МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ InGaAs/AlNaS/InGaAs

М.А. Зиновьев, М.В. Меженный, А.С. Дренин, Е.С. Роговский,
О.В. Хоруженко, О.Р. Абдуллаев

АО «Оптрон», 105318, г. Москва, Щербаковская ул., д. 53

В работе представлена математическая модель фоточувствительного элемента (ФЧЭ) на основе гетероэпитаксиальной xBn-структуры $p^+ \text{-InGaAs/n-AlInAs/n-InGaAs}$. Определён алгоритм расчёта для двумерного моделирования ФЧЭ в программной среде Synopsys TCad, включающей расчёты распределения потенциалов и зарядов в структуре, перенос носителей заряда (н.з.) с учётом влияния ионизации, вероятности лавинного пробоя и оптического возбуждения монохроматическим излучением. Представлены результаты расчёта зонной диаграммы гетероэпитаксиальной pBn-структуры, плотности темнового тока и фототока в зависимости от её конструкции. На основе выполненных расчётов была оптимизирована конструкция эпитаксиальной структуры для ФЧЭ.

Ключевые слова: фоточувствительный элемент на основе InGaAs, xBn-структура, зонная диаграмма, плотность темнового тока, плотность фототока

Сведения об авторах: М.А. Зиновьев, m.zinovjev@mail.ru; М.В. Меженный, mvmezh@gmail.com; А.С. Дренин, dasnew@mail.ru; Е.С. Роговский, handofgod@mail.ru; О.В. Хоруженко, main@optron.ru; О.Р. Абдуллаев, abd@optron.ru

SIMULATION OF THE PHOTSENSITIVE ELEMENT BASED ON STRUCTURE OF InGaAs/AlNaS/InGaAs

M.A. Zinoviev, M.V. Mezhenyi, A.S. Drenin, E.S. Rogovskiy,
O.V. Khoruzhenko, O.R. Abdullaev

«Optron» Corp., 53 Shcherbakovskaya str, Moscow, 105318, Russia

The article presents a mathematical model of the photosensitive element based on the $p^+ \text{-InGaAs/n-AlInAs/n-InGaAs}$ heteroepitaxial xBn structure. The calculation algorithm for two-dimensional modeling of the photosensitive element in the Synopsys TCad software environment is determined, which includes calculations of the distribution of potentials and charges in the structure, transport of charge carriers taking into account the effect of ionization, the avalanche breakdown probability, and optical excitation by monochromatic radiation. The results of the heteroepitaxial pBn structure band diagram, dark current density and photocurrent calculations are presented, depending on structure design. Based on the calculations performed, epitaxial structure for the photosensitive element was optimized.

Keywords: InGaAs photosensitive element, xBn-structure, band diagram, dark current density, photocurrent density

Authors: M.A. Zinoviev, m.zinovjev@mail.ru; M.V. Mezhenyi, mvmezh@gmail.com; A.S. Drenin, dasnew@mail.ru; E.S. Rogovskiy, handofgod@mail.ru; O.V. Khoruzhenko, main@optron.ru; O.R. Abdullaev, abd@optron.ru

Введение

Одноэлементные и матричные фотоприёмные устройства широко используются для контроля потока светового излучения и получения изображения в оптическом диа-

пазоне длин волн. В значительном большинстве практических применений мощность регистрируемого светового сигнала очень мала, поэтому чувствительность исследуемых фотоприёмников является критическим параметром. Другим важным параметром

является предельная обнаружительная способность фотоприёмника, которая определяется отношением полезного сигнала к собственным шумам фотоприёмника. Отношение сигнал-шум ограничено уровнем «теплового шума» и может быть улучшено путём охлаждения приборов.

Одними из современных ФЧЭ, обладающих низким уровнем шумов, являются фотоприёмники на основе гетероэпитаксиальных xVn -структур [1] – это структуры с униполярными барьерами, в которых n -активный поглощающий слой, x -контактный слой, изменяемый по типу проводимости, и барьерный слой (В), который позволяет разделить генерируемые электронно-дырочные пары с высокой эффективностью ввиду того, что барьерный слой является барьером только для основных н.з. в зависимости от типа xVn -структуры. Такие структуры с заданными фотоэлектрическими характеристиками могут быть получены методом молекулярно-лучевой или газовой фазной эпитаксии.

Основной задачей настоящей работы являлась разработка конструкции ФЧЭ на основе метода имитационного моделирования в части определения оптимальных концентраций и толщин рабочих слоёв полупроводниковой гетероструктуры (xVn -структуры), включающей в себя использование широкозонного слоя в качестве барьерного слоя для основных носителей заряда. В работе представлены результаты имитационного моделирования функционирования фоточувствительных элементов на основе xVn -структуры в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн (0,9...1,7 мкм), которые позволили оптимизировать выбор конструкции эпитаксиальных слоёв для изготовления ФЧЭ xVn -структуры. Оптимизация конструктивных решений фотодиода производилась с применением приборно-технологического программного обеспечения. Приведены необходимые для вычисления параметры, описаны используемые модели расчёта и методики моделирования, позволяющие при малых временных затратах оптимизировать режимы технологических операций изготовления ФЧЭ на основе xVn -структуры.

Особенности приборно-технологической модели ФЧЭ на основе xVn -структуры

Среди материалов, работающих в ближнем ИК-диапазоне, выделяют трёхкомпонентный твёрдый раствор $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ с шириной запрещённой зоны $\sim 0,75$ эВ, обладающий возможностью бездефектного выращивания на подложках InP в результате совпадения параметра кристаллической решётки ($5,85\text{\AA}$). Данный твёрдый раствор применялся для x и n слоя в качестве контактного и активного слоя соответственно.

Главной особенностью xVn -структуры является присутствие барьерного слоя из широкозонного трёхкомпонентного твёрдого раствора $In_{0,52}Al_{0,48}As$, который позволяет уменьшить диффузионный ток утечки в такой гетероструктуре.

На рис.1 представлена схема взаимного положения энергии валентной зоны (E_v) и зоны проводимости (E_c) для слоёв xVn -структуры [2,3]. Детальное строение структуры будет представлено ниже.

Рис. 1

Зонная диаграмма типичной исследуемой гетероструктуры xVn

Гетероэпитаксиальная xVn -структура $p^+-InGaAs/n-AlInAs/n-InGaAs$, на основе которой может быть изготовлен ФЧЭ, представляет собой:

- оптически прозрачную высоколегированную подложку n^+-InP ($N_D = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) с антиотражающим покрытием из SiO_2 , Si_3N_4 или Al_2O_3 толщиной около 0,3 мкм;
- активный поглощающий слой $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ n -типа проводимости с уровнем фоновой концентрации меньше $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ толщиной 1 ... 3 мкм;
- барьерный n -слой $Al_{0,48}In_{0,52}As$ с шириной запрещённой зоны 1,49 эВ, позволяю-

ший снизить токи поверхностной рекомбинации, толщиной меньше 0,85 мкм;

– контактный слой $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ p -типа проводимости с концентрацией $N_A = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ толщиной 0,1 ÷ 0,5 мкм; для создания омического контакта приповерхностная область контактного слоя толщиной 50 нм легируется до уровня $N_A = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Согласно представленной конструкции, залегание уровня Ферми в InGaAs p -типа примерно 0,17 эВ относительно валентной зоны, в InAlAs n -типа изменяется в пределах расчётной модели от 0,15 до 0,71 эВ относительно зоны проводимости, в InGaAs n -типа – примерно 0,08 эВ относительно зоны проводимости. В высоколегированном InP – примерно на 0,08 эВ выше дна зоны проводимости.

На рис. 2 представлена структурная схема зонной диаграммы для $x\text{Bn}$ -структуры. При поглощении фотонов с длиной волны 1,55 мкм в активном слое при приложении некоторого обратного смещения барьерный слой (В) с разностью потенциалов $\Delta E_C \geq 0,52$ эВ препятствует потоку электронов из p^+ -области через поглощающий слой (v) в область стока n^+ и в то же время способствует потоку генерируемых н.з. из v -области. Структура с такими переходами обладает свойством подавления оже-рекомбинации, уменьшая тем самым плотность темнового тока в ФЧЭ [4, 5]. Это достигается за счёт снижения диффузионной и генерационно-рекомбинационной составляющих темнового тока.

Рис. 2

Структурная схема зонной диаграммы $x\text{Bn}$ -структуры на основе $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ при обратном смещении и поглощении фотонов с длиной волны 1,55 мкм

Особенности моделирования

Модель расчёта электрофизических параметров конструкции гетероэпитаксиальной $x\text{Bn}$ -структуры основана на использовании специальных алгоритмов программного САПР [6], включающая:

- расчёт распределения потенциалов и зарядов в структуре;
- расчёт переноса н.з.;
- сродство к электрону и ширину запрещённой зоны;
- вклад оптической генерации н.з. в общем токе с учётом влияния монохроматического излучения, падающего под произвольным углом с различной мощностью и поляризацией;
- влияние ионизации и вероятность лавинного пробоя.

Расчёт распределения потенциалов и зарядов базируется на решении уравнения Пуассона (1) с учётом уравнений для плотностей токов для электронов и дырок (2, 3):

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = -q(p - n + N_D - N_A), \quad (1)$$

где ϵ – абсолютная диэлектрическая проницаемость материала; q – заряд электрона, Кл; n и p – плотности электронов и дырок, см^{-3} ; N_D и N_A – концентрации ионизированных доноров и акцепторов, см^{-3} .

$$\vec{J}_n = q\mu_n(n\nabla E_C + kT_n\nabla n + f_n^{td}kn\nabla T_n - 1,5nkT_n\nabla \ln m_n), \quad (2)$$

$$\vec{J}_p = q\mu_p(p\nabla E_V - kT_p\nabla p - f_p^{td}kp\nabla T_p - 1,5pkT_p\nabla \ln m_p), \quad (3)$$

где $\mu_{n,p}$ – подвижности носителей заряда, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $m_{n,p}$ – эффективные массы н.з., кг; $T_{n,p}$ – температуры носителей в условии суперпозиции; k – постоянная Больцмана, эВ/К; $f_{n,p}^{td}$ – параметр переноса н.з., основанный на подходе К. Blotekjaer [6], в расчёте не учитывается; E_C – энергия (в эВ) дна зоны проводимости, эВ; E_V – энергия потолка валентной зоны.

Форма вышеупомянутых уравнений плотности тока появляется, потому что применяется соотношение Эйнштейна $D = \mu_{n,p} kT_{n,p}$, для определения коэффициентов диффузии носителей заряда [6].

Использование уравнения непрерывности позволяет учесть пространственные изменения потенциала, сродство к электрону и ширину запрещённой зоны. Три последних члена уравнения (2, 3) учитывают изменения градиента концентрации, градиент температуры н.з. и эффективные массы н.з., что позволяет корректно учитывать их диффузию.

Для определения спектрального диапазона работы ФЧЭ использовался модуль САПР «Transfer Matrix Method» (TMM) [6]. Этот модуль позволяет учесть вклад оптической генерации носителей заряда в общем токе с учётом влияния монохроматического излучения, падающего под произвольным углом с различной мощностью и поляризацией. Амплитуды проходящих и отражённых волн в каждом слое гетероструктуры вычисляются с помощью матриц переноса. В модели имеются ограничения, заключающиеся в том, что каждый слой гетероструктуры однороден, изотропен.

При расчёте обратных вольт-амперных характеристик учитывались влияние ионизации и вероятность лавинного пробоя. При моделировании ФЧЭ был использован универсальный модуль «vanOverstraetendeMan» (R. Van Oversraeten и H. De Man) [3, 7]. Данный модуль позволяет определить коэффици-

енты ионизации н.з., используя закон Чановоя:

$$\alpha(E) = \gamma \cdot a \cdot e^{\left(-\frac{\gamma b}{E_0}\right)}, \quad (4)$$

где γ – коэффициент статистики Ферми-Дирака, учитывающий вероятность влияния ионизации н.з. от распределения поля в структуре, const; $\hbar\omega_{op}$ – коэффициент энергии фотона, выражающий температурную зависимость γ , эВ; a и b – коэффициенты ударной ионизации; E_0 – критическое электрическое поле, В·см⁻¹ (приведены в таблице).

$$\gamma = \frac{\tanh\left(\frac{\hbar\omega_{op}}{2kT_0}\right)}{\tanh\left(\frac{\hbar\omega_{op}}{2kT}\right)}, \quad (5)$$

где T – температура модели, К ($T_0 = 300$ К).

В таблице приведены параметры, используемые при расчёте параметров гетероструктуры.

Таблица

Коэффициенты модуля «vanOverstraetendeMan»

Параметр	Символ	InP		In _{0,53} Ga _{0,47} As		Al _{0,48} In _{0,52} As	
		Electron	Hole	Electron	Hole	Electron	Hole
Коэффициенты ударной ионизации	a (low), см ⁻¹	7.6683e+6	4.8159e+6	7.6683e+06	4.8159e+06	8.6e+06	2.3e07
	a (high), см ⁻¹						
	b (low), В·см ⁻¹	2.9759e+6	2.511e+6	2.9759e+06	2.5111e+06	3.5e+06	6.4e+05
	b (high), В·см ⁻¹						
Критическое эл. поле	E_0 , В·см ⁻¹	4e+5	4e+5	2e+5	2e+5	5.2e+5	5.2e+5
Энергия фонона	$\hbar\omega_{op}$, эВ	0.038	0.038	0.034	0.034	0.001	0.001

Согласно [8, 9], значение критического поля в барьерном слое AlInAs может варьироваться от $4,8 \cdot 10^5$ В/см до $8 \cdot 10^5$ В/см, в активном слое InGaAs – от $2 \cdot 10^5$ В/см до $4 \cdot 10^5$ В/см. Эти значения зависят от концентрации носителей в слоях моделируемой гетероструктуры.

Для расчётов поглощения оптического излучения были определены значения ко-

эффициентов преломления и поглощения комплексного показателя преломления используемых материалов In_{0,53}Ga_{0,47}As, Al_{0,48}In_{0,52}As и InP [2, 6, 8], а рис. 3 (а, б) приведены зависимости коэффициентов экстинкции (k) и показателя преломления (n) показателей преломления от длины волны монохроматического излучения, используемые при моделировании ФЧЭ.

Рис. 3

Графики коэффициентов n и k комплексного показателя преломления для $In_{0.53}Ga_{0.47}As$, $Al_{0.48}In_{0.52}As$, InP : а) мнимая часть (k) комплексного показателя преломления (коэффициент экстинкции); б) действительная часть (n) комплексного показателя преломления (показатель преломления)

Алгоритм моделирования ФЧЭ в САПР

Алгоритм расчёта электрофизических параметров xVn -структуры был сформирован исходя из особенностей конструкции ФЧЭ на основе xVn -структуры. Ниже приведены этапы, описывающие этот алгоритм при расчёте оптимальной конструкции гетероструктуры с использованием специализированного САПР.

Этап 1 – формирование модели структуры с заданными параметрами при помощи графического редактора «sEditor» и скрипта для автоматического формирования одно-типных структур.

Этап 2 – задание необходимых параметров материалов в модуле «sParameters».

Этап 3 – задание алгоритма расчёта рабочих параметров модели с подключением необходимых модулей в «sDevice».

Этап 4 – задание значений толщины барьерного слоя, концентрации и типа легирующей примеси.

Этап 5 – задание толщины и концентрации легирующей примеси в активном слое.

Этап 6 – выполнение расчётов в среде САПР.

Этап 7 – обработка полученных расчётных характеристик в зависимости от:

- величины темнового тока (нахождение минимального значения при заданном напряжении);
- формы спектра поглощения (диапазон исследования $0,3 \div 1,9 \mu m$);
- распределения электрического поля в слоях структуры.

Этап 8 – анализ влияния концентрации и толщины высокоомных слоёв на электрические параметры ФЧЭ. Оптимизация модели.

Двумерная модель ФЧЭ

Для проведения расчёта электрофизических параметров в зависимости от конструктивных особенностей (толщины слоёв, уровня легирования и типа примеси) была выбрана pVn -структура, на основе которой была сформирована виртуальная модель ФЧЭ (диаметр фоточувствительной мезы $D_{фчэ} = 300 \mu m$) – рис. 3.

Рис. 4

Модель ФЧЭ на основе pVn -структуры

По результатам моделирования были получены зонные диаграммы для pVn -структур. На рис. 4а показан расчётный график зонной диаграммы при нулевом смещении в структуре $n-AlInAs/n-InGaAs$. На рис. 4б показан график зонной диаграммы для этой структуры, но при подаче обратного смещения $-3 V$.

Рис. 5

Зонная диаграмма для структуры pBn: а) при нулевом смещении; б) при смещении -3 В

(1 – InGaAs: $h = 0.4$ мкм, $E_g = 0.75$ эВ, $N_a = 3e+18$ см⁻³; 2 – AlInAs: $h = 0.3$ мкм, $E_g = 1.55$ эВ, $N_d = 8e+15$ см⁻³; 3 – InGaAs: $h = 1$ мкм, $E_g = 0.75$ эВ, $N_d = 1e+16$ см⁻³; 4 – InP: $h = 350$ мкм, $E_g = 1.45$ эВ, $N_d = 3e+18$ см⁻³)

Моделирование ВАХ ФЧЭ и параметров работы при оптическом воздействии

В результате проведенного моделирования были получены расчетные значения ВАХ в диапазоне толщин, концентрации легирующей примеси (n -типа) как активного, так и барьерного слоев. Для барьерного слоя $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (БС) – толщина 0.2, 0.3, 0.4 мкм; концентрация ($1e+15$, $4e+15$, $8e+15$, $1e+16$, $4e+16$, $6e+16$, $1e+17$) см⁻³; для активного слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (АС) – толщина 1.0, 2.1 мкм; концентрация ($1e+15$, $4e+15$, $8e+15$, $1e+16$, $4e+16$, $6e+16$, $1e+17$) см⁻³.

На рис. 5 приведена диаграмма значений плотности темного тока и фототока (при засветке монохроматическим светом с длиной волны 1.55 мкм) при напряжении смещения -3 В и толщине активного слоя 1.0 (левый сектор круговой диаграммы) и 2.1 мкм (правый сектор) для различных значений концентрации носителей заряда в активном и барьерном слоях. Каждый сектор разделен на 10 сегментов, соответствующих концентрации активного слоя от $1e+15$ до $1e+17$ см⁻³. В каждом сегменте приведены значения плотности темного тока и плотности фототока,

проградуированные по шкале ОХ от 10^{-9} А/см² до 10 А/см². Каждый луч круговой диаграммы соответствует определённому значению концентрации носителей заряда в барьерной области для каждого сегмента (значения концентраций в каждом сегменте повторяются).

Анализ приведённых значений темного тока и фототока в зависимости от толщины и концентрации носителей заряда в активном и барьерном слоях показал следующее. Как и следовало ожидать, значения электрофизических параметров являются чувствительными характеристиками к изменениям параметров активного слоя.

Например, для активного слоя толщиной 2.1 мкм (правая секция графика) при повышении концентрации в активном слое при неизменных толщине барьерного слоя и концентрации в нём наблюдается плавное увеличение плотности темного тока, но с увеличением толщины барьерного слоя с 0.2 до 0.4 мкм плотность токов плавно уменьшается.

Одновременно при повышении значений концентрации носителей заряда в барьерном слое возникает ситуация, при которой падает фототок и происходит пробой, обусловленный, вероятно, проколом барьера.

Рис. 6

Диаграмма значений плотности темнового тока и фототока от параметров ФЧЭ

Отсутствие значений плотности тока на диаграмме при некоторых концентрациях обусловлено коротким замыканием ФЧЭ.

Поэтому для достижения высоких значений фототока при засветке монохроматическим излучением с длиной волны 1.55 мкм и одновременно низких значений темнового тока необходимо одновременно управлять толщиной и концентрацией носителей заряда в барьерном и активном слоях. Такую взаимозависимость можно наблюдать исходя из данных, представленных на рис. 6 (для активного слоя толщиной 2.1 мкм) и рис. 7 (для активного слоя

толщиной 1 мкм), на которых приведены зависимости плотности темнового тока и фототока (при засветке монохроматическим светом с длиной волны 1.55 мкм) для ФЧЭ от концентрации носителей заряда активного слоя от 10^{15} до 10^{17} см⁻³ для разных толщин (0,2...0,4 мкм) и концентраций носителей заряда (10^{15} ... $4 \cdot 10^{16}$ см⁻³) в барьерном слое. Приведённые зависимости позволяют оценить электрофизические параметры ФЧЭ при изменении параметров *pVn*-структуры (концентрации носителей заряда в активном и барьерном слоях при изменении их толщины).

Рис. 7

Плотность темного тока для моделируемых образцов в зависимости от концентрации активного слоя толщиной 2.1 мкм

Рис. 8

Плотность темного тока для моделируемых образцов в зависимости от концентрации активного слоя толщиной 1 мкм

При увеличении концентрации носителей заряда в активном слое при неизменных других параметрах этого и барьерного слоёв темновой ток и фототок ФЧЭ возрастают, т.е. существует дилемма: или высокое значение фототока с высоким темновым током, или низкие темновые токи при низком фототоке. Наилучшие результаты соответствуют слаболегированной барьерной области (меньше $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$), однако при этом надо учитывать влияние остальных параметров $x\text{Bn}$ -структуры.

Выводы

С использованием САПР была разработана модель $p\text{Bn}$ -структуры и виртуального прибора на её основе для расчёта электрофизических параметров. Для расчёта были определены необходимые алгоритмы вычисления, начальные и граничные условия и постоянные величины. Созданная модель позволила рассчитать параметры ФЧЭ на основе полупроводниковой $p\text{Bn}$ -структуры $\text{InGaAs}/\text{AlInAs}/\text{InGaAs}$ и оптимизировать конструкцию $p\text{Bn}$ -структуры с оптимальным составом рабочих слоёв: для активного слоя толщина составляет 2.1 мкм при концентрации носителей заряда $6 \cdot 10^{15} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$, для барьерного слоя – толщина 0.4 мкм при концентрации носителей заряда 10^{15} см^{-3} . Полученная конструкция ФЧЭ позволяет достичь низких плотностей темнового тока (менее $7.7 \cdot 10^{-9} \text{ А/см}^2$ при $U_{\text{смещ}} = -3\text{В}$) и высокого фототока, что не уступает по своим параметрам лучшим ФЧЭ зарубежных производителей (Hamamatsu). Полученные результаты позволяют избежать излишних затрат при производстве ФЧЭ на основе гетероэпитаксиальной $p\text{Bn}$ -структуры.

Литература

1. John F. Klem, Jin K. Kim, Michael J. Cich «Epitaxially passivated mesa-isolated InGaAs photodetectors» Proc. of SPIE Vol. 8704 870402-1 doi: 10.1117/12.2016558 (2013).
2. «NSM Archive - Physical Properties of Semiconductors» URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html> (2017).
3. Hiroshi Ito, Tadao Ishibashi «InP/InGaAs Fermi-level managed barrier diode for broadband and low-noise terahertz-wave detection» Japanese Journal of Applied Physics, V.56, №1 (2016).
4. Itsuno Anne M. «Bandgap-Engineered HgCdTe

Infrared Detector Structures for Reduced Cooling Requirements» A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in The University of Michigan (2012).

5. Chou W. Y., Chang G. S., Hwang W. C., Hwang J. S. «Analysis of Fermi level pinning and surface state distribution in InAlAs heterostructures» Journal of applied physics V.83, №7 (1998).
6. Synopsys «Sentaurus Device User Guide» (2009).
7. Palankovski Vassil, Quay Rüdiger «Analysis and Simulation of Heterostructure Devices» Springer Science & Business Media 289 (2012).
8. Ren F., Wu C.S., Chu S.N.G., Pearton S.J. «High Speed III-V electronics for wireless applications and the twenty-fifth state-of-the-art program on compound semiconductors (Sotapocs XXV)» The electrochemical society (1996).
9. Hideki Ono, Satoshi Taniguchi, Toshi-kazu Suzuki «Indium Content Dependence of Electron Velocity and Impact Ionization in InAlAs/InGaAs Metamorphic HEMTs» Extended Abstracts of the 2003 International Conference on Solid State Devices and Materials, Tokyo, pp. 660-661 (2003).

References

1. John F. Klem, Jin K. Kim, Michael J. Cich «Epitaxially passivated mesa-isolated InGaAs photodetectors» Proc. of SPIE Vol. 8704 870402-1 doi: 10.1117/12.2016558 (2013).
2. «NSM Archive - Physical Properties of Semiconductors» URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html> (2017)
3. Hiroshi Ito, Tadao Ishibashi «InP/InGaAs Fermi-level managed barrier diode for broadband and low-noise terahertz-wave detection» Japanese Journal of Applied Physics, V.56, №1 (2016).
4. Itsuno Anne M. «Bandgap-Engineered HgCdTe Infrared Detector Structures for Reduced Cooling Requirements» A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in The University of Michigan (2012).
5. Chou W. Y., Chang G. S., Hwang W. C., Hwang J.S. «Analysis of Fermi level pinning and surface state distribution in InAlAs heterostructures» Journal of applied physics V.83, №7 (1998).
6. Synopsys «Sentaurus Device User Guide» (2009).
7. Palankovski Vassil, Quay Rüdiger «Analysis and Simulation of Heterostructure Devices» Springer Science & Business Media 289 (2012).
8. Ren F., Wu C.S., Chu S.N.G., Pearton S.J. «High Speed III-V electronics for wireless applications and the twenty-fifth state-of-the-art program on compound semiconductors (Sotapocs XXV)» The electrochemical society (1996).

9. Hideki Ono, Satoshi Taniguchi, Toshi-kazu Suzuki «Indium Content Dependence of Electron Velocity and Impact Ionization in InAlAs/InGaAs Metamorphic HEMTs» Extended Abstracts of the 2003 International Conference on Solid State Devices and Materials, Tokyo, pp. 660-661 (2003).