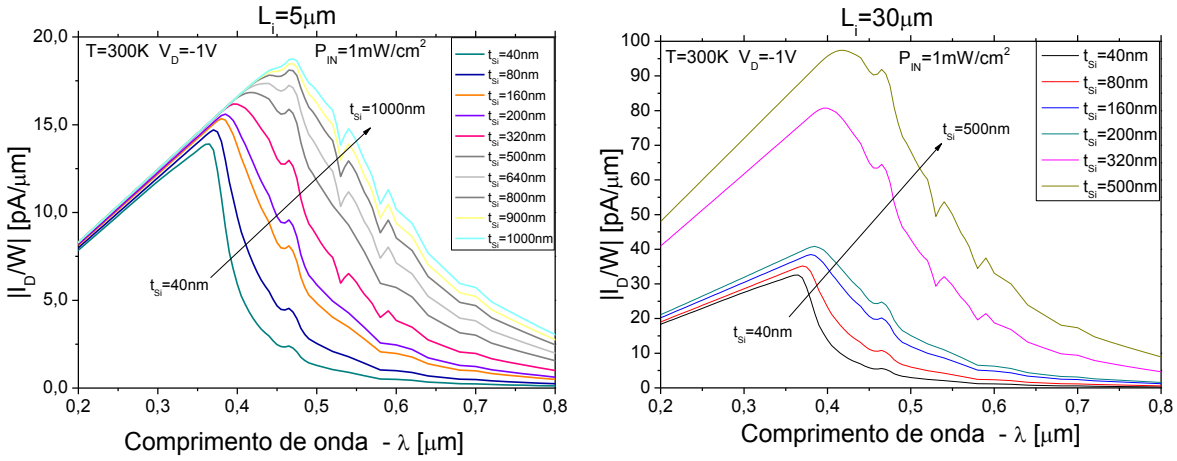
Aumentando-se o comprimento de onda acima do comprimento de onda crítico (λ_c), ou seja 370 nm, ocorre a redução da energia dos fótons, aumenta-se a profundidade de penetração do fótons na espessura reduzindo e também o processo de geração de portadores, uma vez que não possuem energia suficiente para atingir a faixa proibida. Como consequência, observa-se a redução da corrente total I_D.

Mesmo com a variação da temperatura entre a faixa de 100 a 400 K, a absorção não sofreu alteração significante na faixa de comprimento de onda estudado.

Considerando o resultado da corrente fotogerada nos diodos PIN com espessura de camada de silício de 80 nm, a análise será feita em uma faixa mais estreita de comprimentos de onda, limitada a 800 nm. A partir deste comprimento, a luz não é absorvida nesta profundidade, e a corrente fotogerada é praticamente nula.

A Figura 29 apresenta o módulo da corrente total (I_D) em função do comprimento de onda (λ) simulados para dispositivos com comprimentos de região intrínseca (L_i) de 5 μm e 30μm considerando a variação da espessura de camada de (t_{Si}). É possível notar que, com o aumento da espessura de camada de silício (t_{Si}), o comprimento de onda crítico (λ_c) também aumenta, isso reforça o fato de que, comprimentos de ondas maiores são absorvidos mais nas profundidades do semicondutor.

Figura 29 - Módulo da corrente total (I_D) em função do comprimento de onda (λ) simulados para diferentes espessuras de camada de silício (t_{Si}).



Fonte: Autor

O aumento do comprimento de região intrínseca (L_i) causa aumento na corrente total (I_D) devido ao aumento da área de captação de corrente fotogerada. No entanto, esse aumento

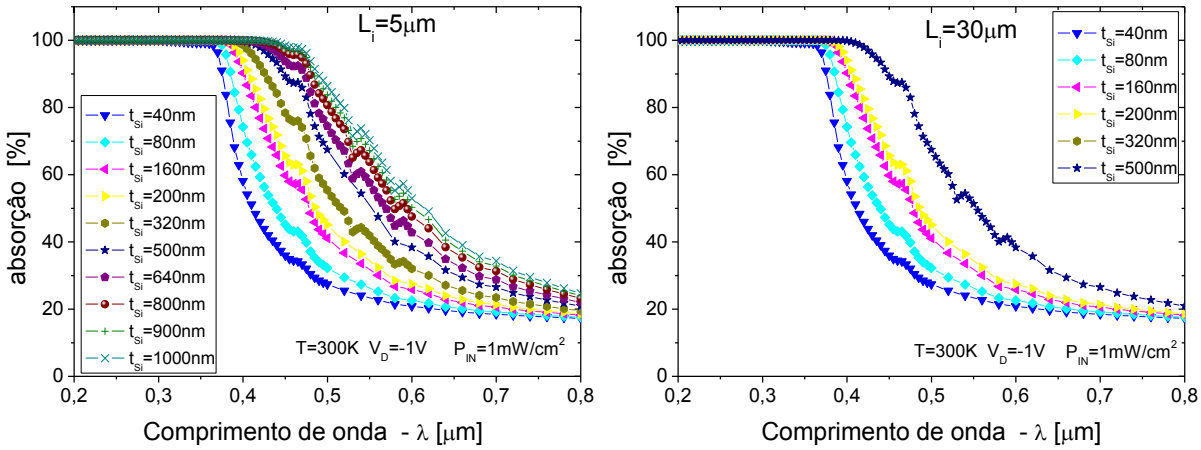
não tem influência sobre o comprimento de onda crítico (λ_c), que se mantém o mesmo, quando a espessura de camada de silício (t_{Si}) é mantida.

Para análise de absorção o manual do simulador de dispositivo Atlas(SOFTWARE, 2017, p. 693) leva-se em conta que o ângulo de incidência (θ) é de 90° e, portanto, a refletividade ocorrerá apenas devido à mudança dos meios envolvidos conforme (7). Assim, a análise leva em consideração a absorção e a transmissão em termos de porcentagem, que somados representam a totalidade.

A Figura 30 apresenta as curvas de absorção em função do comprimento de onda (λ) simulados para diferentes espessuras da camada de silício (t_{Si}), submetidos a uma potência incidente de 1 mW/cm^2 com uma tensão V_D=-1 V na temperatura de 300 K em dispositivos com comprimentos de região intrínseca (L_i) entre 5 µm e 30 µm. Nota-se que a absorção total (100 %) ocorre na faixa de comprimentos de onda entre 200 nm e o comprimento de onda crítico (λ_c). Acima de λ_c, a absorção é atenuada exponencialmente conforme visto em (14), uma vez que a energia do fóton é menor que λ_c, reduzindo a formação de pares elétron-lacuna na região de depleção e, consequentemente, reduzindo a corrente fotogerada. Nestas condições, uma parte cada vez maior da energia luminosa recebida é transmitida.

Os picos de máxima absorção ocorrem em comprimentos de onda em torno de 360 nm e 470 nm para espessuras de filme de silício de 40 nm e 1000 nm respectivamente independente do comprimento de região intrínseca.

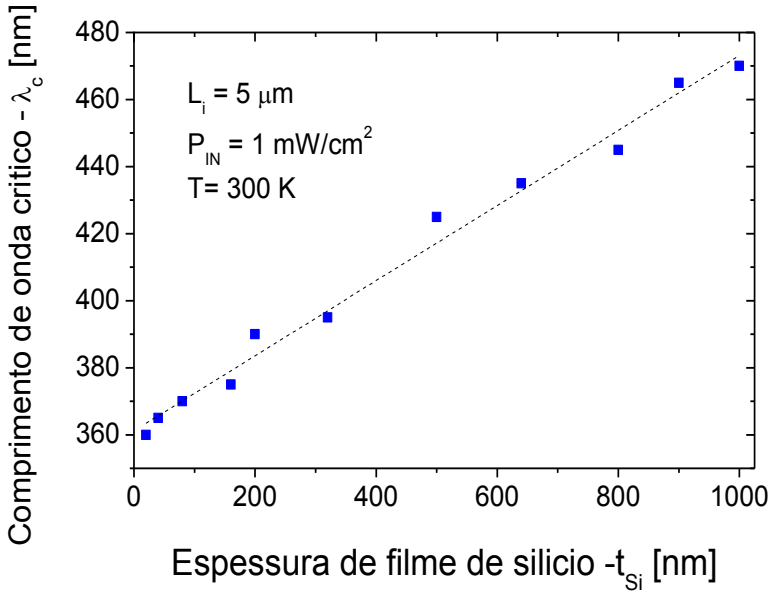
Figura 30 - Absorção em função do comprimento de onda (λ) simulados para diferentes valores de espessura da camada de silício (t_{Si}), submetidos a uma potência luminosa incidente (P_{IN}) de 1 mW/cm^2.



Fonte: Autor

Para espessuras de camadas de Silício (t_{Si}) até de 20 nm a absorção alcança 100 % e toda a energia proveniente da potência luminosa incidente será convertida em pares elétron-lacuna e serão absorvidos, contribuindo para a corrente total no diodo. É importante mencionar que para valores abaixo de 20 nm não foram esperados efeitos quânticos e estão fora do escopo desse trabalho. Portanto, cada espessura de filme de silício apresenta um comprimento de onda crítico (λ_c) diferente, conforme apresentado na Figura 31 e nota-se uma relação linear entre λ_c e t_{Si} (RODRIGUES; DE SOUZA, 2020).

Figura 31 - Comprimento de onda crítico em função da espessura de filme de silício.

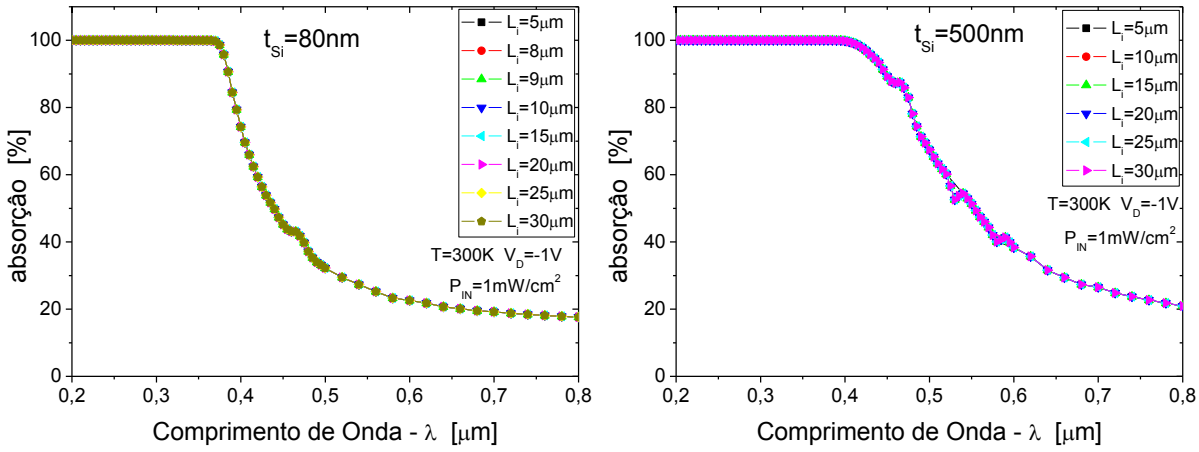


Fonte: Autor

Entretanto, nos gráficos da Figura 32, que apresentam as curvas de absorção em função do comprimento de onda (λ) simulados para diferentes comprimentos de região intrínseca (L_i) submetidos a uma potência incidente de 1 mW/cm^2 com uma tensão V_D=-1 V na temperatura de 300K em dispositivos com espessuras da camada de silício (t_{Si}) de 80 nm e 500 nm, é possível notar que a absorção varia com a espessura da camada de silício (t_{Si}), mas permanece inalterada com as variações no comprimento de região intrínseca (L_i) como observado anteriormente.

Assim, pode-se dizer que o dispositivo apresenta uma boa resposta de absorção entre a faixa de comprimentos de onda de 200 nm e 470 nm. Em comprimentos de onda acima de 400 nm, a absorção está em torno de 20%, a energia dos fótons incidentes no dispositivo será menor que a faixa proibida. Os fótons atingem uma profundidade maior que a espessura de silício e, portanto, haverá pouca geração de pares elétron-lacuna fazendo com 80 % da luz incidente no dispositivo seja transmitida.

Figura 32 - Absorção em função do comprimento de onda (λ), simulados para diferentes comprimentos de região intrínseca (L_i) submetidos a uma potência luminosa incidente (P_{IN}) de 1 mW/cm^2.



Fonte: Autor

4.2.3 Corrente de Escuro (I_{Dark})

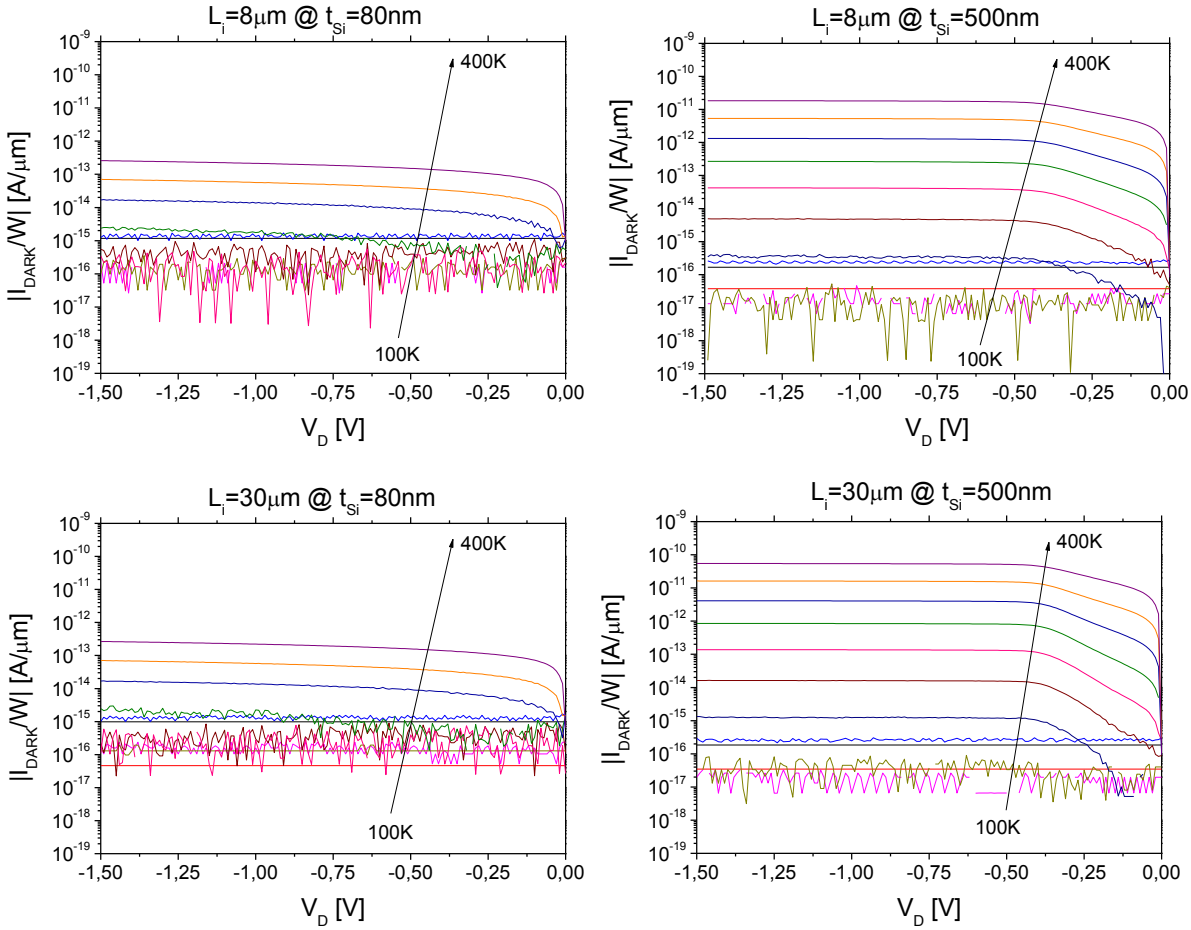
A Figura 33 apresenta o módulo da corrente de escuro normalizada ($|I_{DARK}/W|$) simulada em função da tensão reversa aplicada entre 0 e -1,5 V para diodos PIN SOI laterais com comprimentos de região intrínseca (L_i) de 8 e 30 μm com espessuras de camada de silício com 80 e 500 nm para uma faixa de temperatura entre 100 K e 400 K. A partir destas curvas, é possível notar que, com a aumento da temperatura, a corrente de escuro aumenta, no entanto, esse aumento em torno de 2 ordens de magnitude é mais pronunciado com o aumento da espessura de filme de silício (t_{Si}) se comparado com o aumento do comprimento de região intrínseca (L_i). Entretanto, isso é percebido apenas para temperaturas superiores a 300 K, devido ao aumento das vibrações dos fônons que contribui para o aumento da geração de pares elétron-lacuna e, consequentemente, para o aumento significativo da corrente total no fotodiodo (I_{DARK}).

Para baixas temperaturas, a corrente de escuro torna-se bastante baixa, ficando abaixo da precisão numérica do simulador como mencionado em 3.6.1. Também é possível notar que a variação da tensão reversa entre 0 e -1,5 V, que representa baixa introdução de campo elétrico lateral descrito em 4.1.2 a), não afeta significativamente a corrente de escuro nessa faixa.

Nota-se que em polarização reversa, o diodo PIN SOI lateral apresenta uma variação muito pequena da corrente de escuro (I_{DARK}) em uma extensa faixa de polarização reversa em uma mesma temperatura. Conforme mencionado em 5.2.1, foi adotada uma tensão fixa aplicada ao anodo (V_D) de -1 V que atenderá ambas as condições quando iluminado e em escuro.

Ao se comparar os resultados obtidos nas simulações para o fotodiodo com L_i = 8 μm e t_{Si} = 80 nm da Figura 33 com os da literatura apresentados em 3.6.1, nota-se que apesar da imprecisão numérica em baixas temperaturas visto que uma maior variação nos resultados da corrente total (I_{DARK}) dentro da faixa entre 10^{-16} e 10^{-18} A, os resultados mostram que há consistência e valores muito próximos também em temperaturas acima de 300 K . Portanto o conjunto de modelos estudado pode ser usado para análise nas simulações para dispositivos propostos da Tabela 1.

Figura 33 - Módulo da Corrente de escuro normalizada ($|I_{DARK}/W|$) simulada em função da tensão no fotodiodo V_D e da temperatura.



Fonte: Autor

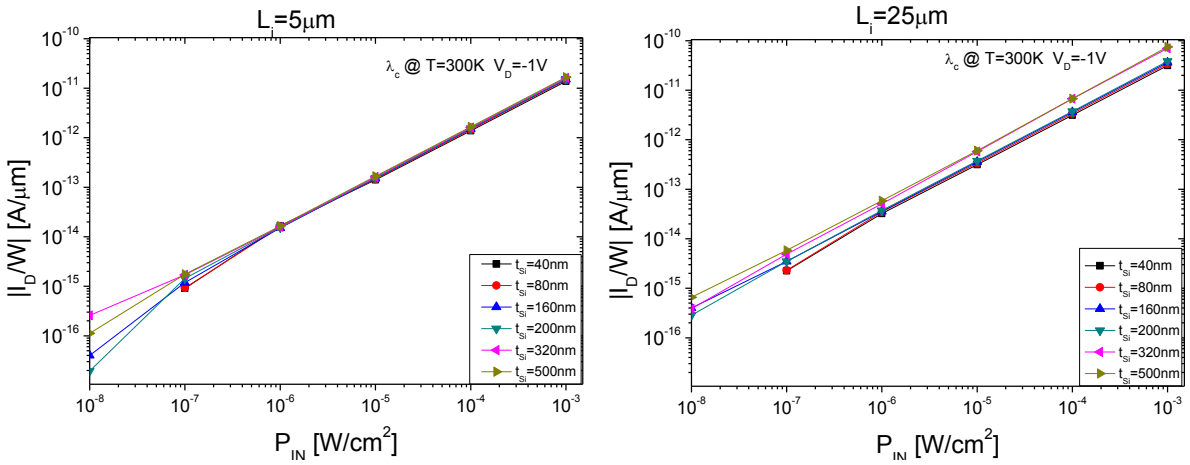
4.2.4 Influência da Potência Luminosa Incidente (P_{IN})

A Figura 34 apresenta o módulo da corrente total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função da potência luminosa incidente (P_{IN}) entre 10^{-8} e 10^{-3} W/cm^2 para dispositivos com L_i de 5μm e 25μm e t_{Si} entre 40 nm e 500 nm, polarizados com V_D=-1 V e submetidos a temperatura de 300 K. Os dispositivos foram submetidos à faixa de potência luminosa incidente

descrita, com o comprimento de onda crítico (λ_c) correspondente a cada t_{Si}, para se obter a corrente total máxima.

A partir destes resultados é possível notar que, em potências menores que 10^{-8} W/cm^2 os valores de corrente total (I_D) medidos ficam próximos do limite de precisão do simulador, tornando-as sujeitas a ruídos, interferências e imprecisões numéricas. Ainda assim, é possível estimar, pelos resultados obtidos, que os dispositivos possuem sensibilidade para captar potências luminosas incidentes (P_{IN}) a partir de algumas dezenas da nW/cm^2, conforme mencionado em 3.6.5.

Figura 34 - Módulo da corrente total normalizada (|I_D\W|) simulada em função da Potência luminosa Incidente (P_{IN}) por espessura de camada de silício (t_{Si}).



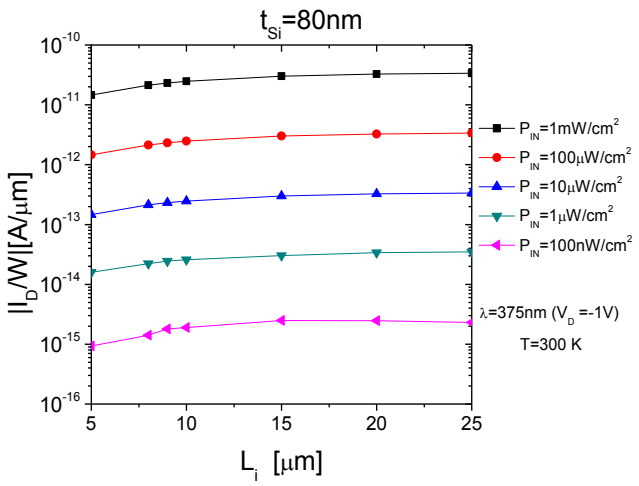
Fonte: Autor

Para valores acima de 10^{-8} W/cm^2, é possível notar um aumento linear da corrente total (I_D) proporcionado principalmente pelo aumento da potência luminosa incidente (P_{IN}). Também foi notado aumento linear da corrente total (I_D) proporcionado pelo aumento da espessura de camada de silício (t_{Si}), bem como, pelo aumento do comprimento da região intrínseca (L_i).

A Figura 35 apresenta o módulo da corrente total normalizada (|I_D/W|) simulada em função do comprimento da região intrínseca (L_i) numa faixa de 5 e 25 μm, submetidos a potências luminosas incidentes entre 10 nW/cm^2 e 1 mW/cm^2, para um comprimento de onda crítico (λ_c) de 375 nm e temperatura de 300 K, onde ocorre a máxima absorção e polarização V_D=-1 V. Nota-se que o aumento da corrente também é proporcionado pelo aumento do volume de material fotossensível na captação e geração de pares elétron-lacuna com o aumento do comprimento da região intrínseca (L_i). Será considerada uma potência luminosa incidente de 1 mW/cm^2, conforme referenciada pela literatura.

Para avaliar o comportamento linear da corrente total I_D em função da potência luminosa incidente (P_{IN}), foi calculado o coeficiente angular e o erro quadrático de alguns dispositivos, considerando a faixa de potência luminosa incidente entre 10^{-7} e 10^{-3} W/cm^2.

Figura 35 - Módulo da corrente total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função do comprimento da região intrínseca (L_i) para faixa de potências de incidência luminosa (P_{IN}) entre 100nW/cm^2 e 1 mW/cm^2.



Fonte:Autor

A Tabela 3 apresenta o coeficiente de variação da corrente total (I_D) em relação à variação da potência luminosa incidente (P_{IN}) de alguns dispositivos. Os resultados indicam que o aumento o volume fotossensível, proporciona o aumento na corrente fotogerada, e consequentemente, o aumento na corrente total I_D. Os valores de inclinação dI_D/dP_{IN} mostram o quanto essa relação é linear. Essa relação pode ser usada como parâmetro de medida de sensibilidade em fotodiodos PIN SOI.

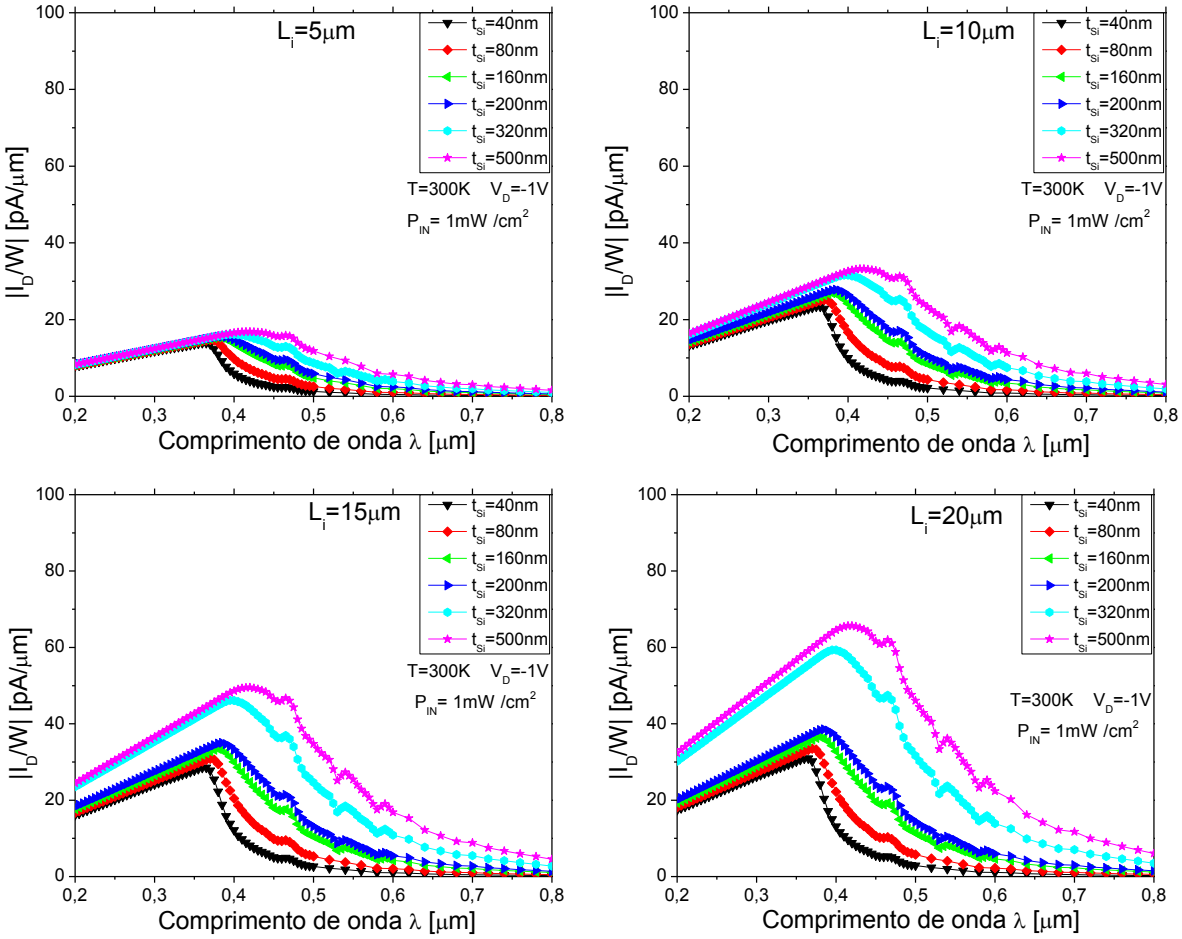
Tabela 3 - Coeficiente da corrente total (I_D) em relação à potência luminosa incidente (P_{IN}) para alguns fotodiodos PIN.

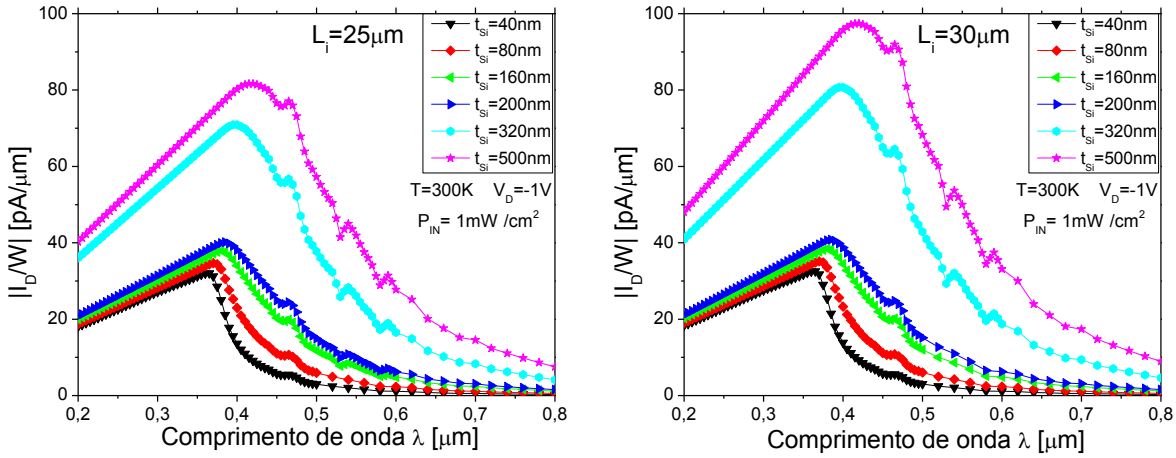
L_i [μm]	t_{Si} [nm]	Inclinação (dI_D/dP_{IN})	L_i [μm]	t_{Si} [nm]	Inclinação (dI_D/dP_{IN})	L_i [μm]	t_{Si} [nm]	Inclinação (dI_D/dP_{IN})
5	40	$1,3790 \times 10^{-8}$	15	40	$2,8019 \times 10^{-8}$	25	40	$3,1443 \times 10^{-8}$
5	200	$1,5354 \times 10^{-8}$	15	200	$3,3683 \times 10^{-8}$	25	200	$3,8496 \times 10^{-8}$
5	500	$1,6694 \times 10^{-8}$	15	500	$4,7549 \times 10^{-8}$	25	500	$7,5172 \times 10^{-8}$
10	40	$2,3062 \times 10^{-8}$	20	40	$3,0365 \times 10^{-8}$	30	40	$3,1985 \times 10^{-8}$
10	200	$2,6697 \times 10^{-8}$	20	200	$3,6940 \times 10^{-8}$	30	200	$3,9008 \times 10^{-8}$
10	500	$3,2473 \times 10^{-8}$	20	500	$6,1825 \times 10^{-8}$	30	500	$8,7533 \times 10^{-8}$

Fonte: Autor

A Figura 36 apresenta o módulo da corrente total normalizada ($|I_D/W|$) em função do comprimento de onda (λ) simulada para comprimentos de região intrínseca (L_i) ente 5 μm e 30μm e espessuras de camada de silício (t_{Si}) entre 40 nm e 500 nm em temperatura de 300 K, polarização V_D=-1 V e P_{IN} de 1 mW/cm^2. Ao se comparar a corrente total I_D no comprimento de onda crítico (λ_c) de cada dispositivo, nota-se que, em comprimentos de região intrínseca L_i entre 5 μm e 15 μm, a variação de t_{Si} proporciona a variação na corrente total (I_D) entre de 21% e 74%. Em comprimentos de região intrínsecas L_i entre 20 e 30 μm, a mesma variação de t_{Si} provoca o acréscimo na corrente total I_D entre duas a três vezes. No entanto, como a absorção da luz ocorre em λ_c distintos, o acréscimo da corrente total tende a ser menor.

Figura 36 - Módulo da Corrente total normalizada ($|I_D/W|$) em função do comprimento de onda (λ) simulada para comprimentos de região intrínseca (L_i) ente 5 μm e 30 μm e espessuras de camada de silício (t_{Si}) entre 40 nm e 500 nm em temperatura de 300 K, polarização V_D=-1 V e P_{IN} de 1 mW/cm^2.





Fonte: Autor

Isso mostra que a variação da espessura de camada de silício (t_{Si}), provoca o aumento na profundidade para a geração dos pares elétron-lacuna e aumento do volume de difusão com níveis energéticos menores, ou seja, comprimentos de ondas maiores contribuindo para o aumento da corrente total I_D.

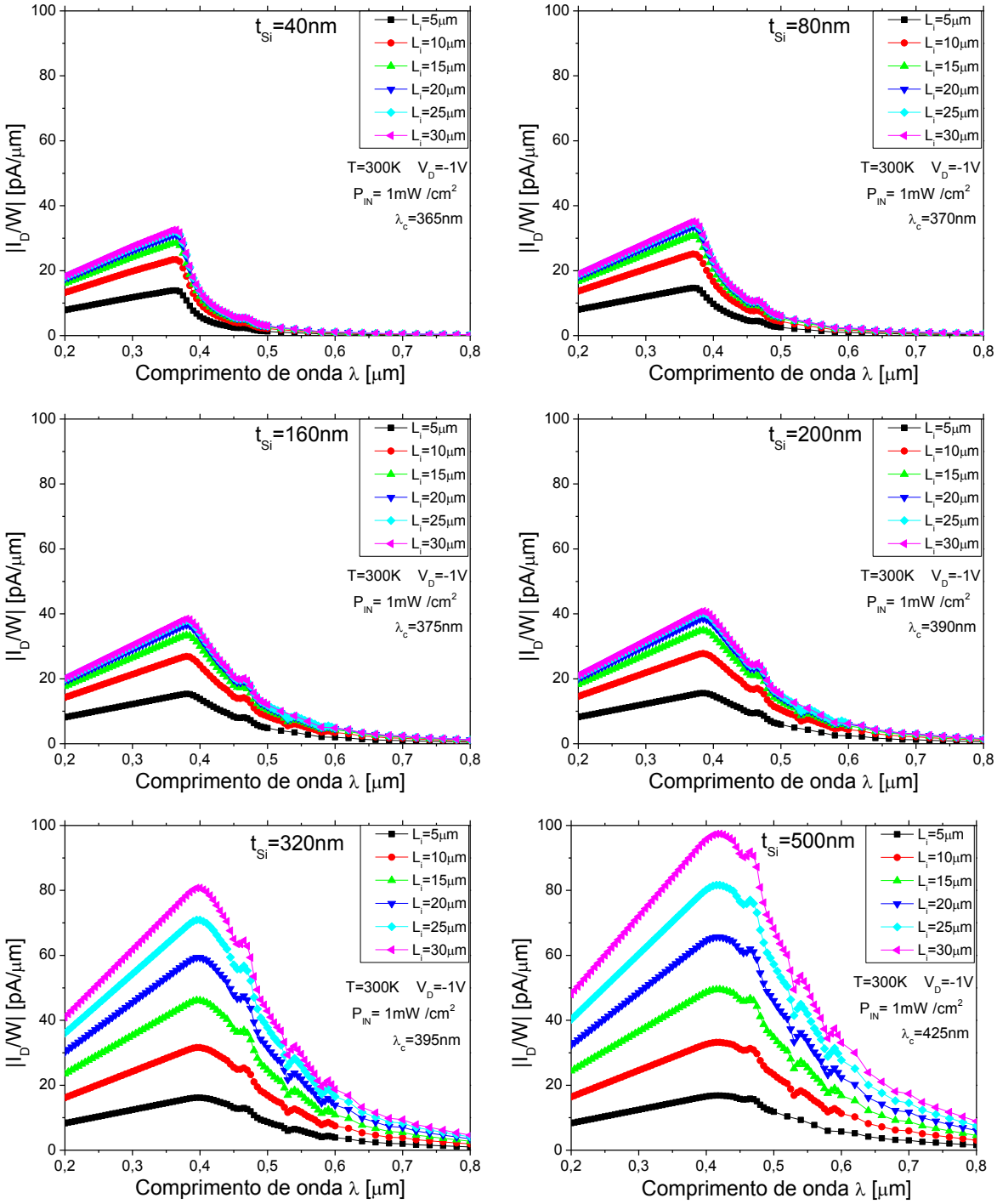
Para comprimentos de onda a partir de λ=700 nm, segundo a equação (8), a energia dos fótons luminosos será menor, portanto, os comprimentos de onda maiores são absorvidos mais profundamente. Para o dispositivo estudado, no qual a espessura da camada de silício (t_{Si}) é fina, o dispositivo se comporta como transparente e a energia absorvida será desprezada.

Observa-se na Figura 37 o módulo da corrente total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função do comprimento de onda (λ), para comprimentos de região intrínseca (L_i) ente 5 μm e 30 μm e espessuras de camada de silício (t_{Si}) entre 40 nm e 500 nm em temperatura de 300 K, polarização V_D=-1V e P_{IN} de 1mW/cm^2. Ao se avaliar a corrente total (I_D), o ponto máximo de corrente total, corresponde ao comprimento de onda crítico (λ_c) que é definido pela espessura da camada de silício (t_{Si}).

O aumento do comprimento da região intrínseca (L_i) entre 5 e 30 μm para uma mesma espessura de camada de silício (t_{Si}), proporciona um aumento na corrente total I_D de duas e seis vezes maiores. Esse comportamento é causado pelo aumento na área de captação de energia luminosa, proporcionando um acréscimo na formação de pares elétron-lacuna, contribuindo para o aumento significativo na corrente total I_D.

Pode-se notar que, tanto o aumento do comprimento de região intrínseca (L_i) quanto o aumento na espessura da camada de silício (t_{Si}) podem contribuir para o acréscimo na corrente fotogerada e consequentemente, o aumento da corrente total I_D do dispositivo.

Figura 37 - Módulo da Corrente Total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função do comprimento de onda (λ), para comprimentos de região intrínseca (L_i) ente 5 µm e 30 µm e espessuras de camada de silício (t_{Si}) entre 40 nm e 500 nm em temperatura de 300 K, polarização V_D=-1 V e P_{IN} de 1 mW/cm^2.



Fonte: Autor

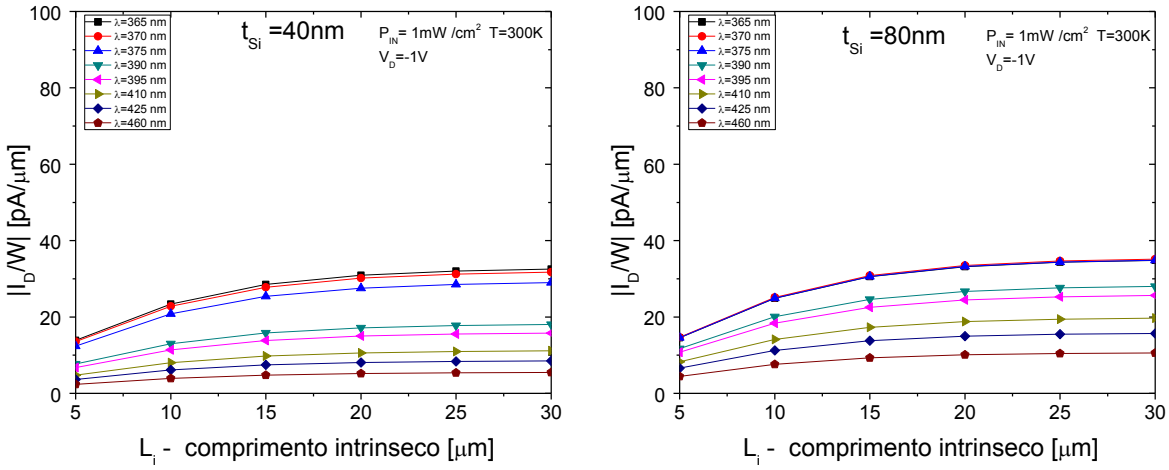
4.2.5 Influência do comprimento da região intrínseca (L_i)

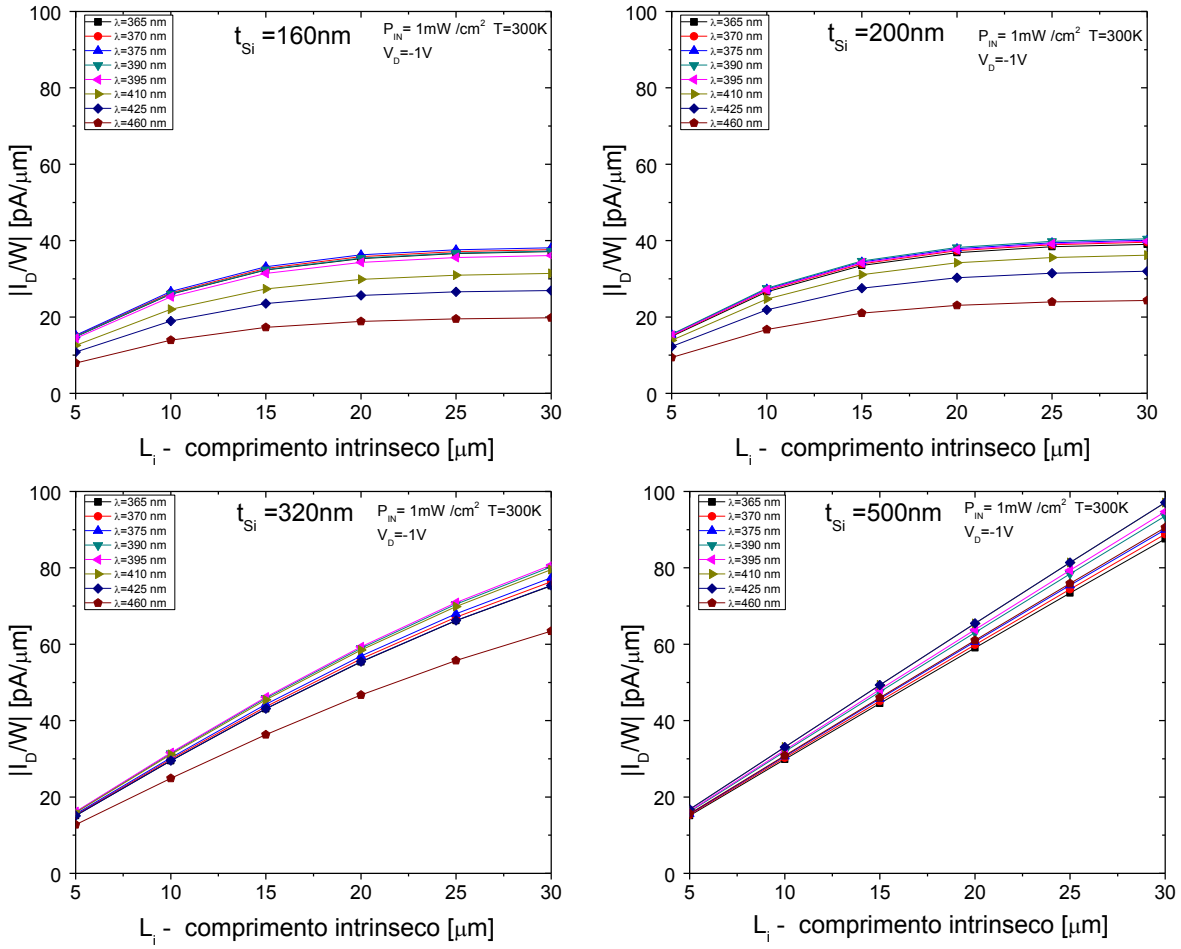
Nesta seção é avaliada a influência do comprimento da região intrínseca (L_i) em fotodiodos PIN SOI, uma vez que o aumento dessa característica provoca aumento da corrente total I_D.

A Figura 38 apresenta o módulo da corrente total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função do comprimento da região intrínseca (L_i) entre 5 e 30μm, para espessuras t_{Si}=40, 80, 160, 200, 320, 500 nm com potência luminosa incidente de 1 mW/cm^2, tensão V_D=-1 V e temperatura de 300 K.

A partir destes resultados, pode-se notar que, de fato, um aumento no comprimento da região intrínseca (L_i) proporcionará aumento na área fotossensível e na geração de pares elétron-lacuna e, por sua vez, provocará aumento na corrente total (I_D). Entretanto, a máxima absorção ocorre no comprimento de onda crítico (λ_c), que foram simulados nos fotodiodos PIN SOI conforme a tabela 2.

Figura 38 - Módulo da Corrente Total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função do comprimento de região intrínseca (L_i) para faixa de comprimento de onda e a uma Potência Luminosa incidente (P_{IN}).

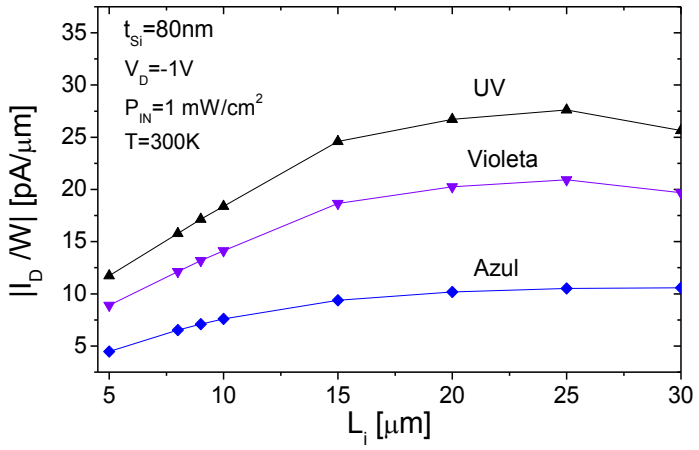




Fonte: Autor

A Figura 39 apresenta o módulo da corrente total normalizada ($|I_D /W|$) simulada em função do comprimento da região intrínseca (L_i) para os comprimentos de onda UV, violeta e azul. O aumento do comprimento da região intrínseca aumenta a área fotossensível o que contribui para o aumento da fotocorrente. No entanto, o aumento do comprimento da região intrínseca causa um aumento da distância a ser percorrida pelos pares elétron-lacuna gerados em direção à região de difusão, favorecendo a recombinação. Essa é a razão para a diminuição da fotocorrente para $L_i > 25$ μm.

Figura 39 - Módulo da Corrente Total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função do comprimento de região intrínseca (L_i) para o comprimento de onda UV, violeta e azul.



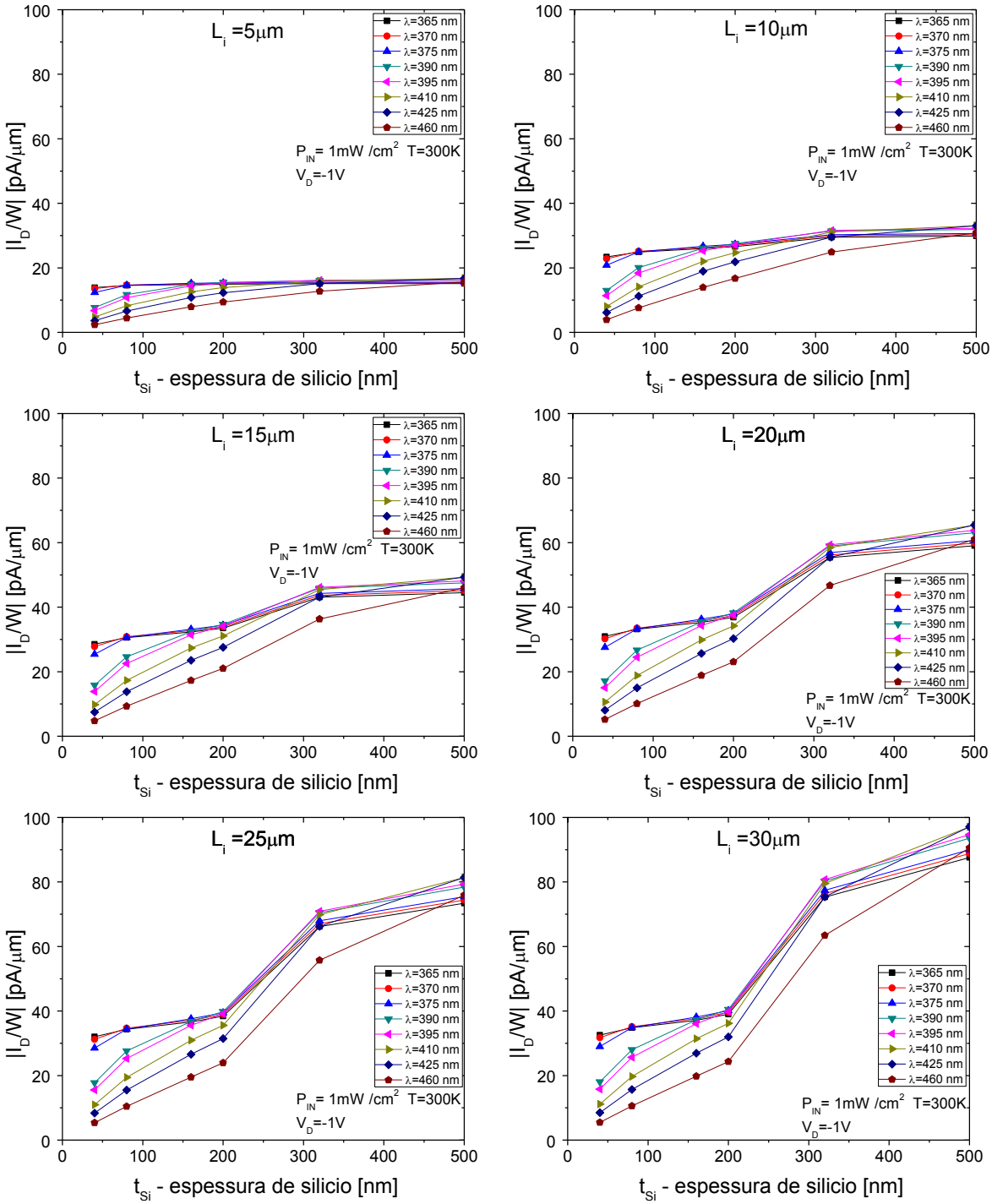
Fonte: Autor

4.2.6 Influência da Espessura da camada de silício (t_{Si})

Conforme apresentado nas curvas de I_D x λ da Figura 36, a corrente total do fotodiodo tem valores mais significativos em comprimentos de onda na faixa de 200 nm e 400 nm.

A Figura 40 apresenta o módulo da corrente total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função da espessura de silício (t_{Si}) para alguns comprimentos de onda, para os dispositivos da Tabela 1, com potência luminosa incidente de 1mW/cm^2, tensão de polarização V_D=-1 V e temperatura de 300 K. Nota-se que, a variação da espessura de filme de silício (t_{Si}), influencia na corrente total (I_D). O aumento da espessura do filme de silício (t_{Si}) aumentará a corrente total do fotodiodo e o comprimento de onda crítico (λ_c) como descrito em 4.2.2. Ao longo do eixo, é possível notar que para cada espessura de filme de silício (t_{Si}) terá um comprimento de onda cuja corrente total máxima que vai se alternando. Nota-se também que para comprimento de região intrínseca menores, como Li = 5 μm, a corrente máxima é atingida em torno de t_{Si} = 450nm para qualquer comprimento de onda, ou seja, atingiu a maior captação de pares elétron-lacuna para a área fotossensível correspondente e portanto, um aumento em t_{Si} terá pouca influência no aumento da corrente total. Em comprimentos de região intrínseca (Li) maiores, haverá maior dependência da espessura do filme de silício (t_{Si}), visto que as variações da corrente total são maiores e estarão relacionadas com o comprimento de onda crítico (λ_c).

Figura 40 - Módulo da Corrente Total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função da espessura de silício (t_{Si}) para faixa de comprimento de onda a uma Potência Luminosa incidente (P_{IN}).

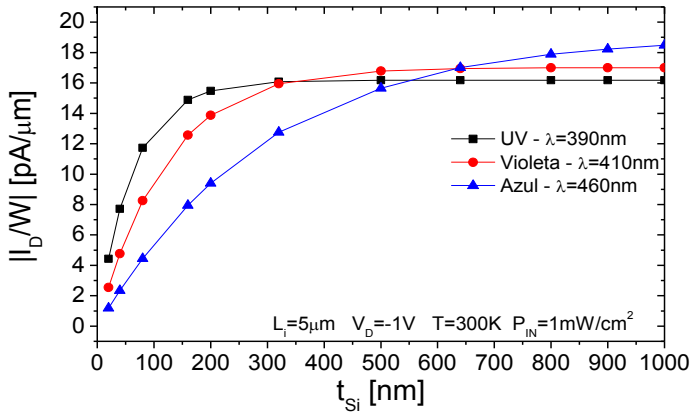


Fonte: Autor

Isso é notado quando se observa o comportamento da curva com comprimento de onda de 390 nm, que em espessuras de filme de silício de 40 nm, 80 nm, 160 nm e 200 nm representam respectivamente 55,4 %, 79,7 %, 97,7 % e 100 % da corrente total, ou seja, a energia do fóton incidente contribui significativamente para a geração e absorção de pares elétron-lacuna e para a corrente total, atingindo o máximo no comprimento de onda crítico (λ_c).

A Figura 41 mostra a corrente total absoluta normalizada, ($|I_D / W|$) simulada sob iluminação UV, violeta e azul, em função da espessura do filme de silício. A partir desses resultados, pode-se notar que camadas mais finas de silício já atingem a corrente máxima para comprimentos de onda mais curtos. Por exemplo, para absorção de UV, camadas de silício mais espessas que 300 nm não contribuem para a fotogeração. Para a luz violeta, o nível máximo de corrente é atingido para t_{Si}=500 nm, enquanto a luz azul mostrou ser absorvida mesmo acima de 1 µm. Acima desses valores, o aumento do silício não implica um aumento significativo na corrente total.

Figura 41 - Módulo da corrente total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função da espessura de filme de silício (t_{Si}) para comprimentos de ondas UV, violeta e azul.



Fonte: Autor

4.2.7 Análise dos efeitos com a variação de temperatura

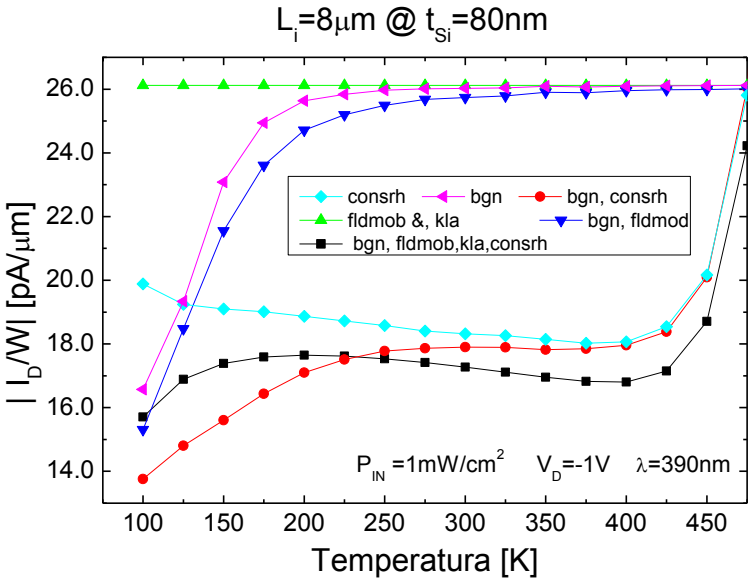
Partindo dos conjuntos de modelos estudados apresentados na Tabela 2 avalia-se o comportamento de cada um dos fenômenos físicos na tendência das curvas da corrente fotogerada em função da temperatura. O dispositivo analisado é um diodo PIN com comprimento de região intrínseca L_i=8um e espessura da camada de silício t_{Si}=80 nm. Os demais parâmetros tecnológicos foram mantidos iguais aos das demais simulações, sumarizados na Tabela 1.

A Figura 42 apresenta a corrente total normalizada($|I_D/W|$) simulada em função da temperatura para um comprimento de onda de 390 nm (UV) com potência óptica incidente P_{IN} de 1 mW/cm^2, e mantendo-se a tensão reversa do diodo V_D em -1 V. Nota-se que para os conjuntos que usam o modelo que considera o estreitamento da banda proibida (bgn), a corrente total (I_D) do fotodiodo será reduzida em temperaturas abaixo de 275 K.

Ao adicionar o modelo de mobilidade dependente da concentração e da temperatura (kla) nota-se a influência do aumento da mobilidade em baixas temperaturas e a redução em

altas temperaturas de modo que contribuirá para um aumento da corrente total (I_D) em temperaturas mais baixas e uma redução em temperaturas mais altas.

Figura 42 - Módulo da corrente total normalizada ($|I_D/W|$) simulada em função da temperatura (T) considerando λ=390 nm e P_{IN}=1 mW/cm^2 para os seis conjuntos.



Fonte: Autor

A inclusão do efeito do tempo de vida dependente da concentração de portadores (consrh) para recombinação leva em consideração o aumento da concentração de portadores fotogerados e com o aumento da temperatura o aumento da concentração de portadores gerados por vibrações. Como há uma dependência do tempo de vida com aumento da concentração de portadores que facilitará a recombinação e portanto ocorrerá uma redução na corrente total (I_D) do dispositivo até 400 K. Acima de 425 K, o aumento da temperatura proporciona que um aumento significativo na concentração de portadores sejam adicionados por vibrações, apesar da recombinação ocorrer, um maior número de portadores chegarão até a região de difusão o que aumentará a corrente total (I_D) do fotodiodo.

Considerar a degradação da mobilidade devido ao efeito do campo elétrico lateral (fldmob) é importante para avaliar os efeitos na mobilidade dos portadores minoritários fotogerados. Aplica-se no dispositivo uma variação de -0,25 V a -1,50 V e nota-se pouca variação na corrente total I_D conforme descrito em 4.2.3. A tensão reversa aplicada no dispositivo de V_D = -1 V é considerada de baixo campo elétrico, nota-se pouco efeito com as variações de temperatura. Quando o efeito do campo elétrico (fldmob) é combinado com o efeito do estreitamento de banda proibida (bgn), nota-se uma ligeira redução da corrente total

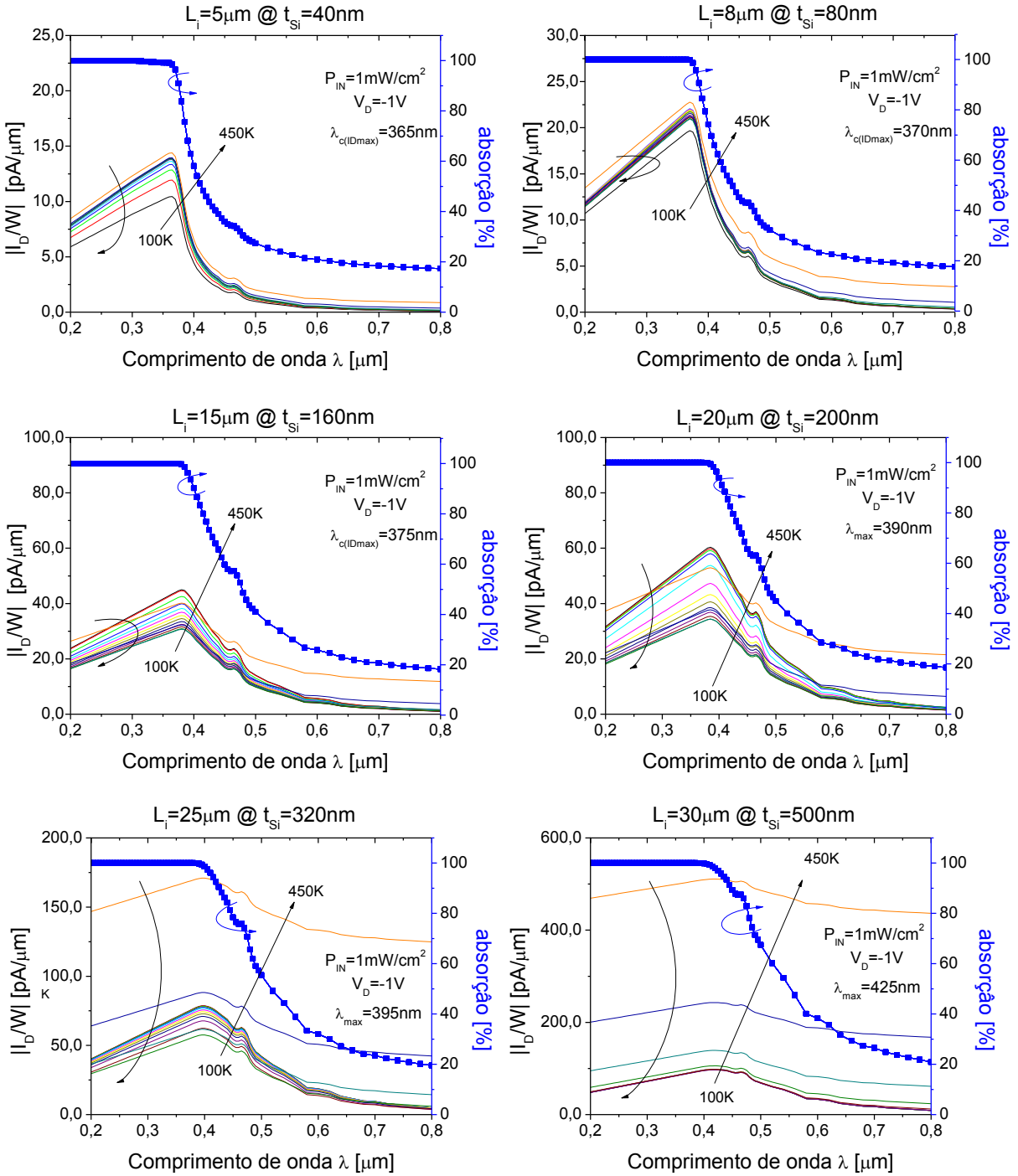
(I_D) em toda a faixa de temperatura, no entanto há uma predominância do efeito de bgn sobre fldmob.

Para os efeitos de bgn e consrh quando combinados, nota-se uma redução da corrente total (I_D) proporcionado pelo efeito do estreitamento de faixa proibida em temperatura até 250K, com o aumento da temperatura até 400 K, o efeito do estreitamento de faixa proibida e o tempo de vida dependente da concentração de portadores se complementam o que favorece pouca variação da corrente total (I_D).

Os efeitos dos modelos combinados (bgn, kls, consrh e fldmob), conforme avaliado em 4.2.1, apresenta uma corrente total (I_D) com aumento suave em temperaturas menores que 200 K devido ao efeito de ionização incompleta de portadores aliados aos modelos de estreitamento de faixa e de campo elétrico contribuem para o aumento da corrente total (I_D). Entre 225 K e 400 K o modelo dependente da concentração que aumenta a recombinação contribuem para a redução da corrente, o resultado apresentado é uma curva ligeiramente suave da corrente total (I_D) nessa faixa. A partir de 425 K o aumento significativo da concentração de portadores devido as vibrações aumentam a corrente total (I_D) consideravelmente.

A Figura 43 apresenta o módulo da corrente total I_D e da absorção para diferentes dispositivos com comprimentos de região intrínseca (L_i) e espessuras de camada de silício (t_{Si}) para uma faixa de temperatura de 100 K a 450 K, intensidade de potência luminosa em 1 mW/cm^2, tensão de polarização V_D=-1V, é possível notar a influência da variação da temperatura nos dispositivos simulados. Avalia-se que dispositivos com espessuras de camada de silício de 40 nm e 80 nm possuem menor influência da variação de temperatura quando comparado aos dispositivos de camada de silício mais espessas de 200 e 500nm. Nota-se também que o comprimento de onda crítico (λ_c) não sofre influência com as variações de temperatura.

Figura 43 - Módulo da corrente total e da absorção para diferentes dispositivos com comprimentos intrínsecos (L_i) e espessuras de silício (t_{Si}) para uma faixa de temperatura de 100K a 450K.



Fonte: Autor

É possível notar o aumento da corrente total do fotodiodo (I_D) com o aumento da temperatura, isso ocorre devido principalmente a dois fatores. O primeiro se deve ao fato de que o aumento da temperatura causará um aumento de portadores minoritários que se recombinarão com os pares elétron-lacuna fotogerados. O segundo ocorre devido a degradação

da mobilidade em temperaturas mais altas, o que facilitará a captação de pares elétron-lacuna na região de difusão.

Em dispositivos com espessuras de camada de silício (t_{Si}) mais finas (40 nm e 80 nm) nota-se um aumento da corrente total no fotodiodo (I_D) em torno de 50 % para variações de temperatura entre 100 e 450 K. Em dispositivos com espessuras de camada de silício (t_{Si}) mais espessas (200 nm e 500 nm) nota-se um aumento da corrente total no fotodiodo (I_D) de 4 a 6 vezes para a mesma faixa de variação de temperatura quando comparado com o mesmo dispositivo (L_i = 30 μm e t_{Si} = 500nm).

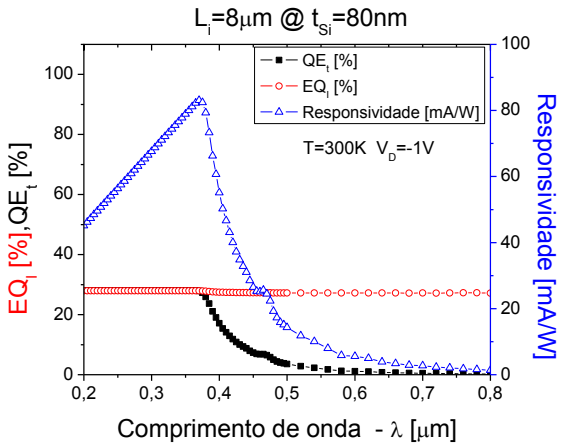
Não foram observadas alterações na absorção dos dispositivos simulados dentro da faixa de temperatura de 100 K a 450 K e na faixa de comprimento de onda de 200 nm e 800 nm, assim seguem as mesmas características das curvas apresentadas em 4.2.2 (Figura 30).

4.2.8 Análise da Eficiência Quântica Espectral

Conhecidas as principais propriedades físicas de um fotodiodo PIN e seu comportamento quando submetido a uma tensão reversa é possível avaliar a figura de mérito dos fotossensores. A Figura 44 ilustra a eficiência quântica total (QE_t), eficiência quântica interna (EQ_I) e a responsividade em função do comprimento de onda para um fotodiodo com L_i=8 μm e t_{Si}=80 nm para uma temperatura de 300 K e uma tensão V_D=-1 V características fundamentais para a análise de desempenho de um fotodiodo.

É possível notar que a eficiência quântica interna leva em consideração apenas as perdas por recombinação e por isso permanece (EQ_I) constante e igual a 1. Já a eficiência quântica total (QE_t), está limitada a área fotossensível, à parte da potência incidente óptica que será absorvida pelo fotodiodo, da profundidade do semicondutor e do comprimento de onda da luz incidente conforme descrito em 3.6.3. A responsividade tem relação direta com a fotocorrente já que a potência óptica incidente é a mesma ao longo do comprimento de onda conforme descrito em 3.6.4

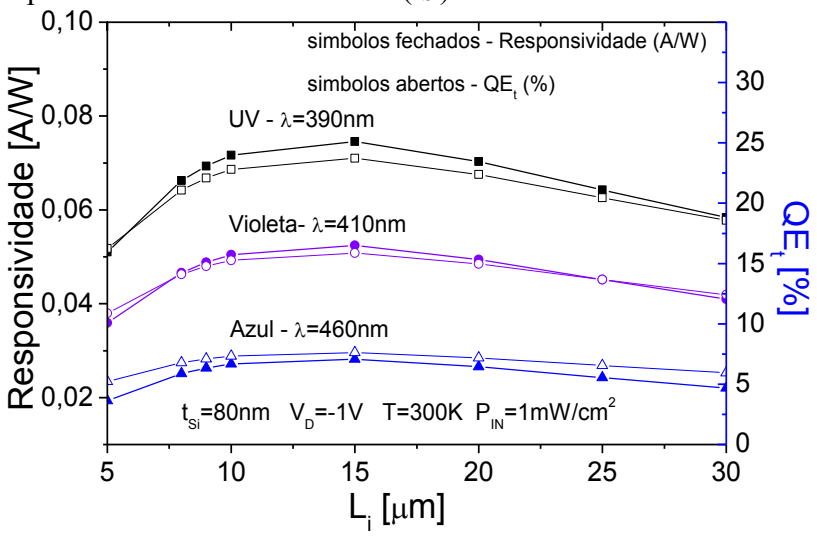
Figura 44 - Análise de eficiência espectral em função do comprimento de onda (λ).



Fonte: Autor

A responsividade e a eficiência quântica total são apresentadas em função do comprimento de região intrínseca na Figura 45 para todos os fotodiodos simulados. É possível perceber que o ponto de máxima responsividade e eficiência quântica permanece o mesmo para qualquer comprimento de onda e está em torno de 13,6 μm, indicando um possível comprimento de região intrínseca ideal para o simulado conjunto de parâmetros tecnológicos. Pode-se concluir a partir deste gráfico é que o aumento da área causa um aumento da corrente, mas que esta relação não é linear, por causa do aumento do caminho que deve ser percorrido pelo portador.

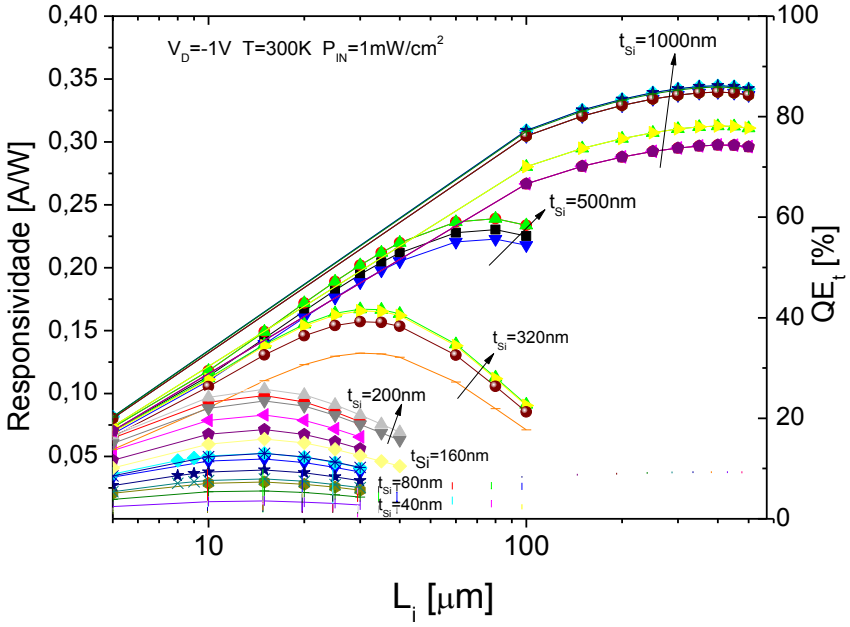
Figura 45 - Eficiência quântica total em função do comprimento de região intrínseca (L_i) e da espessura da camada de silício (t_{Si}).



Fonte: Autor

A Figura 46 apresenta a responsividade em função do comprimento de região intrínseca entre 5 μm e 500 μm, para uma faixa de espessura de filme de silício entre 80 nm e 1000 nm, simulados com comprimentos de onda UV, violeta e azul. É possível notar a importância da análise da interdependência entre L_i e t_{Si} para a máxima eficiência espectral do dispositivo.

Figura 46 - Responsividade e eficiência quântica externa em função do comprimento de região intrínseca para espessuras de filme de silício entre 80 nm e 1000 nm quando iluminados com UV, violeta e azul.



Fonte: Autor

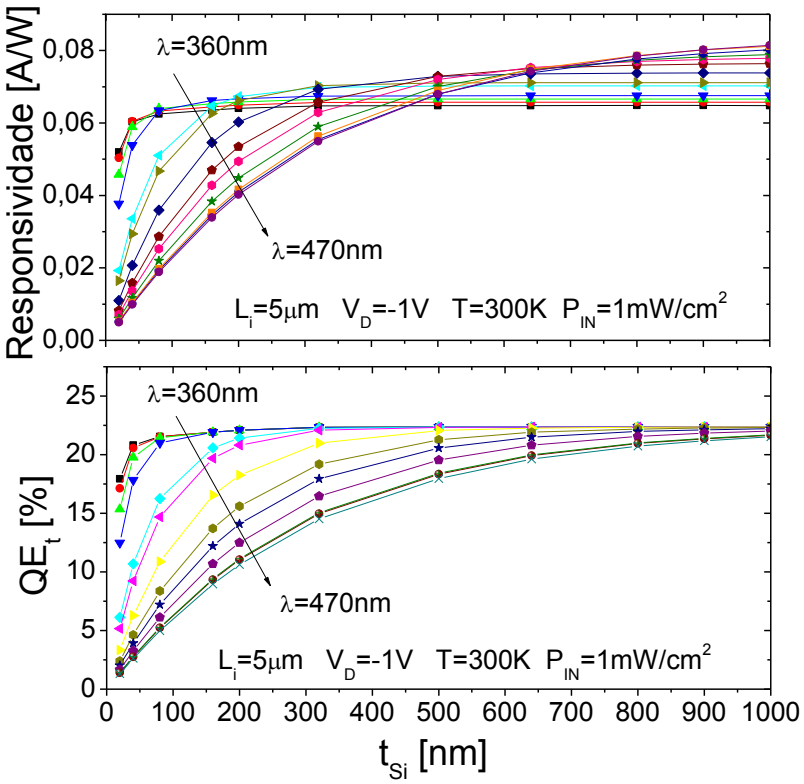
Como mencionado anteriormente é possível notar a partir dos resultados obtidos que há comprimentos de região intrínseca de 13,6 μm, 14,3 μm, 80 μm e 400 μm que indicam responsividades máximas de 52 mA/W , 103 mA/W, 239 mA/W e 344 mA/W com eficiências quânticas totais máximas de 14 %, 25 %, 59 % e 86 % para espessuras de filme de silício 80 nm, 200 nm, 500 nm e 1000 nm respectivamente, quando iluminados com UV , violeta e azul.

A responsividade e a eficiência quântica total em função da espessura do filme de silício são mostradas na Figura 47. Pode-se notar que a responsividade varia entre 62 mA/W, alcançada em comprimentos de onda mais curtos, e 80 mA/W em comprimentos de onda mais longos, mostrando que há uma contribuição para o aumento da responsividade com o aumento da espessura do filme de silício.

A eficiência quântica máxima alcançada para um dispositivo com L_i=5 μm é em torno de 21 %, para comprimentos de onda UV e espessuras de filme de silício fino a eficiência

máxima é alcançada nos primeiros 100 nm de silício. Para comprimento de onda de 470 nm, o foi observado 20 % em t_{Si} com 1 μm.

Figura 47 - Responsividade e eficiência quântica total em função da espessura de filme de silício para uma faixa de comprimentos de ondas entre 360 nm e 470 nm.



Fonte: Autor

Os resultados apresentados de eficiência quântica e de responsividade das simulações se mostraram bem próximos dos apresentados em outras tecnologias conforme descrito em 3.6.6.

5. ANÁLISE EXPERIMENTAL

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES LUMINOSAS

Na etapa de caracterização elétrica dos fotodiodos, serão utilizados diferentes LEDs como fonte luminosa, com emissão de comprimentos de ondas dentro da faixa do UV e o azul. Com o objetivo de quantificar a potência óptica incidente (P_{IN}), foram realizadas medidas em função da distância (d) e do comprimento de onda (λ), utilizando o espectrômetro USB650 e uma câmara escura para ajuste de distância entre 20mm e 160mm.

5.1.1 Características dos LEDs

Os seis LEDs são identificados pelos seguintes modelos:

- LED1: 1_XLM2BB20SD-A;
- LED2: 2_XLCB12WD;
- LED3: 3_KTL050WC;
- LED4: 4_KTL050BXCI;
- LED5: 5_KTL05UVCI-1;
- LED6: 6_XLVS12W (V3).

A Tabela 4 apresenta um resumo das especificações dos LEDs.

Tabela 4 - Resumo das especificações dos LEDs

Característica	Unidade	LED1	LED2	LED3	LED4	LED5	LED6
Resistor	ohm	82	75	100	100	56	56
Corrente direta (I_F)	mA	21,95	20,00	20,00	20,00	21,43	21,43
Comprimento de onda (λ)	nm	458	468	470	468	400	400
VF min	V	3,2	3,5	3	3	3,8	3,8
VF max	V	3,7	4	3,6	3,6	4,5	4,2
Intensidade luminosa (min)	mcd	480	900	3000	5000	60	36
Intensidade luminosa (máx)	mcd	1095	2190	4000	7000	100	155
Ângulo mínimo	graus	30					
Angulo máximo	graus	90	16	25	25	30	20

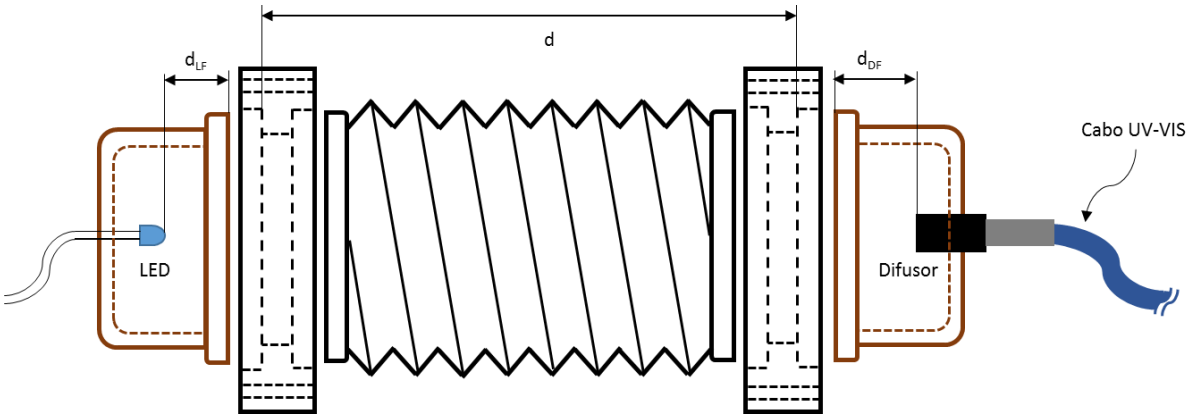
Fonte: Autor

5.1.2 Aparato Experimental

A Figura 48 ilustra a câmera escura usada para variar a distância (d) entre a fonte luminosa dos LEDs e o difusor do espectrômetro. Dessa forma o processo de caracterização fica isento de fontes luminosas externas que possam causar interferências nas medidas.

A medida da potência incidente total leva em consideração o somatório de todas as potências incidentes de todos os comprimentos de onda.

Figura 48 - Câmera escura para caracterização da fonte luminosa



Fonte: Autor

A Tabela 5 apresenta as medidas das distâncias entre o LED e a face do dispositivo (d_{LF}) e entre o difusor e a face do dispositivo (d_{DF}). A distância (d) usada na obtenção das medidas experimentais levam em consideração a distância LED+difusor ($d_{LD}=d_{LF}+d_{DF}$) para cada LED ensaiado.

Tabela 5 - Parâmetros para a correção das medidas de distância entre a fonte luminosa e o difusor.

Fonte Luminosa	Distância LED-face	Distância difusor-face	Distância LED+difusor
	(d_{LF})	(d_{DF})	(d_{LD})
	[mm]	[mm]	[mm]
LED1	16,1	22,6	38,7
LED2	14,1	22,6	36,7
LED3	14,6	22,6	37,2
LED4	12,7	22,6	35,3
LED5	14,4	22,6	37,0
LED6	14,1	22,6	36,7

Fonte:Autor

Dentro da câmera escura a luz emitida por cada LED é coletada por um difusor, que transporta a informação através de um cabo de fibra ótica que uma extremidade da câmera escura ao espectrômetro USB650 da Open Optics. Um computador com o software Spectrasuite é utilizado para visualizar os resultados. O computador coleta em tempo real as medidas de potência de incidência óptica absoluta ($\mu W/cm^2/nm$) em função do comprimento de onda (λ) e a potência óptica incidente por área (W/m^2) em função do comprimento de onda (λ). Também geram arquivos de dados para as respectivas medidas.

Para se obter dados confiáveis é necessário a calibração prévia do espectrômetro RED TIDE USB650 Open Optics, descritas no manual do equipamento.

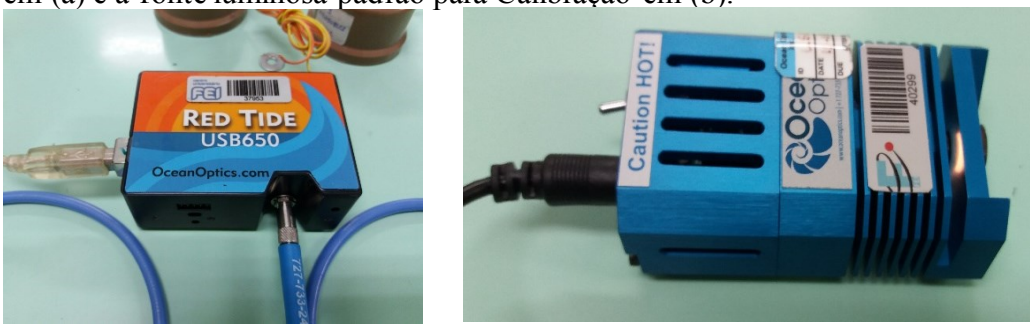
O dispositivo de medida consiste nos LEDs montados em tampos de PVC com resistores e cabos, conforme apresentado na Figura 49. Também são necessários uma fonte de alimentação de 5V, o Espectrômetro com cabo de fibra ótica e difusor, um calibrador, cuja fotografia é apresentada na

Figura 50. Uma fotografia da câmara escura com suportes nas extremidades para ajuste da distância entre a fonte luminosa e o medidor (espectrômetro) é apresentado na Figura 51.

Figura 49 – Exemplo de montagem dos LEDs em tampos de PVC com resistores e cabos para a caracterização das fontes luminosas.

Fonte: Autor

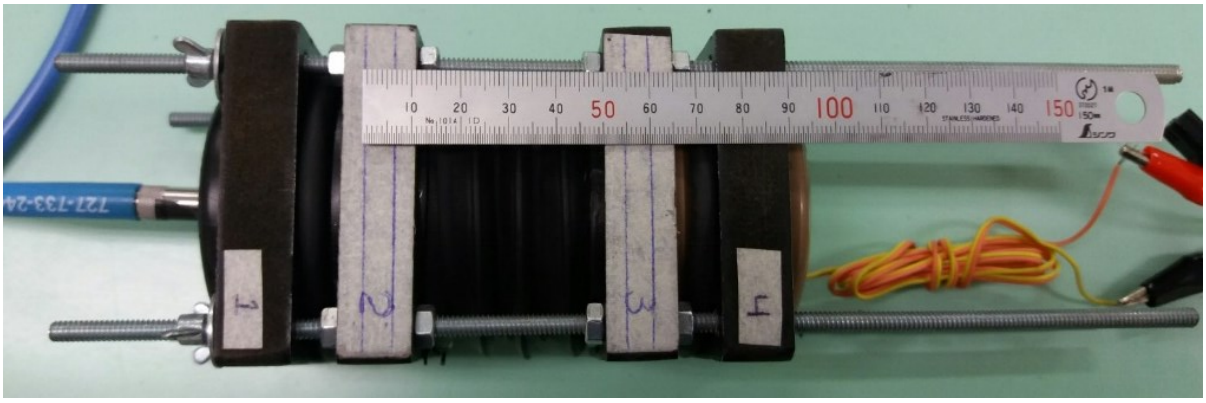
Figura 50 - Espectrômetro RED TIDE USB650 Open Optics com cabo de USB e Fibra óptica em (a) e a fonte luminosa padrão para Calibração em (b).



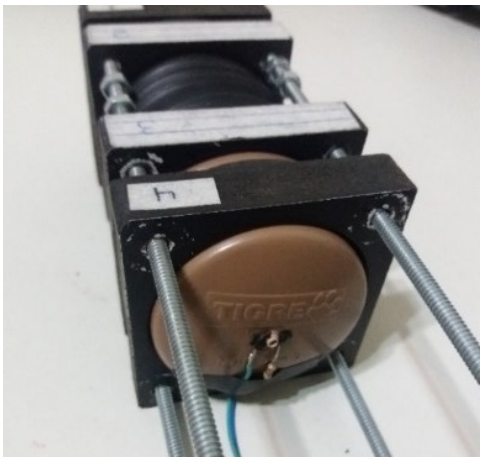
(a) (b)

Fonte: Autor

Figura 51 - Câmera escura para caracterização das fontes luminosas a, b e c.



(a)



(b) (c)

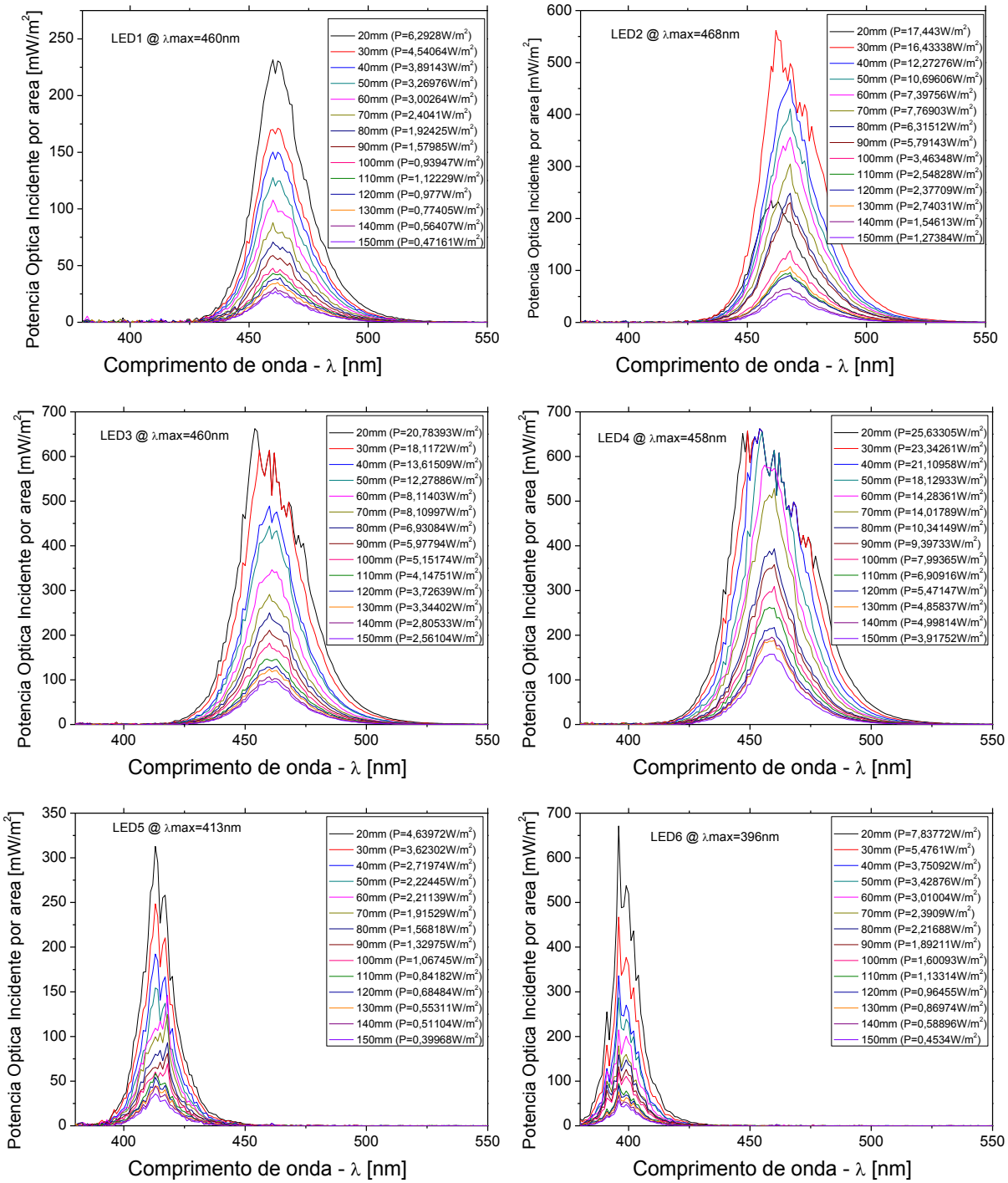
Fonte: Autor

5.1.3 Potência Óptica Incidente

Utilizando o aparato experimental montado foi possível obter os resultados da potência óptica absoluta e a potência ótica incidente por área, para cada um dos LEDs que serão utilizados como fonte luminosa na caracterização elétrica dos fotodiodos PIN SOI experimentais.

A Figura 52 apresenta a potência óptica incidente por unidade de área de cada fonte luminosa, medida para as diferentes distâncias. Os resultados permitem notar um pico de potência no comprimento para um determinado comprimento de onda, que se mantém o mesmo ao longo das diferentes distancias medidas e é predominante em cada LED e identificado em cada gráfico. Além disso, os gráficos mostram que o aumento da distância causa uma redução na intensidade de potência incidente medida.

Figura 52 - Resultados experimentais da Potência Óptica Incidente por área (W/m^2).



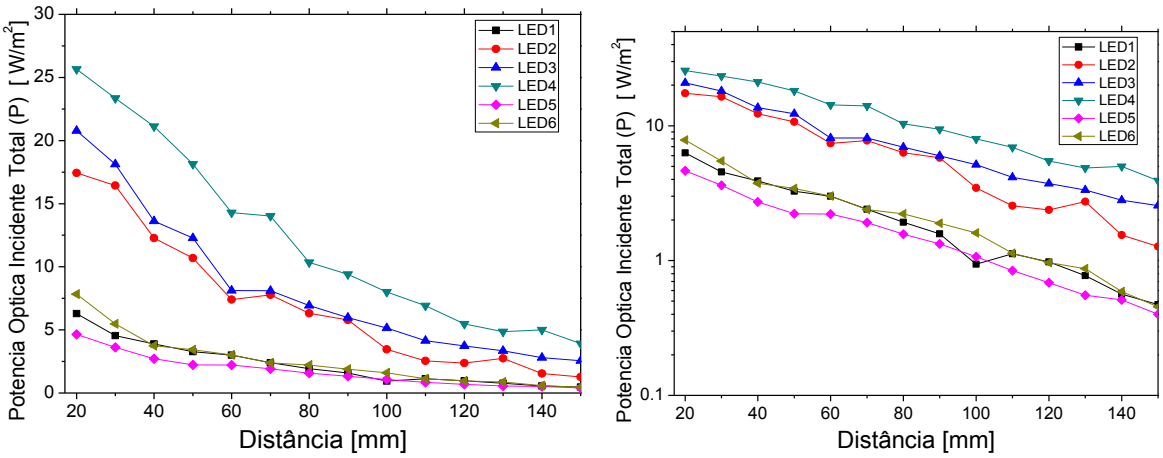
Fonte: Autor

Os valores de potência óptica incidente por área obtidas no experimento tiveram suas intensidades máximas entre 250 e 700mW/m^2 o que torna possível estabelecer uma relação de grandeza/equivalência com intensidade luminosa descrita nas especificações dos LEDs. Os LEDs com maior intensidade luminosa como os LED4, LED3 e LED2 com 7000 mcd, 4000

mcd e 2190 mcd apresentaram potência óptica incidente Total (P) com 25,63 W/m^2, 20,78 W/m^2 e 17,44 W/m^2, respectivamente.

A partir da integral destas curvas, é possível determinar potência óptica incidente Total (P), apresentado na Figura 53 que representa a variação da potência incidente total (P) em função da distância em mm.

Figura 53 - Dados experimentais da Potência óptica Incidente Total (P) em função da distância em mm.



Fonte: Autor

O gráfico mostra que a potência óptica incidente total (P) não decai de forma linear e, portanto, um gráfico na base log foi estabelecido para avaliar se o comportamento está relacionado com o quadrado da distância.

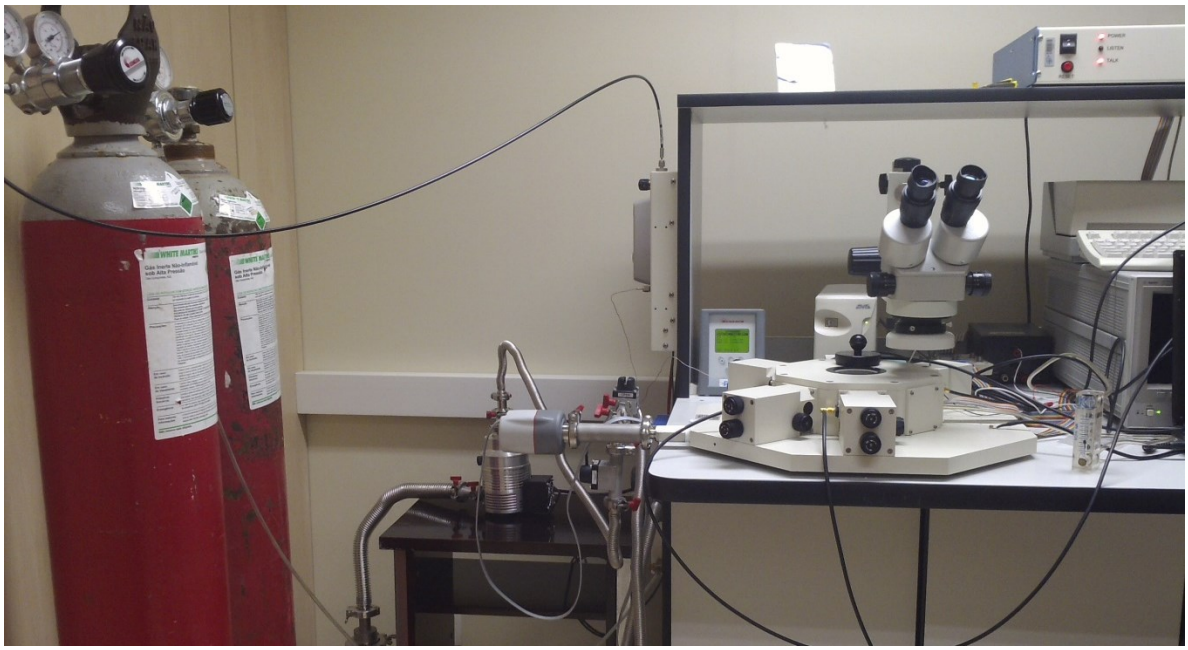
Os resultados teóricos aqui apresentados se mostraram com comportamento semelhantes no que diz respeito às tendências das curvas na redução da intensidade óptica com o aumento da distância, no entanto, mais acentuado nos LEDs de menor potência Óptica incidente total (P_{IN}), ou seja, menor intensidade luminosa se comparado com o gráfico teórico onde a partir de 110 mm os resultados se mostram mais estáveis para todos os LEDs e tendendo a intensidade luminosa a zero.

5.2 RESULTADOS DAS MEDIDAS EXPERIMENTAIS

O fotodiodo de referência da Tabela 1 foi medido no Laboratório de Microeletrônica do Centro Universitário FEI, utilizando o Analisador de Parâmetros de Semicondutores Keithley 4200 SCS. A temperatura dos dispositivos foi controlada através do equipamento *Variable Temperature Micro Probe System*, modelo K20 da MMR Technologies que apresenta controle

de temperatura com precisão de ± 0,01 K [MMR, 1995]. A Figura 54 mostra a foto dos equipamentos usados para a realização das medidas experimentais.

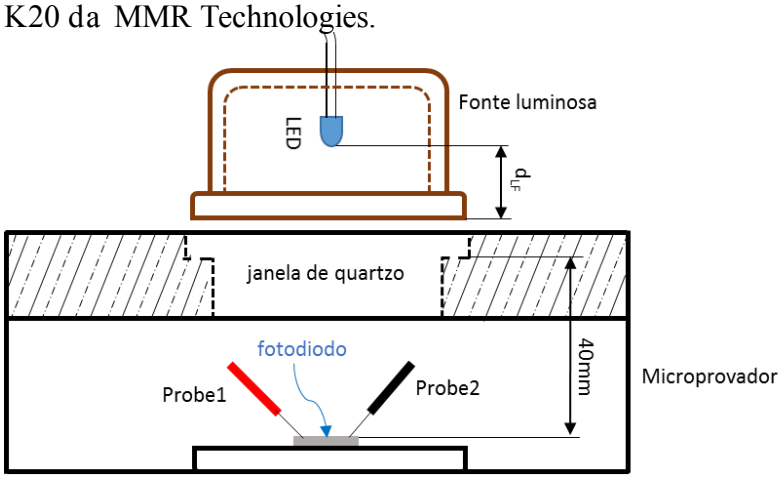
Figura 54 – Microprovador LMTP com controlador modelo K20 da MMR Technologies disponíveil na sala de caracterização do Centro Universitário FEI.



Fonte: Autor

As fontes luminosas LED UV, violeta e azul foram montadas na janela do microprovador modelo K20 da MMR Technologies e configuradas no dispositivo conforme vista lateral em corte mostrada na Figura 55 .

Figura 55 - Vista frontal em corte da montagem da fonte luminosa no microprovador modelo K20 da MMR Technologies.



Fonte: Autor

A distância (d) usada como referência para a medida da corrente total no fotodiodo (I_D) foi de 20 mm extraídas das medidas de caracterização das fontes luminosas conforme 5.1.3. Isso representa a distância entre a fonte luminosa e o fotodiodo experimentado de (d_{LF} + 40 mm) no microprovador de 58 mm ± 2 mm, distância semelhante à observada na caracterização das fontes (d_{LD} + 20 mm). Então, pode-se considerar que a intensidade luminosa obtida na caracterização das fontes luminosas é a mesma aplicada ao fotodiodo no microprovador. As perdas por reflexão e refração entre o fotodiodo e a fonte luminosa provenientes das diferenças dos índices de refração do ar, do quartzo e da camada de filme de silício do dispositivo foram desprezadas.

5.2.1 Características das Fontes luminosas

As curvas experimentais I-V levantadas com o fotodiodo, foram medidas nas condições de escuro e iluminados com os LED's, caracterizados anteriormente com três comprimentos de ondas diferentes sendo: UV próximo (396 nm), violeta (413 nm) e azul (460 nm). A intensidade de potência luminosa de cada fonte foi medida através do espectrômetro USB645 da Ocean Optics, a uma distância em torno de 58 mm ± 2 mm (esta é a distância entre a fonte de luz e o fotodiodo), conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Intensidades de Potências luminosas medidas a 58 ± 2 mm de distância.

Comprimento de onda (nm)		P_{IN}/A (mW/cm^2)	P_{IN} (W)
396	UV	0,783	$7,83 \times 10^{-6}$
413	Violeta	0,464	$4,64 \times 10^{-6}$
460	Azul	0,696	$6,29 \times 10^{-6}$

Fonte : Autor

5.2.2 Características dos Fotodiodos SOI PIN

Fotodiodos multidedos SOI PIN laterais, foram implementados seguindo o processo descrito em (DE SOUZA et al., 2010) e apresentado em 3.6.1. Os parâmetros tecnológicos e geométricos dos fotodiodos usados neste trabalho estão descritos na Tabela 7.

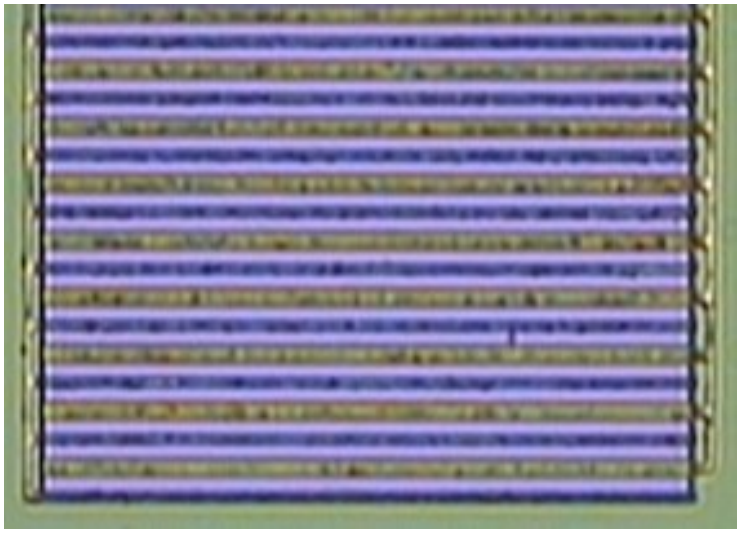
Tabela 7 - Parâmetros de diodos SOI PIN laterais.

Parâmetros	Unidade	Dimensão
Espessura de filme de silício (t_{Si})	nm	80
Espessura do Óxido enterrado (t_{BOx})	nm	390
Concentração de dopagem da região intrínseca (N_i)	cm^{-3}	1×10^{15}
P+ Concentração de dopagem da região P (N_A)	cm^{-3}	2×10^{20}
N+ Concentração de dopagem da região N (N_D)	cm^{-3}	4×10^{20}
Comprimento da região Intrínseca (L_i)	µm	9
P+ Comprimento da região P (L_P)	µm	9
N+ Comprimento da região N (L_N)	µm	9
Largura Total (W)	mm	55
Área Total	mm^2	1
Extensão da região de depleção @ V_D=0V	µm	1,1
Extensão da região de depleção @ V_D=-1,5V	µm	1,8

Fonte: Autor

A Figura 56 apresenta uma imagem microscópica de uma parte do fotodiodo PIN SOI lateral medido. Todas as amostras apresentam uma camada anti-reflexiva.

Figura 56 - Imagem microscópica de parte do fotodiodo PIN SOI lateral.



Fonte: (DE SOUZA et al., 2011)

5.2.3 Resultados Experimentais

Os fotodiodos fabricados foram medidos no Laboratório de Microeletrônica do Centro Universitário FEI, utilizando o Analisador de Parâmetros de Semicondutores Keithley 4200

SCS. A temperatura dos dispositivos foi controlada através do equipamento *Variable Temperature Micro Probe System*, modelo K20 da MMR Technologies que apresenta controle de temperatura com precisão de ± 0,01 K [MMR, 1995].

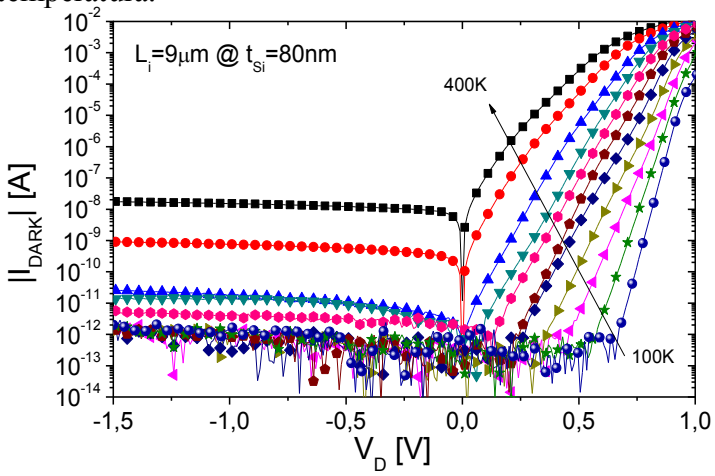
As medidas da Corrente total (I_D) no fotodiodo em função de uma tensão aplicada (V_D) representa a soma da fotocorrente (I_{FG}), devido à incidência de luz no dispositivo e a corrente de escuro (I_{DARK}), que representa a corrente na ausência de luz, devido à geração térmica conforme descrito em (42).

A Figura 57 apresenta o módulo da corrente de escuro I_{DARK} em função da tensão aplicada (V_D) entre -1,5 V e +1,0 V, para uma faixa de temperatura de 100 K a 400 K.

Para temperaturas abaixo de 300 K, a corrente de escuro diminui para valores abaixo do limite mínimo de alcance do sistema de medição. Para temperaturas acima de 300 K nota-se um aumento na corrente de escuro (I_{DARK}) em algumas ordens de magnitude devido ao aumento de elétrons provenientes de geração térmica conforme descrito em 3.6.2 e simulado em 4.2.3.

Também verificou-se, que para tensão de polarização V_D abaixo de -0,5 V, a corrente de escuro (I_{DARK}) permanece quase constante, isso significa que o campo elétrico tem pouca influência sobre a corrente de escuro conforme 4.1.2.

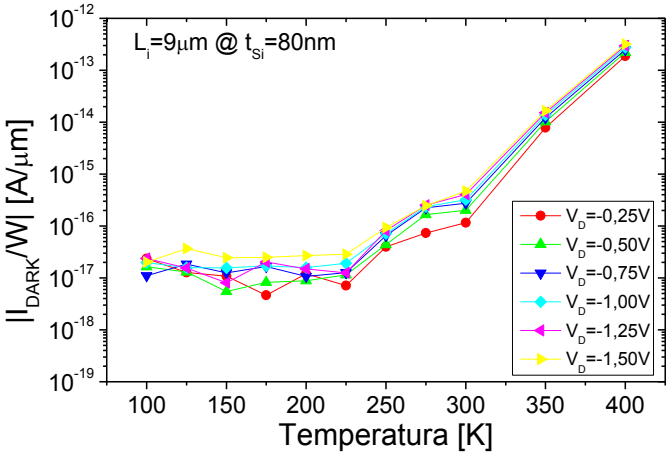
Figura 57 - Módulo da Corrente de escuro (I_{DARK}) em função da tensão no fotodiodo V_D e da temperatura.



Fonte: Autor

Na Figura 58 que apresenta o módulo da corrente de escuro por largura ($|I_{DARK}/W|$) em função da temperatura, é possível notar o aumento da corrente de escuro em algumas ordens de magnitude para temperaturas acima de 300 K e pouca variação para uma faixa de tensão entre -0,25 V e -1,5 V conforme indicado em 4.2.3. Também é possível notar que devido a ionização incompleta de portadores em temperaturas abaixo de 275 K a corrente pelo fotodiodo também é menor.

Figura 58 - Módulo da corrente de escuro normalizada pela largura em função da temperatura para tensão V_D entre -0,25 a -1,5 V.

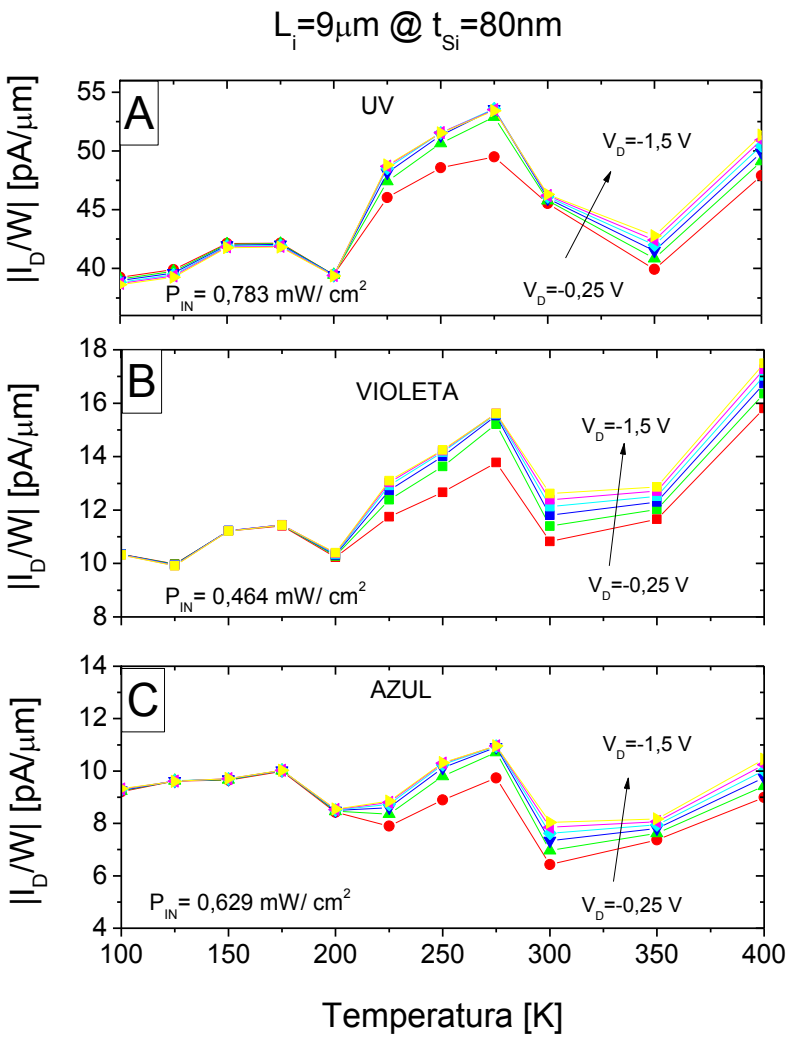


Fonte: Autor

A Figura 59 apresenta o módulo da corrente total no fotodiodo normalizada ($|I_D/W|$) em função da temperatura com iluminação UV, violeta e azul. Conforme relatado 4.2.7 e em (DE SOUZA et al., 2010), diferentes efeitos físicos ocorrem dependendo na temperatura. O primeiro, o aumento da corrente com o aumento da temperatura (devido à redução do estreitamento do *bandgap*) e depois a redução da corrente em temperaturas moderadamente altas (devido à degradação da mobilidade).

Como as fontes de luz possuem diferentes intensidades de potência, é possível notar diferentes níveis de corrente fotogerada. No entanto, embora a luz azul disponível tenha mostrado maior intensidade de energia, a fonte violeta resultou em maior corrente. Indica que a corrente fotogerada depende não apenas da intensidade da potência, mas também do comprimento de onda incidente.

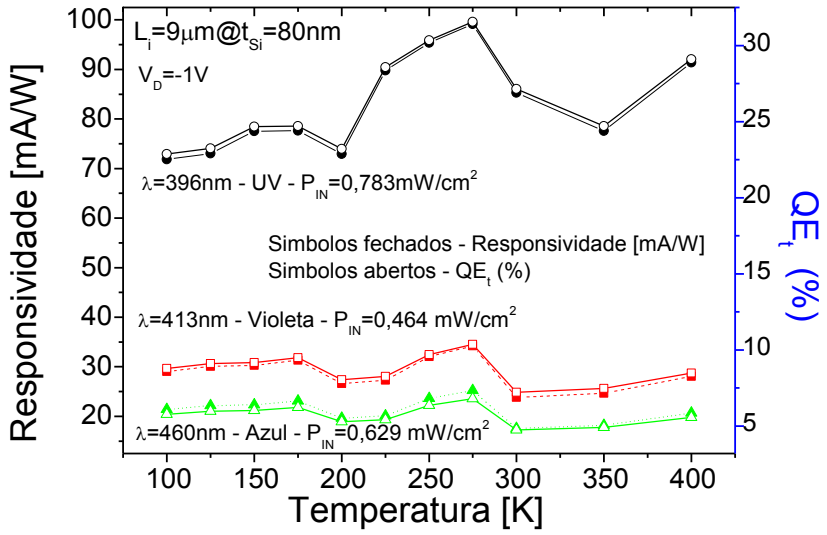
Figura 59 - Corrente total absoluta normalizada em função da temperatura para diferentes V_D e iluminada por três fontes luminosas.



Fonte: Autor

A Figura 60 apresenta a responsividade e eficiência quântica no fotodiodo quando iluminado com fontes de luz UV, violeta e azul em função da temperatura. A partir desses resultados, pode-se notar que a responsividade do fotodiodo SOI PIN estudado torna-se maior à medida que o comprimento de onda diminui. Na faixa de temperatura apresentada, sob iluminação UV a resposta média é em torno de 82 mA/W com uma variação em torno de 18 %, quando iluminado com violeta está em torno de 32 mA/W e 20 mA/W quando iluminado com fonte de luz azul. A redução da responsividade sob luz azul explica a menor corrente vista na Figura 59 (C). A eficiência quântica total tem uma resposta idêntica se comparada com a responsividade e tem uma eficiência quântica total (QE_t) em torno de 27 % quando o fotodiodo está sob luz ultravioleta e reduz quando o comprimento de onda aumenta (AFZALIAN; FLANDRE, 2005).

Figura 60 - Responsividade e eficiência quântica total do fotodiodo em função da temperatura quando iluminado com luz UV, violeta e azul.



Fonte: Autor

Os resultados de eficiência quântica e de responsividade apresentadas são considerados satisfatórios se comparado com os resultados de fotodiodos PIN em outras tecnologias conforme descrito em 3.6.6 e se comparado com os resultados obtidos das simulações em 4.2.8.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a análise das características elétricas de fotodiodos PIN laterais através de simulações numéricas bidimensionais e resultados experimentais.

Foram simulados diodos PIN com diferentes comprimentos de região intrínseca (L_i entre 5 e 30 μm) e espessuras de camada de silício (t_{Si} de 40 a 500 nm). Foram utilizadas concentrações de dopantes de $2x10^{20}$ cm^{-3} para a região P, $4x10^{20}$ cm^{-3} para a região N, e a região intrínseca foi mantida com a concentração natural da lâmina, de $1x10^{15}$ cm^{-3} do tipo P,e espessura da camada de óxido enterrado foi de 390 nm.

As simulações foram realizadas inicialmente em uma faixa de comprimento de onda (λ) entre 0,2 e 1,2 μm, com o intuito de observar a resposta de absorção do Silício, aplicando-se uma potência incidente de 1 mW/cm^2 com ângulo de incidência de 90 graus, para uma tensão reversa (V_D) de -1 V. A temperatura foi variada entre 100 e 450 K. Os resultados mostraram que, para as espessuras de camada de Silício (t_{Si}) simulados, a partir de comprimentos de onda (λ) de 0,7 μm a absorção era em torno de 20 %, ou seja, 80 % da energia luminosa incidente era transmitida, devido à baixa energia poucos pares elétron-lacuna são gerados e a corrente total do diodo (I_D) é baixa, o dispositivo se comportava como transparente, assim, concentramos os estudos dentro da faixa de comprimento (λ) entre 0,2 μm e 0,8 μm.

Os modelos físicos de mobilidade, recombinação e de estatísticas de portadores simulados e apresentados neste trabalho, foram os que mais se aproximaram das características dos modelos apresentados na literatura. Os modelos de mobilidade FLDMOB e KLASSEN apresentam resultados similares quando avaliados individualmente, porém, quando combinados com o modelo de recombinação CONSRH, o modelo de mobilidade KLASSEN ressalta a predominância do efeito do espalhamento da mobilidade com a variação da temperatura. Quando adicionado o modelo de estatística de portadores BGN considerando também a ionização incompleta na faixa de temperatura entre 100 K e 275 K, nota-se a predominância do estreitamento de faixa proibida que contribuem para o aumento da corrente total e uma redução da corrente total devido ao aumento da concentração que provocando aumento da recombinação. Assim o conjunto de modelos fldmob, klassen, bgn, consrh e ionização incompleta resultam em curvas similares às reportadas na literatura e foram usados na simulação e análise de todos os dispositivos.

A análise da absorção realizada no intervalo de comprimentos de onda (λ) simulados permitiu verificar que a absorção depende da espessura da camada de silício (t_{Si}) e do comprimento de onda a que está submetido. Foi visto que a máxima absorção ocorre no ponto

onde a corrente total é máxima, e esse ponto corresponde ao comprimento de onda crítico (λ_c). Isso significa que um aumento na espessura da camada de silício (t_{Si}) entre 80 nm até 1000 nm provoca um aumento linear do comprimento de onda crítico (λ_c) entre 360 nm até 470 nm. As variações do comprimento de região intrínseca (L_i) e da temperatura entre 100 K e 400 K afetam a intensidade da corrente total, no entanto, mostraram que não têm influência sobre a absorção ou seu comprimento de onda crítico (λ_c).

Foi possível notar, através análise da corrente de escuro (I_{DARK}) que devido ao aumento das vibrações dos fônons em temperaturas acima de 300 K, contribuem para a geração de pares elétron-lacuna, e a corrente de escuro aumenta de 2 a 4 ordens de magnitude. Isso reforça o uso destes dispositivos como sensores de temperatura em diversas aplicações. A variação de tensão reversa na faixa entre 0 e -1,5 V, que provoca a variação no campo elétrico lateral, pouco contribui para o aumento da corrente total no diodo. A variação do comprimento de região intrínseca (L_i) e da espessura da camada de silício (t_{Si}) não causam mudança significativa da corrente de escuro. Os resultados apresentados nas simulações quando comparados com os resultados experimentais obtidos apresentam curvas com características similares e resultados numéricos aproximados o que reforça a validação do modelo simulado usado.

Sobre a influência da intensidade de potência luminosa (P_{IN}) aplicada nos dispositivos analisados, nota-se que possuem sensibilidade de percepção de intensidade luminosa a partir de algumas dezenas de nW/cm^2, o aumento da intensidade luminosa provoca um aumento proporcional na corrente total do fotodiodo, isso é percebido tanto com o aumento do comprimento de região intrínseca bem como com o aumento da camada de espessura de silício. A sensibilidade é maior para dispositivos com maior L_i pois nestes dispositivos a área fotossensível é maior, o que proporciona maior captação de luz, aumenta a geração de pares elétron-lacuna e provoca um acréscimo de duas a três vezes na corrente total (I_D). No entanto, um aumento de L_i em excesso provoca um aumento na distância percorrida pelos pares elétron-lacuna para atingirem a região de difusão e que podem se recombinar antes que sejam coletados. A recombinação dos pares elétron-lacuna antes de serem coletados na região de difusão contribuirá para a redução da corrente total.

O aumento de t_{Si} também contribui para o aumento da corrente total, entre 2 a 6 vezes maiores, nesse caso, o comprimento de onda também deve ser avaliado, uma vez que aumentando-se o t_{Si} aumenta-se o comprimento de onda crítico (λ_c).

Foi notada uma dependência entre o L_i que define a área fotossensível e o t_{Si} que define o comprimento de onda crítico, ambos, determinam o ponto de máxima absorção de pares

elétron-lacuna gerados na área fotossensível e coletados antes de se recombinarem na região de difusão proporcionando corrente total máxima.

A responsividade e eficiência quântica total representam características de desempenho dos dispositivos analisados, apresentam curvas semelhantes, pois diferenciam-se apenas por um fator e pelo comprimento de onda a que o dispositivo está submetido, ou seja, avalia-se os efeitos combinados da corrente total, da corrente de escuro e da temperatura para cada dispositivo. Resultados de responsividade entre 62 mA/W e 80 mA/W para comprimentos de ondas de 360 nm e 470 nm respectivamente e de eficiência quântica total de entre 12 % e 21%. Observa-se que L_i em torno de 400 μm e t_{Si} com 1 μm promovem responsividade ao redor de 344 mA/W e eficiência quântica de 86 %.

Os resultados experimentais de responsividade de 73 a 98 mA/W e eficiência quântica total entre 23 a 33% apresentada neste trabalho são considerados satisfatórios quando comparados com os resultados reportados na literatura. Fotodiodos com características semelhantes reportados na literatura apresentaram responsividade entre 70 e 100 mA/W e eficiência quântica entre 45 % e 60 %.

Em resumo, foi possível notar que as mudanças na temperatura não afetam a absorção da luz. Por outro lado, comprimentos intrínsecos mais longos aumentam a área fotossensível, aumentando a fotocorrente mas por outro lado, favorecem a recombinação, o que reduz a fotocorrente e não causa alteração na absorção. O aumento de espessura de silício permite que comprimentos de onda mais longos sejam absorvidos. Foi observada uma relação linear entre o comprimento de onda crítico e a espessura do silício, o que pode ajudar a definir a melhor tecnologia para detecção de um determinado comprimento de onda. Os resultados apresentados indicam que parâmetros geométricos e tecnológicos podem ser escolhidos corretamente para determinada da aplicação.

Publicação Gerada:

Os resultados apresentados neste trabalho permitiram a publicação de um artigo no periódico *Journal of Integrated Circuits and Systems:*

Temperature, Silicon and Intrinsic Length Influence on the Operation of Lateral SOI PIN Photodiodes, Journal of Integrated Circuits and Systems, vol. 15, n. 2, pp. 1-5, 2020. DOI: https://doi.org/10.29292/jics.v15i2.158.

Uma cópia deste artigo é apresentada no Apêndice B.

7. REFERÊNCIAS

ABDALLAH, W.; KRICHEN, D.; BOUDRIGA, N. An optical backhaul solution for LiFi-based access networks. **Optics Communications**, v. 454, n. August 2019, p. 124473, 2020.

AFZALIAN, A. **Optical Detectors in SOI CMOS Technologies for Blue DVD and Short Distance Optical Communication**. [s.l.] UCL, 2006.

AFZALIAN, A.; FLANDRE, D. Measurements, modelling and electrical simulations of lateral PIN photodiodes in thin film-SOI for high quantum efficiency and high selectivity in the UV range. **European Solid-State Device Research Conference**, p. 55–58, 2003.

BENEDETTO, L. DI; LICCIARDO, G. D.; RUBINO, A. Experimental Results on Lateral4H-SiC UV Photodiodes. p. 252–254, [s.d.].

BULTEEL, O. **Silicon-on-Insulator Optoelectronic Components for Micropower Solar Energy Harvesting and Bio-Environmental Instrumentation**. [s.l.] UCL, 2011.

BULTEEL, O.; AFZALIAN, A.; FLANDRE, D. Fully integrated blue/UV SOI CMOS photosensor for biomedical and environmental applications. **Analog Integrated Circuits and Signal Processing**, v. 65, n. 3, p. 399–405, 2010.

CHEN, Q. et al. Low-Power , High-Sensitivity Temperature Sensor Based on Ultrathin SOI Lateral p-i-n Gated Diode. v. 7, n. 2019, p. 1–7, 2019.

COLINGE, J.-P. **Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI**. 3rd. ed. New York: Springer Science+Business Media, 2004.

COLINGE, J. P. p-i-n Photodiodes Made in Laser-Recrystallized Silicon-on-Insulator. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 33, n. 2, p. 203–205, 1986.

COLINGE, J. P. **Physics of Semiconductor Devices**. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2002.

CONG, H. et al. Research of high performance GeSn/Ge heterostructure photodiodes. **2015 Optoelectronics Global Conference, OGC 2015**, p. 3–4, 2015.

CRISTOLOVEANU, S.; LI, S. S. **Electrical Characterization of Silicon-on-Insulator Materials and Devices**. 1st. ed. New York: Springer Science+Business Media, 1995.

DAVID HALLIDAY, ROBERT RESNICK, AND J. W. **Fundalmentals of Physics**. 10th. ed. Cleveland: John Wiley & Sons, Inc, 2014.

DE SOUZA, M. et al. Thin-film lateral SOI pin diodes for thermal sensing reaching the cryogenic regime. **Journal of Integrated Circuits and Systems**, v. 5, n. 2, p. 160–167, 2010.

DE 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, 2011.

DEEN, S. K. AND M. J. **Fiber Optic Communications: Fundamentals and Applications**. 1st. ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.

FADHALI, M. M. A. Photonics and Nanotechnology. **Procedings of the International Workshop and Conference on ICPN 2007**, v. 3, n. September, 2008.

GRUNDMANN, M. **The Physics of Semiconductors**. Berlin: Springer, 2006. v. 13

GUTIERREZ, E.; DEEN, M. J.; CLAEYS, C. L. **Low Temperature Electronics**. 1st. ed. San Diego: Academic Press, 2001.

HAGIWARA, Y. Simulation and Device Characterization of the P+PN+P Junction Type Pinned Photodiode and Schottky Barrier Photodiode. **4th Electron Devices Technology and Manufacturing Conference, EDTM 2020 - Proceedings**, p. 16–19, 2020.

LI, G. et al. Multiple-Wavelength Detection in SOI Lateral PIN Diodes with Backside Reflectors. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 9, p. 7368–7376, 2017.

NOVO, C. et al. Illuminated to dark ratio improvement in lateral SOI PIN photodiodes at high temperatures. **Semiconductor Science and Technology**, v. 29, n. 7, 2014.

RODRIGUES, E. J.; DE SOUZA, M. Temperature, silicon thickness and intrinsic length influence on the operation of lateral soi pin photodiodes. **Journal of Integrated Circuits and Systems**, v. 15, n. 2, p. 1–5, 2020.

RUDAN, M. **Physics of Semiconductor Devices**. 1st. ed. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer Science+Business Media, 2015. v. 53

SHAMSURI, M. M. S. et al. Vitality of plants to live in the indoor environment. **AIP Conference Proceedings**, v. 1885, 2017.

SILVA, F.; DORIA, R.; DE SOUZA, M. **Influence of the intrinsic length on the behavior of PIN diodes fabricated on SOI substrates working as solar cells**. 33rd Symposium on Microelectronics Technology and Devices, SBMicro 2018. **Anais**...2018

SOFTWARE, D. S. **ATLAS User ' s Manual**. 5.24.1.R ed. Santa Clara: Silvaco, 2017. v. II

STENZEL, O. **The physics of Thin Film Optical Spectra**. 2nd. ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. v. 53

STENZEL, O.; OHLIDAL, M. **Optical Characterization of Thin Solid Films**. 1st. ed. Cham: Springer International Publishing, 2018. v. 64

STREETMAN, B. G.; SANJAY, •; BANERJEE, K. **Solid State Electronic Devices**. 7th. ed. Texas: Pearson Education, 2015.

SZE, S. M. **Physics of Semiconductor Devices**. 2nd. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 1981.

SZE, S. M.; NG, K. K. **Physics of Semiconductor Devices**. 3rd. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007. v. 1

TSIVIDIS, Y.; MCANDREW, C. **Operation and Modeling of the MOS Transistor**. 2nd. ed. New York: OXFORD UNIVERSITY, 2011.

YACOBI, B. G. **Semiconductor Materials**. 1st. ed. New York: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2004.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **University Physics with modern Physics**. 13th. ed. San Francisco: Pearson Education, Inc, 2012.

ZAINUDIN, Z. et al. Simulation of electrical characterization on lateral silicon-on-insulator PIN diode for space radiation detector. **Proceedings - 5th International Conference on Computer and Communication Engineering: Emerging Technologies via Comp-Unication Convergence, ICCCE 2014**, p. 265–268, 2015.

ZIMMERMANN, H. et al. Large-area lateral P-I-N photodiode on SOI. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 49, n. 2, p. 334–336, 2002.

ZIMMERMANN, H. et al. Blue-enhanced PIN finger photodiodes in a 0.35-µm SiGe BiCMOS technology. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 21, n. 22, p. 1656–1658, 2009.

ZIMMERMANN, H. K. **Integrated Silicon Optoelectronics**. 2nd. ed. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2010.

APÊNDICE A – Simulação de curva de corrente de um diodo PIN SOI lateral

Exemplo de arquivo de simulação Atlas de um diodo PIN com L_i=9 μm e T=500 K.

```
#################################################################
# Arquivo PIN:PDLi9t80W02_12P1V01T100_500M6.in
# Simulacao de um Diodo PIN Li=9um
# Espessura da camada de silicio: tSi=80 nm
# Espessura do oxido enterrado: toxb=390 nm
# Comprimento dos lados P e N:9um
# Potencia Incidente=1mW
# VD=-1 V
# temperatura=100 a 500K
# Comprimento de onda de 0.2 a 1.2um
# modelos kla bgn consrh fldmob print temp
#################################################################################
go atlas
TITLE PIN Diode - Teste 1
################################
# Especifying the initial mesh #
################################
mesh space.mult=1.0
#
x.mesh loc=0 spac=0.5
x.mesh loc=3 spac=0.1
x.mesh loc=6 spac=0.05
x.mesh loc=8 spac=0.02
x.mesh loc=9 spac=0.01
x.mesh loc=10 spac=0.02
x.mesh loc=11 spac=0.05
x.mesh loc=13.5 spac=0.1
x.mesh loc=16 spac=0.05
x.mesh loc=17 spac=0.02
x.mesh loc=18 spac=0.01
x.mesh loc=19 spac=0.02
x.mesh loc=21 spac=0.05
x.mesh loc=24 spac=0.1
x.mesh loc=27 spac=0.5
#
y.mesh loc=0 spac=0.0008
y.mesh loc=0.008 spac=0.0008
y.mesh loc=0.024 spac=0.008
y.mesh loc=0.04 spac=0.01
y.mesh loc=0.08 spac=0.01
y.mesh loc=0.088 spac=0.04
y.mesh loc=0.39 spac=0.1
y.mesh loc=0.423 spac=0.2
y.mesh loc=0.47 spac=0.5
#
```

```
eliminate columns y.min=0.096 y.max=0.47
eliminate columns y.min=0.096 y.max=0.47
eliminate columns y.min=0.096 y.max=0.47
eliminate columns y.min=0.096 y.max=0.47
#
 region   num=1 y.min=0 y.max=0.08 silicon
 region   num=2 y.min=0.08 oxide
#
#**************** DEFINE THE ELECTRODES ****************
electrode  name=anode x.min=3 x.max=6 y.max=0
electrode  name=cathode x.min=21 x.max=24 y.max=0
electrode name=substrate bottom
#
#*********** DEFINING THE DOPING CONCENTRATIONS ********
doping    uniform conc=1E+20 p.type reg=1 x.l=0 x.r=9
doping    uniform conc=1000000000000000 p.type reg=1 x.l=9 x.r=18
doping    uniform conc=4E+20 n.type reg=1 x.l=18 x.r=27
#
save outf=PhotodetectorLi9t80W02_12P1M6.str
tonyplot PhotodetectorLi9t80W02_12P1M6.str
#
# SET INTERFACE CHARGE SEPARATELY ON FRONT AND BACK OXIDE INTERFACES
interf    qf=5e10 y.max=0.1
interf    qf=5e10 y.min=0.1
beam num=1 x.origin=13.5 y.origin=-50000 angle=90 wavelength=0.2
#
# SET WORKFUNCTION OF GATE
contact   name=substrate workfunc=4.95
output minset
#
# SPECIFYING PHYSICAL MODELS
# Set 1
models kla bgn consrh fldmob print temp=500
solve init
method newton autonr trap maxtrap=10 carriers=2
log outf=PDLi9t80W02_12P1V01T500M6.log master
solve b1=0.001 beam=1 vanode=-1 name=anode lambda=0.2 wstep=0.005 wfinal=0.5
solve b1=0.001 beam=1 vanode=-1 name=anode lambda=0.5 wstep=0.02 wfinal=1.2
log off
```

APÊNDICE B – Artigo Publicado

Journal of Integrated Circuits and Systems, vol. 15, n. 2, 2020 1

Temperature, Silicon Thickness and Intrinsic Length Influence on the Operation of Lateral SOI PIN Photodiodes

Edson José Rodrigues and Michelly de Souza

Department of Eletrical Engineering, Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, Brazil
e-mail: ejrodrigues3@hotmail.com

Abstract— **This work presents an analysis of the influence of intrinsic length region and the thickness of the silicon film on the performance of lateral thin-film SOI PIN (Silicon on insulator P-I-N photodiodes) when illuminated by low wavelengths, in the blue and ultraviolet (UV) range. The experimental measurements performed with the wavelengths of 396 nm, 413 nm, and 460 nm in a temperature range of 100 K to 400 K showed that the optical responsivity of the SOI PIN photodetectors has larger dependence on the incident wavelength than on the variation of temperature. Two-dimensional numerical simulations showed the same trends as the experimental results as a function of temperature and as a function of wavelength. Numerical simulations were used to investigate the responsivity and total quantum efficiency of PIN SOI photodetectors with intrinsic length region ranging from 5 µm to 30 µm and silicon film thickness ranging between 40 nm to 500 nm. From the results it can be concluded that by properly choosing intrinsic length and silicon film thickness it is possible to optimize PIN SOI photodiodes performance for detecting specific wavelengths that can help defining the best technology for detection of a given wavelength.**

Index Terms— **Silicon-on-insulator, PIN diodes, Photodetector, Responsivity, Total quantum efficiency.**

I. Introduction

The incidence of light in semiconductor devices such as photodiodes promotes electron-hole generation. If such devices are reversely biased, the electric field separates the electron-hole pairs generated in the depletion region, and these carriers are collected in the diffusion regions, giving rise to the photocurrent [1]. The width of the depletion region plays an important role in this process. It must be large enough to absorb a significant amount of incident photons, for the generation of electron-hole pairs and to increase the photocurrent, and also be small enough to allow for electron-hole pairs to be collected in the diffusion region, which decreases the photocurrent.

A special case of the PN junction photodiode is the PIN diode which is one of the most common photodetectors [7], since the intrinsic depletion region can be adjusted to optimize the quantum efficiency and frequency response. The PIN diode consists of a PN junction separated by an intrinsic (I) region, with an intrinsic length region (L_i) [1], as shown in Figure 1. In practice, the intrinsic region may correspond to either a P-type or N-type region with a low doping level (in the order of 10^{15} cm^{-3}).

The absorption of light varies with the penetration depth into the material [4]. Lateral PIN SOI photodiodes implemented in thin silicon films, are efficient alternatives for the absorption of short wavelengths [4]. For example, UV and blue light penetration depths in silicon are around 100 nm and 500 nm, respectively [1]. The control of the width of the intrinsic region in PIN photodiodes can be adapted to optimize

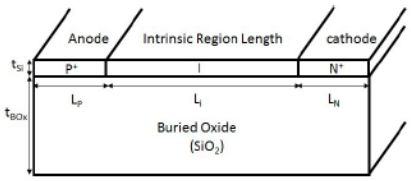


Fig.1 Lateral PIN SOI photodiode structure

quantum efficiency and responsivity [1]. Also, by having the silicon film in the top of a buried oxide layer, promotes isolation between the photogenerated carriers and the substrate, which reduces the device dark current, improving its efficiency, and low capacitance, also increasing the frequency response [5]. This also allows for the integration of photodetectors with CMOS circuits. These characteristics contribute to optical power measurements through the detection of short wavelengths (λ) in the range of blue and UV, in the spectral range below 400 nm. They are widely used in various applications such as in the environment [3], measurements of UV and ozone rates, measurement of DNA concentration, detection of bacteria [4], and on high-density DVDs that operate with a wavelength of 405 nm [5].

In this work, the operation of lateral SOI PIN diodes for the detection of short wavelengths are investigated in the range of blue and ultra-violet (UV), in a wide temperature range. The goal is to deepen the study of the efficiency in the lateral SOI PIN photodiodes for short wavelengths taking into account the variations of the intrinsic region length and the silicon film thickness as a function of temperature. The appropriate choice in the dimensions of the silicon film thickness and the intrinsic length region will help in the optimization of device design and fabrication. The analysis of these devices is performed through experimental data and two-dimensional numerical simulations, aiming at performance improvement for photodetection of short wavelengths.

II. Experimental Measurement Results

Diode current (I_D) as a function of applied voltage (V_D) curves at different temperatures and incident light sources have been obtained using the Variable Temperature Micro Probe System from MMR Technologies and the Agilent 4156C Semiconductor Parameter Analyzer [6], with grounded substrate.

A. Photodiode Characteristics

Multifingered lateral SOI PIN diodes were implemented following the process described in [6]. The device's technological and geometrical parameters of the photodiode used in

Digital Object Identifier 10.29292/jics.v15i2.158

this work are presented in Table I. Figure 2 presents an optical microscope image of part of an interdigitated PIN SOI lateral photodiode measured. All samples present an anti-reflection coating.

B. Light Sources Characteristics

The I-V curves of the experimental photodiode have been measured both in the absence of light and when illuminated with three different wavelengths (λ), from near UV (396 nm), Violet (413 nm) and Blue (460 nm), provided by different LEDs. The light source intensity of each LED has been measured using spectrometer USB645, from Ocean Optics. The obtained total power intensity measured at 50 mm from the light source is presented in Table II. This is the distance between the bare chip and the source light in the microprobe during the electrical measurements.

Table I. Lateral SOI PIN diodes parameters.

Parameter	Unit	Dimension
Silicon film thickness (t_{Si})	nm	80
Buried oxide thickness (t_{BOx})	nm	390
Intrinsic region doping concentration (N_{AI})	cm^{-3}	10^{15}
P+ region doping concentration (N_A)	cm^{-3}	2×10^{20}
N+ region doping concentration (N_D)	cm^{-3}	4×10^{20}
Intrinsic region length (L_i)	µm	9
P+ region length (L_P)	µm	9
N+ region length (L_N)	µm	9
Total width (W)	mm	55
Total area	mm^2	1
Depletion region extension @ $V_D = 0V$	µm	1.1
Depletion region extension @ $V_D = -1.5V$	µm	1.8

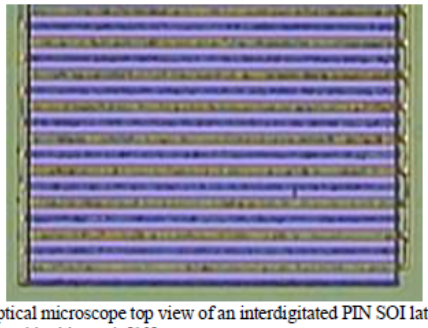


Fig. 2 Optical microscope top view of an interdigitated PIN SOI lateral photodiode used in this work [10].

Table II. Power intensity of light sources measured at 50 mm of distance.

Wavelength (nm)		P_{IN}/A (mW/cm^2)	P_{IN} (W)
396	UV	0.783	7.83×10^{-6}
413	Violet	0.464	4.64×10^{-6}
460	Blue	0.696	6.29×10^{-6}

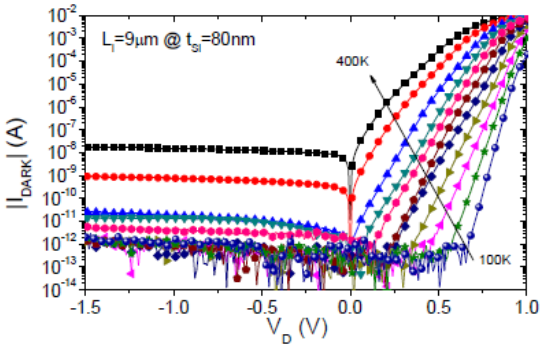


Fig. 3 Absolute dark current measured for temperatures between 100K and 400K, as a function of the applied voltage.

C. Experimental Results

The measured photodiode current (I_D) under a given applied voltage represents the sum of the photocurrent (I_{PG}), due to the incident light power on the device, and its dark current (I_{DARK}), that is the current in absence of light, due to thermal generation (1).

$$|I_D| = |I_{PG}| + |I_{DARK}| \quad (1)$$

The absolute dark current (I_{DARK}) as a function of the applied voltage, measured in the absence of light, is presented in Figure 3 for temperatures ranging from 100 K to 300 K, with 25 K steps. I-V curves at 350 K and 400 K are also presented. As presented in this figure, the rise of temperature increases the dark current (I_{DARK}) in several orders of magnitude as a result of increased thermal generation of electrons [2]. For temperatures below 300 K, however, the dark current reduces to levels below the minimum limit of the characterization system. Also, for V_D smaller than –0.5 V, I_{DARK} remains practically constant, showing that the electric field has little influence in the dark current, as presented in Figure 4, that shows the dark current per width as a function of temperature.

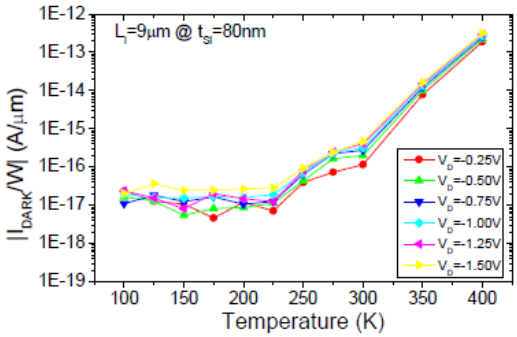


Fig 4 Normalized absolute dark current as a function of temperature measured at different applied voltages.

The normalized absolute total photodiode current ($|I_D/W|$) is presented as a function of T under UV, violet and blue illumination is presented in Figure 5. As reported in [6], different physical effects take place depending on the temperature, first increasing the current with temperature rise (due to reduction of bandgap narrowing) and then reducing at moderately high temperatures (due to mobility degradation). Since the light sources have different power intensities, it is possible to note different photogenerated current levels. However, although the available blue light has shown higher power intensity, violet source resulted in larger current. It indicates that the photogenerated current depends not only on the power intensity but also on the incident wavelength.

The responsivity and quantum efficiency under UV, violet and blue light sources as a function of temperature is presented in Figure 6. From these results, one can note that the responsivity of the studied SOI PIN diode becomes higher as the wavelength decreases. In the presented temperature range, under UV illumination the mean responsivity is around 82 mA/W with a variation around 18 %, while it is around 32 mA/W under violet illumination and 20 mA/W for the blue light source. The reduced responsivity to blue light explains the smaller current seen in Figure 5(C). The total

quantum efficiency has an identical response compared to responsivity and has an efficiency around 27 % when the device is under UV light and reduces when the wavelength is increased [7].

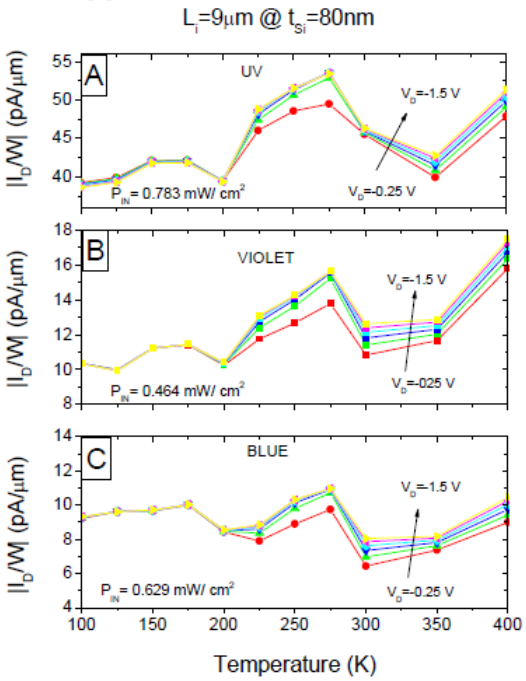


Fig 5 Normalized total current as a function of temperature measured at different applied voltages and three different light sources.

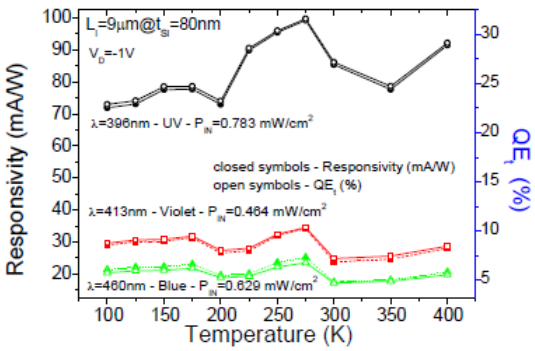


Fig. 6 Responsivity and total quantum efficiency under different light sources, as a function of the temperature for the studied photodiode.

III. Two-Dimensional Numerical Simulations

Aiming at extending the experimental analysis for different geometrical and technological parameters, two-dimensional numerical simulations of thin-film SOI PIN lateral photodiodes were performed with Atlas software [8]. The simulation models were based on the results of [10] and account for mobility (μ) dependence on doping concentration (N), temperature, and electric field, bandgap narrowing and Auger and SRH recombination, doping and temperature-dependent lifetime and incomplete carrier ionization for the lightly doped region at low temperatures.

The geometrical and technological parameters are the same as the one presented in Table I unless it is mentioned otherwise. For all simulations, W = 1 μm.

A. *Temperature Effects*

The photodiode current has been simulated for temperatures ranging between 100 K and 400 K for and is presented in Figure 7 as a function of the wavelength (λ) for L_i = 8 μm and P_{IN} = 1 mW/cm². It can be seen that starting from λ = 200 nm, the current increases linearly with wavelength up to 370 nm [9], named as wavelength cutoff (λ_c) [1]. Further increases of λ above λ_c causes the reduction of photogenerated current. It is related to the absorption of light in the semiconductor, which in this case remained 100 % for λ up to λ_c, reducing after that. For wavelengths larger than λ_c the energy of photons in the thin-film silicon layer is smaller, and a smaller amount of electron-hole will be generated. It is also possible to note that the absorption has shown to be independent on the temperature in the studied range.

The normalized photocurrent ($|I_{PG}/W|$) calculated by (1) is shown in Figure 8 under UV, violet and blue illumination, as a function of temperature. The photocurrent increased with temperature, but a reduction for T > 300 K is seen, due to the significant increase in the dark current.

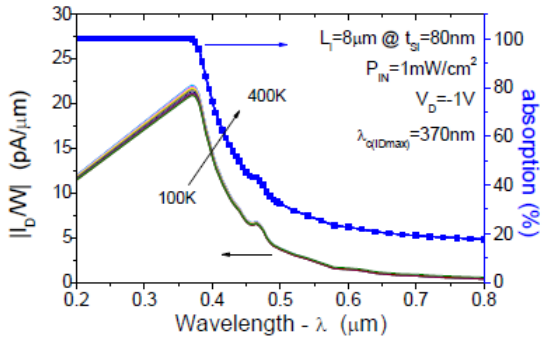


Fig.7 Normalized absolute total current, I_D as a function of wavelength, λ for the temperature range of 100K to 400K for photodiode with L_i=8μm.

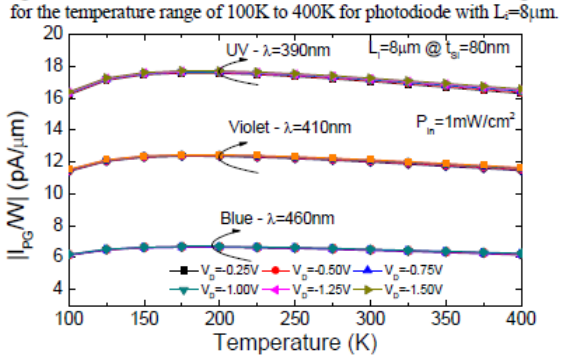


Fig. 8. Normalized absolute photocurrent, $|I_{PG}/W|$ under UV, violet and blue illumination, as a function of the temperature for photodiode with Li=8μm.

The dark current (I_{DARK}) simulated at temperatures below 300 K showed values around 10^{-16} A, due to the lower limit of the simulator numerical accuracy. On the other hand, an increase of 4 orders of magnitude have been observed when increasing the temperatures to 400 K.

The responsivity and total quantum efficiency were also calculated and have shown to be like the results observed for the experimental data. The average values of simulated quantum efficiency for UV, violet and blue illumination are 21%, 13%, and 7% respectively, while the experimental mean values were about 27%, 8.5%, and 6%. It is worthwhile men-

tioning that model parameters were not adjusted to fit the experimental data.

B. Influence of Intrinsic Length

In order to evaluate the behavior of the PIN photodiodes taking into account the variations of the intrinsic length region (L_i), simulations of photodiodes were performed with L_i ranging between 5 µm and 30 µm. Figure 9 shows the results of the normalized total current, $|I_D/W|$ as a function of wavelength, obtained for these photodiodes. The increase of the intrinsic length region causes an increase of the photocurrent. However, the maximum absorption occurs at the same wavelength cutoff λ_c (around 370 nm).

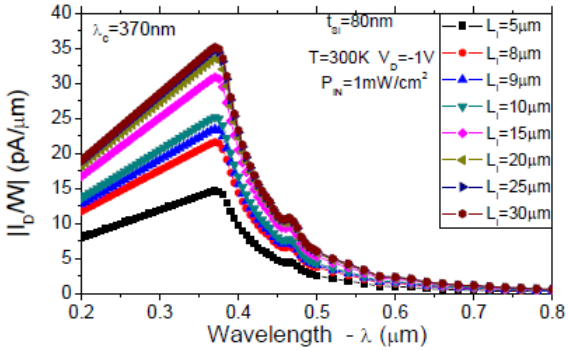


Fig. 9 Normalized absolute total current, $|I_D/W|$ for photodiodes with different intrinsic length, as a function of the wavelength.

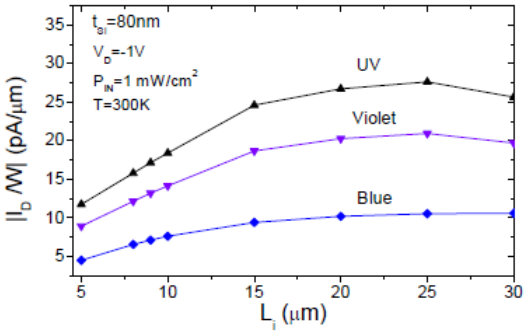


Fig. 10 Normalized absolute total current $|I_D/W|$ under UV, violet and blue illumination, as a function of intrinsic length.

Figure 10 shows the normalized total current as a function of intrinsic length for the three simulated wavelengths. The increase in the intrinsic length region increases the photosensitive area, which contributes to the photocurrent increase. However, the increase of intrinsic region length causes an increase of the distance to be traveled by the electron-hole pairs generated towards the diffusion region, favoring recombination. That is the reason for the photocurrent decrease for $L_i >$ 25 µm.

The responsivity and total quantum efficiency are presented as a function of the intrinsic length region in Figure 10, for all simulated photodiodes. It is possible to notice that the point of maximum responsivity and quantum efficiency remains the same for any wavelength and is around 13.6 µm, indicating a possible optimal intrinsic length for the simulated set of technological parameters.

C. Influence of Silicon Film Thickness

Aiming to analyze the performance of SOI PIN lateral diodes implemented in different SOI technologies, silicon film thickness has been also varied through the simulations. Silicon layer has been varied between 20 nm and 1 µm, ranging between thin to thick SOI, with $L_i = 5$ µm. It is important to mention that down to $t_{Si} = 20$ nm, no quantum effects are expected, which are out of the scope of this work.

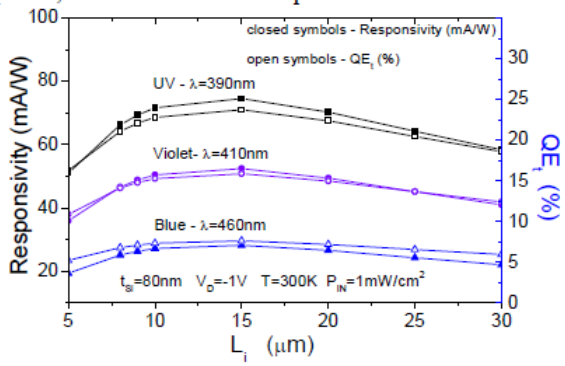


Fig. 11 Responsivity and total quantum efficiency under UV, violet and blue illumination as a function of intrinsic length region.

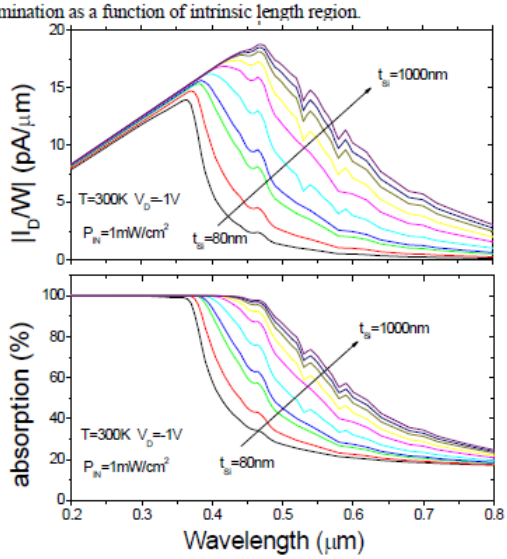


Fig. 12. Normalized absolute total current, $|I_D/W|$ and absorption for different silicon film thickness (t_{Si}) as a function of wavelength (λ) for photodiode with L_i=5µm.

Figure 12 presents the normalized absolute total current, and absorption for different silicon film thickness (t_{Si}) as a function of wavelength (λ). It is well known that the generation and absorption of electron-hole pairs occurs at the surface of the silicon for small wavelengths. On the other hand, longer wavelengths are absorbed deeper in silicon layer. Therefore, each silicon film thickness features a different wavelength cutoff, as presented in Figure 13. A linear relation between λ_c and t_{Si} can be seen.

Figure 14 shows the normalized absolute total current, $|I_D/W|$ under UV, violet and blue illumination, as a function of silicon film thickness. From these results one can note that thinner silicon layers already reach the maximum current for shorter wavelengths. For instance, for UV absorption, silicon layers thicker than 300 nm do not contribute to photogeneration. For violet light, the maximum current level is reached