

УДК 621.383.46

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ InGaAs/GaAs ДЛЯ ФОТОДЕТЕКТОРОВ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

© 2015 г. Э.Е. Блохин<sup>1</sup>, Д.А. Арустамян<sup>1</sup>, Д.Л. Алфимова<sup>2</sup>

Поступила 30.07.2015

Разработаны конструкция и теоретическая модель фотодетектора коротковолнового и ближнего ИК-диапазона (от 900 до 1700 нм) на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs. Предложенная конструкция фотодетектора содержит подложку чистого GaAs, нижний проводящий слой  $n^+$ -слой GaAs, легированный теллуром, активный  $i$ -слой InGaAs, верхний проводящий  $p^+$ -слой GaAs, легированный цинком. Толщина слоев для построения модели для активного  $i$ -слоя InGaAs составила 8 мкм, для проводящих слоев ( $n^+$ -слой GaAs и  $p^+$ -слой GaAs) – 1,5 мкм. Теоретическая модель основана на методе матричного LU-разложения, который позволяет решать основные полупроводниковые уравнения и уравнение Пуассона, и дает возможность добиться более значимых результатов по сравнению с другими численными методами (Ньютона и Гаусса–Зейделя) за минимальное количество итерационных шагов. По результатам численного моделирования было исследовано распределение потенциала и электрического поля в активном слое структуры в зависимости от остаточной концентрации примеси  $i$ -слоя в пределах от  $3 \cdot 10^{12}$  до  $3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Предложено оптимальное значение концентрации активного слоя  $3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, после которого проводить технологическую обработку материала уже нецелесообразно. Установлено, что при напряжении обратного смещения 2,5 В наблюдается истощение активного  $i$ -слоя InGaAs с уменьшением концентрации носителей заряда на несколько порядков. Из полученного распределения электрического поля внутри активного слоя InGaAs удалось при напряжении обратного смещения 2,5 В установить значение электрического поля порядка  $8,5 \cdot 10^4$  В/см. Изучено влияние внешней рабочей температуры (77, 135 и 297 К) на свойства фотодетектора. Показано, что возрастание температуры приводит к увеличению темнового тока до  $10^{-8}$  А.

**Ключевые слова:** ИК-фотодетекторы ближнего и коротковолнового диапазона, быстродействующие фотодетекторы, MatLab.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее внимание в вопросах детектирования излучения уделяется гетероструктурам на основе материалов  $A^3B^5$ . Этот шаг оправдан по ряду причин. Во-первых, использование данных материалов позволяет добиться более значимых результатов по сравнению с фотодетекторами на основе кремния и германия. Во-вторых, благодаря большому разбросу вариантов компоновки данных материалов появляется возможность исследовать трех- и четырехкомпонентные струк-

туры с совершенно другими свойствами. В данной работе исследуется гетероструктура на основе InGaAs/GaAs для  $p-i-n$ -фотодетекторов ближнего и коротковолнового ИК-диапазона. Коротковолновым считается диапазон, прилегающий к видимому спектру излучения до значений порядка 3 мкм. В данной области спектра основными качествами фотодетекторов являются объектная идентификация и практически идеальное соотношение сигнал/шум. Фотодетекторы на основе InGaAs при комнатной температуре имеют наиболее низкие темновые и шумовые токи по сравнению с другими материалами, за счет чего обнаружительная способность  $D^*$  таких фотодетекторов достигает значений  $3 \cdot 10^{13}$  см<sup>2</sup>·Гц<sup>1/2</sup>/Вт [1]. Область применения ИК-фотодетекторов на основе InGaAs охватывает ширину спектра порядка 0,9–1,7 мкм. Особый интерес для промышленности имеют фотодетекторы с пиками фотоотклика в спектральных точках 1,3 и 1,55 мкм. Активная спектральная область структуры зависит от состава трехкомпонентного

<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Rostov Region, Russian Federation), Российская Федерация, 346400, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132; e-mail: holele@mail.ru.

<sup>2</sup>Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.

материала  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , для “стандартной” ширины пропускания используют порядка 53% InAs, при этом в активной области поглощения спектральный отклик структуры достигает значений 85–93% [2]. При увеличении состава индия можно наблюдать пик фотоотклика в интервале 2,2–2,6 мкм.

Из практики известны методы получения активных гетероструктур для фотодетекторов ИК-диапазона: молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ), газофазная эпитаксия (MOCVD) и ионно-лучевое осаждение (ИЛО). В работах [3–6] подробно описана возможность получения фотоактивных гетероструктур с заданными свойствами методом ионно-лучевого осаждения. Рассматриваемый метод позволяет добиться оптимальной однородности эпитаксиальных слоев (до значений  $10^{-4} \text{ см}^{-1}$ ) за счет возможности управления ионным пучком у поверхности выращиваемых слоев [7–9]. С учетом особенностей метода ИЛО в перспективе можно получить бездефектные слои, что приведет к существенному снижению шумов фотодетекторных структур [10; 11].

У гетероструктур InGaAs/GaAs наряду с положительными свойствами есть и недостатки, ограничивающие выбор размеров активной области фотодетектора. С одной стороны, активная  $i$ -область должна быть достаточно большой для достижения максимального значения фототока, с другой – она должна обеспечивать максимальное быстродействие (отклик), для этого ее ширину необходимо уменьшать. Таким образом, задача подбора оптимальной толщины активной области фотодетектора для технологов является весьма актуальной.

В рамках данной работы проводилось численное моделирование гетероструктуры с активным слоем  $i$ -InGaAs в программном пакете MatLab для фотодетекторов ближнего и среднего ИК-диапазонов.

МОДЕЛИРУЕМАЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРА InGaAs/GaAs

При разработке модели использовалась структура фотодетектора, приведенная на рисунке 1. В качестве подложки использовался арсенид галлия (001) с шириной запрещенной зоны 1,424 эВ. Далее моделировался проводящий  $n^+$ -слой GaAs с подвижностью носителей заряда  $8500 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  (для электронов) и  $400 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$  (для дырок), легированный теллуром до концентрации  $(1...5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Верхний проводящий слой  $p^+$ -GaAs легировался акцепторной примесью цинка до концентрации  $(1...5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Толщина проводящих слоев составила порядка 1,5 мкм, в то время как толщина

активной  $i$ -области составила 8 мкм. Выбор трехкомпонентного материала InGaAs в качестве активного слоя фотодетектора ближнего ИК-диапазона обусловлен значениями энергий прямых межзонных переходов при поглощении излучения, которые лежат в области коротковолнового и ближнего ИК-диапазона (от 900 до 1700 нм).

Структура InGaAs/GaAs может быть описана эквивалентной электрической схемой, которая отличается от схемы идеального фотопреобразователя. Данная схема представлена на рисунке 2.

Согласно эквивалентной схеме,  $i_0(\omega)$  показывает фототок структуры при напряжении обратного смещения. Выходной ток является произведением фототока на придаточную функцию цепи  $H(\omega)$ ,  $C_j$  – емкость перехода,  $R_j$  – диодное шунтирующее сопротивление. Паразитирующая емкость  $C_p$  вносит небольшой вклад в ухудшение быстродействия детектора. Оставшиеся элементы представляют собой сопротивление нагрузки ( $R_L$ ) и переходное сопротивление на  $p$ - и  $n$ -областях. Прямоугольная область отражает отличие эквивалентной схемы фотодетектора от схемы идеального фотопреобразователя.

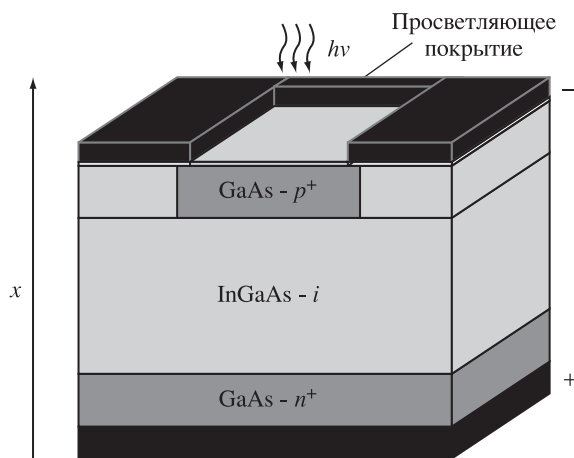


Рис. 1. Схематическое изображение структуры ИК-фотодетектора

Fig. 1. Schematic pattern of the infrared photodetector’s structure

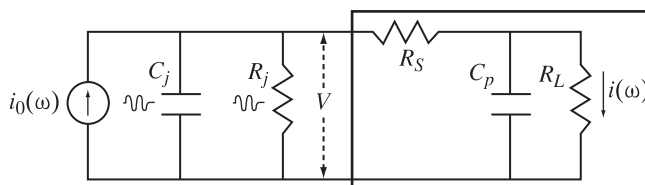


Рис. 2. Эквивалентная схема InGaAs/GaAs-фотодетектора ближнего ИК-диапазона

Fig. 2. Equivalent circuit of InGaAs/GaAs photodetector of the near-IR range

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ИССЛЕДУЕМОЙ СТРУКТУРЫ

Для моделирования характеристик фотодетектора необходимо построить его математическую модель на основе механизмов генерации и рекомбинации электронно-дырочных пар носителей заряда, переноса носителей заряда через активную область (включая термоэлектронный ток эмиссии) и уравнений непрерывности для электронов и дырок. При моделировании  $p-i-n$ -фотоструктуры использовался метод Гуммеля, позволяющий решать каждое полупроводниковое уравнение с независимой линеаризацией относительно основной переменной [12]. Выбор метода определялся минимальными временными затратами на каждый итерационный шаг и точностью результатов при каждом цикле итерации. Первым шагом в построении модели было решение равновесного уравнения Пуассона методом LU-разложения, в качестве входных данных принимали квазиуровни Ферми как функции координат. Метод LU-разложения хорошо подходит для решения задач подобного рода, так как обеспечивает большую сходимость результатов при малом количестве вычислительных затрат [13]. Суть метода LU-разложения состоит в замене матрицы коэффициентов на произведение двух матриц:

$$A = LU,$$

где  $L$  – нижняя треугольная матрица, а  $U$  – верхняя треугольная матрица. Исходная система уравнений  $Ax = b$  принимает вид

$$LUx = b.$$

Это уравнение делится на два:  $Ly = b$  и  $Ux = y$ . Преимущество данного подхода заключается в том, что данные уравнения легко решить: нижнюю треугольную матрицу непосредственно прямой подстановкой, а верхнюю треугольную матрицу – обратной подстановкой.

При нулевом смещении, в состоянии равновесия, решается только уравнение Пуассона, так как известны значение уровня Ферми (которое совпадает со значением квазиуровней Ферми) и выражения для концентрации носителей заряда. Таким образом, получаем уравнение

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = \frac{q}{\varepsilon} \left[ n_i \exp(-q\varphi_n) \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - n_i \exp(-q\varphi_p) \exp\left(-\frac{qV}{k_B T}\right) + N_A - N_D \right].$$

В качестве начальной точки отсчета выбрано значение уровня Ферми и условие равновесия квазиуровней. После преобразований уравнение

принимает вид

$$\frac{d^2 \bar{V}}{d\bar{x}^2} = \frac{n_i}{N} \left[ \exp(\bar{V}) - \exp(-\bar{V}) + \frac{N_A - N_D}{n_i} \right].$$

Далее выбирали начальное предположение для потенциала  $\bar{V}$ , на каждом последующем шаге итерации использовали новые значения потенциала с прибавкой  $\delta V$ . Используя линеаризацию  $\exp(\pm \delta V) \approx 1 \pm \delta V$ , можно получить итоговое уравнение для нахождения потенциала в виде трехдиагональной матрицы:

$$\begin{aligned} \delta V(i-1) - \left[ 2 + \frac{n_i}{N} \Delta^2 x \left[ \exp(\bar{V}(i)) - \exp(-\bar{V}(i)) \right] \right] \delta V(i) + \delta V(i+1) = \\ = -\bar{V}(i-1) + 2\bar{V}(i) - \bar{V}(i+1) + \\ + \frac{n_i}{N} \Delta^2 x \left[ \exp(\bar{V}(i)) - \exp(-\bar{V}(i)) + \frac{N_A - N_D}{n_i} \right]. \end{aligned}$$

На каждом новом итерационном шаге значение потенциала сравнивали с предыдущим шагом до момента достижения заданной точности.

После выполнения расчетов в состоянии равновесия решали нелинейное уравнение Пуассона при приложении внешнего напряжения обратного значения в интервалах от 0 до 2,5 В. В качестве граничного условия принято значение равновесного уровня Ферми. Также были получены значения квазиуровней Ферми для подстановки в уравнение Пуассона для обновления значения потенциала, которое в дальнейшем использовалось при решении уравнений непрерывности [14; 15]. После всех преобразований основные уравнения приняли следующий вид.

Уравнение Пуассона:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = \frac{n_i}{N} \left[ \exp(-\varphi_n) \exp(V) - \exp(-\varphi_p) \exp(-V) + \frac{N_A - N_D}{n_i} \right].$$

Уравнения плотности токов для электронов и дырок:

$$J_n = a_n(x) \frac{\delta}{\delta x} \exp(-\varphi_n),$$

$$J_p = a_p(x) \frac{\delta}{\delta x} \exp(\varphi_p).$$

Уравнения непрерывности токов:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left[ a_n(x) \frac{\delta}{\delta x} \exp(-\varphi_n) \right] = qU(x),$$

$$\frac{\delta}{\delta x} \left[ a_p(x) \frac{\delta}{\delta x} \exp(\varphi_p) \right] = qU(x).$$

Все получаемые результаты на каждом новом итерационном шаге сравнивают с предыдущими до достижения оптимальной установленной точности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Входными параметрами для моделирования послужили толщина проводящих  $n^+$ - и  $p^+$ -слоев GaAs (1,5 мкм), толщина активного слоя InGaAs (8 мкм), спектральный рабочий диапазон, значения фотоотклика в спектральном диапазоне активного слоя и электрофизические характеристики материалов, приведенные в таблице 1.

На первом шаге моделирования были построены графики концентрации носителей заряда в активном слое в состоянии равновесия (рис. 3а) и положения квазиуровней Ферми при приложенном напряжении (рис. 3б). Из полученных графиков видно, что выбранная модель дает адекватные данные на начальном шаге, что говорит об удачном выборе метода решения уравнения Пуассона и основных полупроводниковых уравнений.

Для достижения максимального быстродействия  $p-i-n$ -фотодетектора необходимо при его изготовлении добиться оптимальной степени чистоты активного слоя (оптимальное значение концентрации собственных носителей заряда). Как показали наши исследования, при концентрации собственных носителей в  $i$ -слое порядка  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  достигаются оптимальные условия для работы устройства. При больших концентрациях наблюдается существенная неоднородность в распределении электрического поля (рис. 4), что приводит к флуктуации подвижности сгенерированных носителей заряда на грани-

Таблица 1. Электрофизические параметры моделируемых материалов

Table 1. Electrophysical parameters of simulated materials

Характеристики	In <sub>0,47</sub> Ga <sub>0,53</sub> As	GaAs
Диэлектрическая проницаемость	13,9	12,9
Эффективная масса электронов	0,041 $m_0$	0,063 $m_0$
Эффективная масса дырок	0,45 $m_0$	0,51 $m_0$
Ширина запрещенной зоны	0,74 эВ	1,424 эВ
Собственная концентрация	6,3·10 <sup>11</sup> см <sup>-3</sup>	2,1·10 <sup>6</sup> см <sup>-3</sup>
Подвижность электронов	12000 см <sup>2</sup> В <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>	8500 см <sup>2</sup> В <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>
Подвижность дырок	300 см <sup>2</sup> В <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>	400 см <sup>2</sup> В <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>
Коэффициент диффузии электронов	300 см <sup>2</sup> /с	200 см <sup>2</sup> /с
Коэффициент диффузии дырок	7,5 см <sup>2</sup> /с	10 см <sup>2</sup> /с

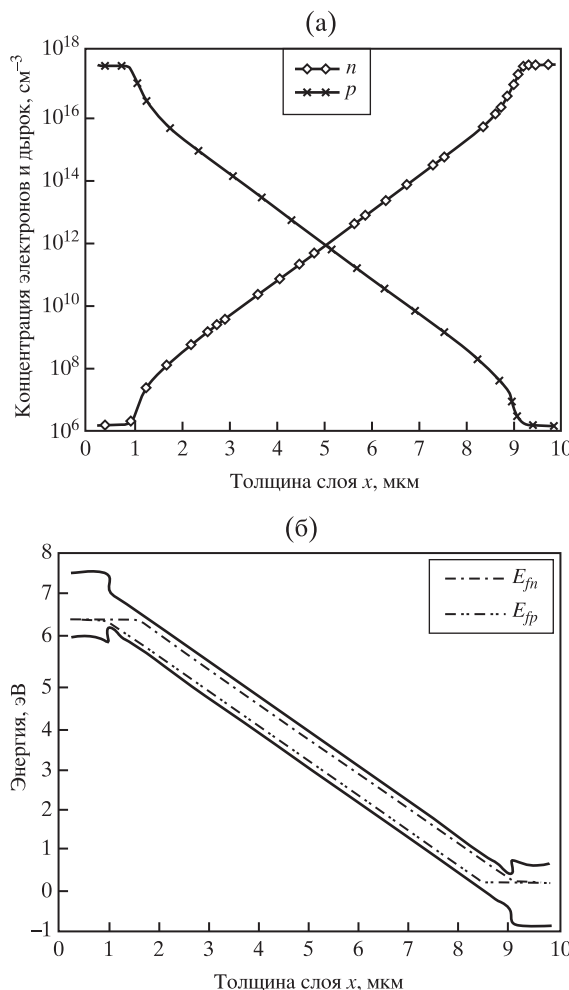
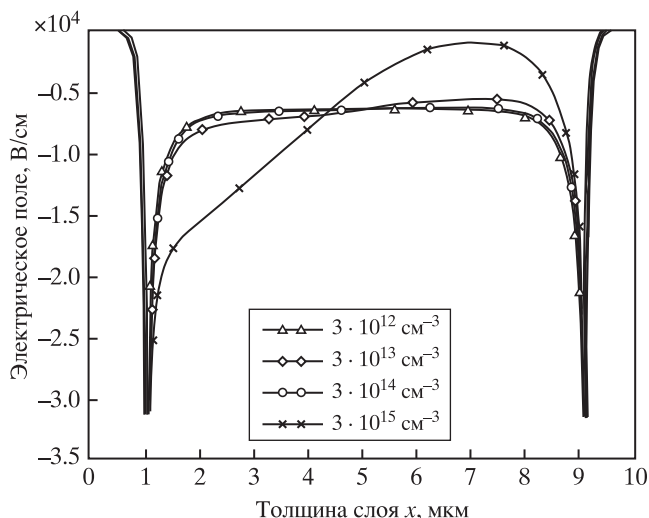


Рис. 3. Распределение носителей заряда в активном слое в состоянии равновесия (а) и положение квазиуровней Ферми при приложенном напряжении (б)

Fig. 3. The distribution of charge carriers in the active layer in a state of equilibrium (a), the position of quasi-Fermi levels in the applied voltage (б)

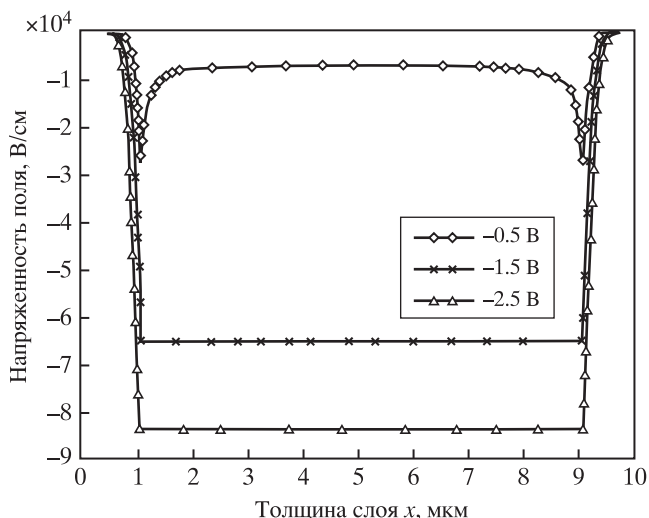
цах гетеропереходов. У границы  $p^+$  напряженность электрического поля минимальна, таким образом, скорость движения генерируемых в данной области носителей заряда будет много меньше за счет уменьшения их подвижности, что в свою очередь ухудшает зависимость спектрального отклика фотодетектора в зоне рабочих длин волн.

Аналогичная неоднородность наблюдается и при распределении потенциала (рис. 5). Видны скачки потенциала на гетерограницах проводящих слоев и  $i$ -го активного слоя при больших значениях концентрации. Скачки энергии могут препятствовать ускоряющему полю на границах активного слоя, что вызовет нестабильность в разделении фотогенерированных носителей заряда [16]. Из полученных графиков можно наблюдать, что снижение собственной концентрации активного слоя до зна-



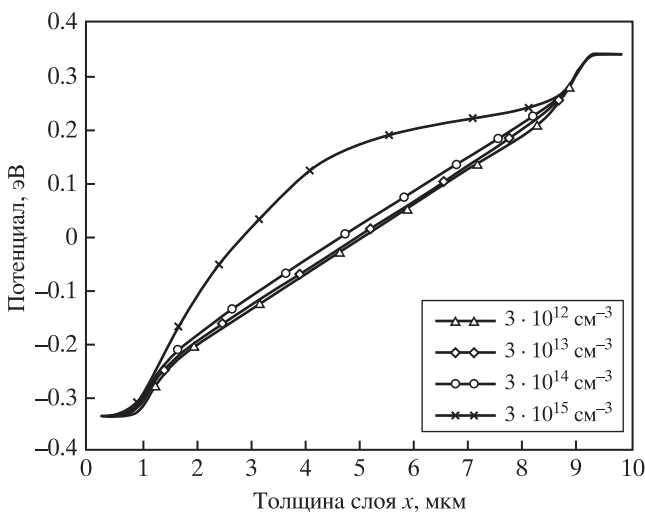
**Рис. 4.** Распределение электрического поля внутри активного слоя InGaAs в зависимости от степени чистоты

**Fig. 4.** The electric field distribution inside the InGaAs active layer depending on the degree of purity



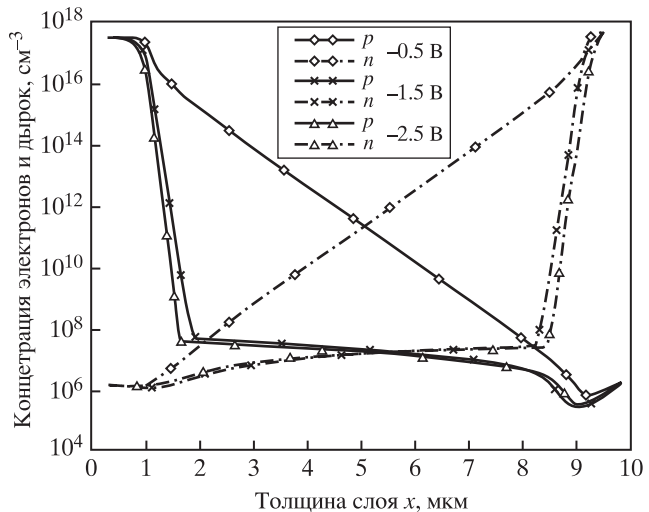
**Рис. 6.** Зависимость напряженности электрического поля от приложенного напряжения обратного смещения в *i*-слое

**Fig. 6.** The dependence of the electric field strength on the applied reverse bias voltage in the *i*-layer



**Рис. 5.** Распределение потенциала в *i*-слое фотодетектора в зависимости от концентрации собственных носителей

**Fig. 5.** The potential distribution in the *i*-layer of the photodetector depending on the concentration of intrinsic carriers



**Рис. 7.** Распределение примеси на гетерограницах и в активном слое в зависимости от приложенного напряжения

**Fig. 7.** The distribution of impurities at hetero-junctions and in the active layer, depending on the applied voltage

чений меньше  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  не вызывает существенных изменений в распределении потенциала и поля внутри слоя. Таким образом, можно выделить оптимальное значение концентрации, ниже которого очистку активного слоя проводить уже нецелесообразно.

При приложении внешнего напряжения величина электрического поля возрастает, и при значениях  $-2,5 \text{ В}$  наступает полное истощение *i*-слоя (рис. 6). При этом концентрация носителей уменьшается согласно распределению на рисунке 7. За счет этого все сгенерированные носители заряда пройдут

через границу перехода практически без рекомбинационных потерь (что обуславливает высокое значение спектрального отклика – до 95%). При этом в уравнениях модели можно пренебречь рекомбинационной составляющей и считать скорость движения носителей соизмеримой с максимальной скоростью дрейфа.

Важным параметром в работе фотодетектора является темновой ток. Значение темнового тока входит практически во все составляющие суммарного шума структуры. В данной работе проведено исследование влияния внешней рабочей темпе-

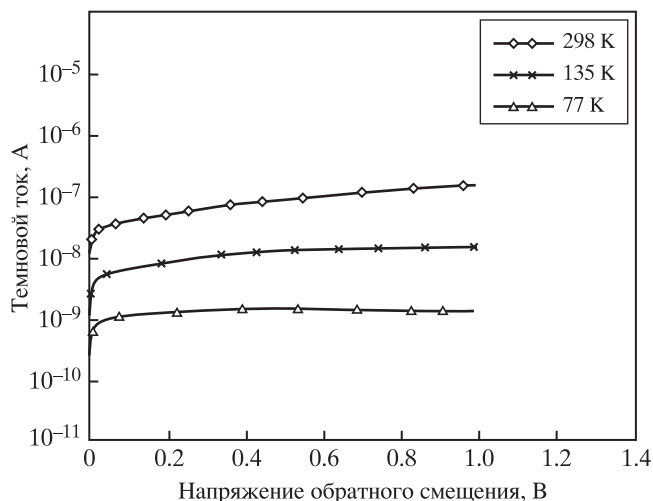


Рис. 8. Влияние внешней рабочей температуры на вольт-амперную характеристику InGaAs  $p-i-n$ -фотодетектора

Fig. 8. The influence of the external operating temperature on the VAC InGaAs  $p-i-n$  photodetector

ратуры на значение темнового тока. На рисунке 8 показаны значения темнового тока при температуре 77 К (предварительно охлаждаемая структура), 135 К и при комнатной температуре. Как видно, при комнатной температуре темновой ток составил  $\sim 10^{-8}$  А, что свидетельствует о преобладании термоэлектронной эмиссии как механизма переноса носителей заряда при больших температурах. Полученные данные отлично согласуются со многими экспериментальными данными и технологическими образцами. Стоит отметить, что промышленные фотодетекторы на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs, получаемые методом MOCVD, достигают значений темнового тока порядка нескольких наноампер [17].

Полученные результаты модели фотодетектора сравнивали с результатами моделей, основанных на других численных методах, и показали более высокую точность [18; 19].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы предложена теоретическая модель гетероструктуры InGaAs/GaAs с толщиной активного слоя 8 мкм. В основе математического аппарата использован метод матричного LU-разложения для решения одномерного уравнения Пуассона. Данный метод показал более высокую эффективность в сравнении с другими численными методами.

Выполненное численное моделирование позволило определить оптимальное значение концентрации носителей заряда в активном  $i$ -слое (порядка  $3 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ ). При больших значениях концентра-

ции наблюдаются энергетические скачки на гетерограницах  $p^+-i$  и  $i-n^+$ , приводящие к нарушению механизмов переноса носителей заряда. Для концентрации  $3 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$  электрическое поле внутри активного слоя распределяется неравномерно (рис. 4), при этом существенно влияя на скорость и подвижность носителей заряда. Анализ темновых вольт-амперных характеристик показал, что увеличение темнового тока с повышением температуры связано с преобладанием термоэлектронной эмиссии. Для аналогичных структур, работающих при 77 К, темновой ток составляет несколько единиц наноампер [18; 19]. В нашей модели удалось получить значение темнового тока  $\sim 10^{-8}$  А при комнатной температуре.

Разработанная модель структуры фотодетектора для ближнего и коротковолнового ИК-диапазона на основе InGaAs/GaAs дает достоверные, подтвержденные результаты и может быть использована для дальнейших исследований в данной области.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Donati S. 1999. *Photodetectors. Devices, Circuits, and Applications*. New York, Prentice Hall: 432–440.
2. Бурлаков И.Д., Гринченко Л.Я., Дирочка А.И., Залетаев Н.Б. 2014. Детекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе InGaAs (обзор). *Успехи прикладной физики*. 2(2): 131–163.
3. Лунин Л.С., Чеботарев С.Н., Пашенко А.С. 2013. Структура нанокластеров Ge на Si(001) при ионно-лучевой кристаллизации. *Неорганические материалы*. 49(5): 457–466.
4. Чеботарев С.Н., Пашенко А.С., Лунин Л.С., Ирха В.А. 2013. Особенности формирования многослойных наноструктур Ge/Si при ионно-лучевой кристаллизации. *Письма в Журнал технической физики*. 39(16): 30–37.
5. Лунин Л.С., Чеботарев С.Н., Пашенко А.С., Дудников С.А. 2013. Взаимосвязь размеров квантовых точек в InAs-QD/GaAs со спектром фотолюминесценции. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 1: 40.
6. Лунин Л.С., Чеботарев С.Н., Пашенко А.С., Болобанова Л.Н. 2012. Ионно-лучевое осаждение фотоактивных нанослоев кремниевых солнечных элементов. *Неорганические материалы*. 48(5): 517.
7. Лунин Л.С., Пашенко А.С. 2011. Моделирование и исследование характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе GaAs и GaSb. *Журнал технической физики*. 81(9): 71–76.
8. Лунин Л.С., Сысоев И.А., Алфимова Д.Л., Чеботарев С.Н., Пашенко А.С. 2011. Фотолюминесценция гетероструктур  $i$ -GaIn $_{1-x}$ As/ $n$ -GaAs со стохастическим массивом квантовых точек InAs. *Неорганические материалы*. 47(8): 907–910.
9. Лунин Л.С., Сысоев И.А., Алфимова Д.Л., Чеботарев С.Н., Пашенко А.С. 2011. Исследование фоточув-



- ствительных гетероструктур InAs/GaAs с квантовыми точками, выращенных методом ионно-лучевого осаждения. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 6: 58–62.
10. Пашенко А.С., Чеботарев С.Н., Лунин Л.С. 2015. Транспорт носителей заряда в многослойных гетероструктурах InAs/GaAs с квантовыми точками, полученных ионно-лучевой кристаллизацией. *Неорганические материалы*. 51(3): 243–247.
  11. Чеботарев С.Н., Пашенко А.С., Williamson A., Лунин Л.С., Ирха В.А., Гамидов В.А. 2015. Ионно-лучевая кристаллизация наноструктур InAs/GaAs(001). *Письма в ЖТФ*. 41(13): 102–110.
  12. Williams K.J., Esman R.D. 1996. Nonlinearities in  $p-i-n$  Microwave Photodetectors. *Journal of Lightwave Technology*. 14: 84–96.
  13. Gummel H.K. 1964. A self-consistent iterative scheme for one-dimensional steady state transistor calculation. *IEEE Trans. Electron. Devices*. 11: 455–465.
  14. Vasilevska D., Stephen M.G. 2006. *Computational Electronics*. Morgan & Claypool: 208 p.
  15. Ahmadreza Daraei, Seyed Mohsen Izadyar, Naser Chenarani. 2012. Simulation and Analysis of Carrier Dynamics in the InAs/GaAs Quantum Dot Laser, Based upon Rate Equations. *Optics and Photonics Journal*. 3: 112–116.
  16. Zhengmao Ye, Joe C. Campbell. 2002. Voltage-controllable multiwavelength InAs quantum-dot infrared photodetectors for mid- and far-infrared detection. *Journal of Applied Physics*. 92(7): 4141–4143.
  17. Nikhil Ranjan Das, Senior Member, M. Jamal Deen, Fellow. 2005. A Model for the Performance Analysis and Design of Waveguide  $p-i-n$  Photodetectors. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 53(4).
  18. Tosi A., Acerbi F., Dalla Mora A., Itzler M.A., Jiang X. 2011. Active Area Uniformity of InGaAs/InP Single-Photon Avalanche Diodes. *IEEE photonics journal*. 3: 31–41.
  19. Diponkar Kundu, Dilip Kumar Sarker, Md. Galib Hasan, Pallab Kanti Podder, Md. Masudur Rahman. 2012. Performance Analysis of an InGaAs Based  $p-i-n$  Photodetector. *International Journal of Soft Computing and Engineering*. 2(1): 316–322.

## SIMULATION OF InGaAs/GaAs HETEROSTRUCTURE FOR NEAR INFRARED PHOTODETECTORS

**E.E. Blokhin, D.A. Arustamyan, D.L. Alfimova**

A theoretical model and a design of a photodetector of shortwave and near infrared range (from 900 to 1700 nm) based on InGaAs/GaAs heterostructure is developed. The proposed construction of the photodetector comprises a substrate of pure GaAs, the lower conductive layer  $n^+$ -layer of GaAs, doped with tellurium, active  $i$ -layer of InGaAs, upper conductive  $p^+$ -layer of GaAs, doped with zinc. The thickness of the layers to build the model for active  $i$ -layer of InGaAs was 8  $\mu\text{m}$ , for conductive layers ( $n^+$ -layer of GaAs and  $p^+$ -layer of GaAs) – 1.5  $\mu\text{m}$ . The theoretical model is based on the method of LU decomposition of the matrix, which allows to solve the basic semiconductor equations and Poisson's equation, and to achieve sufficiently accurate results when compared to other numerical methods (Newton and Gauss–Seidel) with the minimum number of iterative steps. According to the results of numerical modeling the distribution of potential and an electric field in the active layer structure depending on the concentration of the residual impurity of  $i$ -layer in the range of  $3 \cdot 10^{12}$  to  $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  was investigated. It offers the best value of the concentration of the active layer of  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , after which the process to carry out the processing of the material is already inappropriate. It has been ascertained that in case of the reverse bias voltage of 2.5 V there is depletion of the active  $i$ -layer of InGaAs with a decrease in the concentration of charge carriers by several orders. Due to the resulting electric field distribution in the active layer of InGaAs, it became possible to determine the value of the electric field of the order of  $8.5 \cdot 10^4 \text{ V/cm}$  for the reverse bias voltage of 2.5 V. The influence of the external operating temperature (77, 135 and 297 K) on the properties of the photodetector was studied. It was indicated that the increase in temperature leads to the increase in the dark current to  $10^{-8} \text{ A}$ .

**Key words:** IR photodetectors of near and short-waves, high-speed photodetectors, MatLab.

## REFERENCES

1. Donati S. 1999. *Photodetectors. Devices, Circuits, and Applications*. New York, Prentice Hall: 432–440.
2. Burlakov I.D., Grinchenko L.Ya., Dirochka A.I., Zaletaev N.B. 2014. [Detectors of short-wave infrared range based on InGaAs (Overview)]. *Uspekhi prikladnoy fiziki*. 2(2): 131–163. (In Russian).
3. Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S. 2013. [The structure of Ge nanoclusters on Si (001) with ion-beam crystallization of inorganic materials]. *Neorganicheskie materialy*. 49(5): 457–466. (In Russian).
4. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Irkha V.A. 2013. [Specific features of formation of Ge/Si multilayer nanostructures with the ion-beam crystallization]. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*. 39(16): 30–37. (In Russian).
5. Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Dudnikov S.A. 2013. [The interrelations of dimensions of quantum dots in InAs-QD/GaAs with photoluminescence spectrum]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnyye i neytronnyye issledovaniya*. 1: 40. (In Russian).
6. Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Bolobanova L.N. 2012. [Ion-beam deposition of photoactive nanolayers of silicon solar cells]. *Neorganicheskie materialy*. 48(5): 517. (In Russian).
7. Lunin L.S., Pashchenko A.S. 2011. [Simulation and study of the characteristics of photovoltaic cells based on GaAs and GaSb]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 81(9): 71–76. (In Russian).
8. Lunin L.S., Sysoev I.A., Alfimova D.L., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S. 2011. [The photoluminescence of  $i\text{-Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/n\text{-GaAs}$  heterostructures with a stochastic array of InAs quantum dots]. *Neorganicheskie materialy*. 47(8): 907–910. (In Russian).
9. Lunin L.S., Sysoev I.A., Alfimova D.L., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S. 2011. [Research on photosensitive InAs/GaAs heterostructures with quantum dots grown by ion beam deposition]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnyye i neytronnyye issledovaniya*. 6: 58–62. (In Russian).
10. Pashchenko A.S., Chebotarev S.N., Lunin L.S. 2015. [Transport of charge carriers in InAs/GaAs multilayer heterostructures with quantum dots, obtained by ion-beam crystallization]. *Neorganicheskie materialy*. 51(3): 243–247. (In Russian).
11. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Williamson A., Lunin L.S., Irkha V.A., Gamidov V.A. 2015. [Ion-beam crystallization of InAs/GaAs (001) nanostructures]. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*. 41(13): 102–110. (In Russian).
12. Williams K.J., Esman R.D. 1996. Nonlinearities in  $p\text{-i-n}$  Microwave Photodetectors. *Journal of Lightwave Technology*. 14: 84–96.
13. Gummel H.K. 1964. A self-consistent iterative scheme for one-dimensional steady state transistor calculation. *IEEE Trans. Electron. Devices*. 11: 455–465.
14. Vasileska D., Stephen M.G. 2006. *Computational Electronics*. Morgan & Claypool: 208 p.
15. Ahmadreza Daraei, Seyed Mohsen Izadyar, Naser Chenarani. 2012. Simulation and Analysis of Carrier Dynamics in the InAs/GaAs Quantum Dot Laser, Based upon Rate Equations. *Optics and Photonics Journal*. 3: 112–116.
16. Zhengmao Ye, Joe C. Campbell. 2002. Voltage-controllable multiwavelength InAs quantum-dot infrared photodetectors for mid- and far-infrared detection. *Journal of Applied Physics*. 92(7): 4141–4143.
17. Nikhil Ranjan Das, Senior Member, M. Jamal Deen, Fellow. 2005. A Model for the Performance Analysis and Design of Waveguide  $p\text{-i-n}$  Photodetectors. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 53(4).
18. Tosi A., Acerbi F., Dalla Mora A., Itzler M.A., Jiang X. 2011. Active Area Uniformity of InGaAs/InP Single-Photon Avalanche Diodes. *IEEE Photonics Journal*. 3: 31–41.
19. Diponkar Kundu, Dilip Kumar Sarker, Md. Galib Hasan, Pallab Kanti Podder, Md. Masudur Rahman. 2012. Performance Analysis of an InGaAs Based  $p\text{-i-n}$  Photodetector. *International Journal of Soft Computing and Engineering*. 2(1): 316–322.