ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА НА ОСНОВЕ A_3B_5 ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

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

АО «Оптрон», 105187, г. Москва, ул. Щербаковская, 53

В статье представлено описание метода физико-математического моделирования работы лавинного фотодиода (ЛФД) на основе гетероструктуры $InP/InP/InGaAs/InAlAs$. Метод основан на двумерном моделировании $p-i-n-n^+$ диода в программном комплексе САПР, включающий квазигидродинамическую модель, модели переноса носителей заряда (н.з.), лавинообразования и уравнения электрического поля с учётом оптического возбуждения монохроматическим излучением. Представлены расчётные и типичные обратные вольт-амперные (ВАХ) и спектральные характеристики лавинного фотодиода, позволяющие оптимизировать разработку конструкции эпитаксиальных слоёв на основе A_3B_5 гетероструктуры.

Ключевые слова: лавинный фотодиод, приборное моделирование $p-i-n-n^+$ диод, ВАХ A_3B_5 гетероструктур

Сведения об авторах: Зиновьев Максим Анатольевич, m.zinovjev@mail.ru; Дренин Андрей Сергеевич, dasnew@mail.ru; Роговский Евгений Станиславович, handofgod@mail.ru; Абдуллаев Олег Рауфович, abd@optron.ru; Хоруженко Олег Владимирович, main@optron.ru

PHYSICO-MATHEMATICAL MODELING OF THE OPERATION OF AN AVALANCHE PHOTODIODE BASED ON THE A_3B_5 HETEROSTRUCTURE

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

JSC «Optron», 105187, Moscow, Scherbakovskaya street, 53

The article describes the method of physico-mathematical modeling of the operation of an avalanche photodiode (APD) based on the $InP/InP/InGaAs/InAlAs$ heterostructure. The method is based on two-dimensional modeling of the $p-i-n-n^+$ diode in the CAD software complex, which includes a quasi-hydrodynamic model, charge carrier transfer models, avalanche formation and the electric field equation with optical excitation taken into account by monochromatic radiation. Calculated and typical reverse volt-ampere (CVC) and spectral characteristics of the avalanche photodiode are presented, which allow to optimize the development of the construction of epitaxial layers based on the A_3B_5 heterostructure.

Keywords: avalanche photodiode, instrument simulation $p-i-n-n^+$ diode, I-V characteristic of A_3B_5 heterostructures

Data of authors: Zinoviev Maxim Anatolievich, m.zinovjev@mail.ru; Drenin Andrey Sergeevich, dasnew@mail.ru; Rogovskiy Evgeny Stanislavovich, handofgod@mail.ru; Abdullaev Oleg Raufovich, abd@optron.ru; Khoruzhenko Oleg Vladimirovich, main@optron.ru

Введение

Задача измерения расстояния между объектами была и остаётся актуальной. На сегодняшний день системы для высокоточных измерений объектов находят достаточно широкое применение в различных областях науки и техники, включая строительство, геодезию, военное дело, различные виды

транспорта (наземный, морской, воздушно-космический). Основные усилия разработчиков дальнометрической аппаратуры направлены на повышение точности, быстродействия, стабильности работы при различных погодных условиях и уменьшении энергопотребления [1]. Важнейшими элементами

дальнометрических систем являются твердотельные фотоприёмники (ФП), в основе которых лежат полупроводниковые p - i - n или p^+ - n - n^+ структуры [2].

Среди применяемых материалов A_3B_5 можно выделить твёрдый раствор InGaAs (состав 53 % InAs), позволяющий создавать фотоприёмные устройства (ФПУ) с обнаружительной способностью на уровне $10^{-13} \text{ смГц}^{1/2}\text{Вт}^{-1}$ [3, 4]. Это тройное соединение имеет ширину запрещённой зоны $\sim 0,75 \text{ эВ}$ и обладает возможностью бездефектного выращивания слоёв на подложках InP методом МОС-гидридной эпитаксии благодаря совпадению по параметру постоянной решётки ($\sim 5,85 \text{ \AA}$) [4].

В приборах на основе InGaAs существуют проблемы, связанные с темновыми токами, которые можно решать путём оптимизации конструкции приборов при помощи численного моделирования [5, 6].

Целью данной работы является разработка мезопланарной конструкции высокочувствительного ЛФД ближнего ИК-диапазона для лазерной дальнометрии при помощи коммерческого инструмента TCAD.

Конструкция ЛФД

На рис. 1 представлена типичная разрабатываемая модель исследуемой структуры:

- локальный двойной диффузионный p - n -переход, в котором p^+ -слой образован легированием цинка, или сплошной высоколегированный p^+ -слой с концентрацией $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, обеспечивающий омический p^+ -контакт;

- нелегированный n -слой InP ;
- зарядовый n -слой на основе широкозонного $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ или InP ;
- поглощающий узкозонный слой $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$;
- буферный слой (stop-слой);
- подложка n^+ - InP $\langle 100 \rangle$ с концентрацией $(2 \cdot 5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Для изготовления ЛФД была исследована мезоструктурная технология [4-6]. Её преимущества заключаются в отсутствии взаимосвязи между отдельными фоточувствительными элементами, возможности использования селективного травления и отсутствии систем охранных колец для снижения сигналов шумового тока, влияющего на предельную обнаружительную способность фотоприёмника.

Способ получения A_3B_5 гетероструктур

Гетероэпитаксиальные структуры $\text{InGaAs}/\text{AlInAs}$ получены методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках InP . Исследуемая гетероструктура $\text{InP}/\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ типа p^+ - n - n^+ включает в себя: широкозонную легированную кремнием (Si) подложку InP n -типа проводимости толщиной 350...600 мкм с концентрацией n^+ -слоя $(1...5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; поглощающий узкозонный нелегированный i -слой $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$; легированный слой умножения InAlAs/InP и высоколегированный цинком (Zn) слой InP p^+ -типа проводимости с концентрацией $(1...5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для получения омического контакта.

Рис. 1

Модель разрабатываемой структуры лавинного фотодиода

Рис. 2

Структурная схема процессов, протекающих в зоне роста гетероэпитаксиальных слоёв:
1 — адсорбция атомов из зоны смешивания на поверхности; 2 — миграция адсорбированных атомов по поверхности; 3 — образование поверхностных зародышей;
4 — термическая десорбция; 5 — встраивание адсорбированных атомов в кристаллическую решётку, замещение; 6 — взаимная диффузия

Сама технология получения тонких плёнок включает следующие процессы, протекающие в зоне роста гетероэпитаксиальных слоёв (рис. 2):

- адсорбцию (прилипание) падающих на подложку атомов или молекул, составляющих выращиваемое соединение;
- миграцию (поверхностную диффузию) адсорбированных атомов по поверхности подложки, которая может сопровождаться диссоциацией молекул выращиваемого соединения;
- встраивание атомов, составляющих гетероструктуру, в кристаллическую решётку подложки или растущий моноатомный слой;
- термическую десорбцию (отрыв) атомов, не встроившихся в кристаллическую решётку;
- образование и дальнейший рост двумерных зародышей кристалла на подложке или поверхности растущего слоя;
- взаимную диффузию атомов, встроившихся в кристаллическую решётку.

Для получения структуры разрабатываемого ЛФД используется эпитаксиальное осаждение слоёв при пониженном давлении в реакторе $P = (150..200)$ с температурой роста $T = (600 \pm 750)^\circ\text{C}$. В качестве источников химических элементов используются: триметилгаллий, триметилиндий, арсин — 20 % в водороде и фосфин — 30 % в водороде. Газом-носителем в данной среде являлся водород.

Управление составом и концентрацией выращиваемых слоёв осуществляется с помощью заслонок, которые перекрывают тот или иной поток

частиц. Если при выращивании структуры нужно резко поменять концентрацию одной и той же примеси, то используют несколько эффузионных ячеек с легирующим веществом, нагретых до различных температур. При увеличении температуры роста до 700°C плотность дефектов может снизиться, при $T = 750^\circ\text{C}$ дефекты отсутствуют, а однородность состава плёнки по площади и её кристаллическая структура определяются однородностью молекулярных пучков.

Модели распределения потенциалов и переноса зарядов

Ниже описаны модели, применяемые при исследовании тестовых структур мезапланарной конструкции ЛФД с использованием коммерческого инструмента TCAD [7].

Модель распределения потенциалов и зарядов базируется на решении уравнения Пуассона:

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

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

В качестве модели переноса н.з. использовалась квазигидродинамическая модель.

$$\vec{J}_{n,p} = q\mu_{n,p}(n\nabla E_{n,p} + kT_{n,p}\nabla n + f_{n,p}^{td}kn\nabla T_{n,p} - 1,5nkT_{n,p}\nabla \ln m_{n,p}), \quad (2)$$

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, К.

Использование квазигидродинамической модели расчёта позволяет учесть пространственные изменения потенциала, сродство к электрону и ширину запрещённой зоны; три последних члена уравнения (2) учитывают изменения градиента концентрации, градиенты температур носителей заряда и вариации эффективных масс.

При расчёте обратных вольт-амперных характеристик ЛФД учитывалось влияние ионизации и вероятность лавинного пробоя каждого слоя гетерозиптаксиальной структуры при помощи модели R. Van Oversaeten и H. De Man «vanOverstraetendeMan» [7].

$$\alpha(E) = \gamma a e^{(-\gamma b/E)}, \quad (3)$$

где γ — коэффициенты статистики Ферми-Дирака, учитывающие влияние ионизации н.з. от распределения поля в структуре; a и b — коэффициенты ударной ионизации; E_0 — пробивное электрическое поле, $\text{В}\cdot\text{см}^{-1}$.

$$\gamma = \frac{\tanh\left(\frac{\hbar\omega_{op}}{2kT_0}\right)}{\tanh\left(\frac{\hbar\omega_{op}}{2kT}\right)}, \quad (4)$$

где T — температура ЛФД, К ($T_0 = 300$ К); $\hbar\omega_{op}$ — коэффициент энергии фотона, выражающий температурную зависимость γ , эВ.

В табл. 1 приведены параметры описательной части модели, вводимые при разработке кода модели.

Комплексный показатель преломления

Для определения спектрального диапазона работы прибора использовалась физическая модель «Transfer Matrix Method» (TMM) [7]. Данная модель позволяет учесть вклад оптической генерации носителей заряда в общем токе с учётом влияния монохроматического излучения, падающего под произвольным углом, мощностью и поляризацией. Однако в модели присутствуют следующие ограничения: каждый слой должен быть однородным, изотропным и оптически линейным, в таком случае вычисляются функции волнового сопротивления. На основании проведённого анализа [4, 8] были определены коэффициенты преломления и поглощения для комплексного показателя преломления материалов InGaAs, AlInAs, InGaAs и InP, заданы на их основе таблицы параметров RTA (Refractive Transparent Absorption) и построены соответствующие зависимости. На рис. 3 приведены графики зависимости коэффи-

Таблица 1

Используемые параметры для модели «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}	7,668e+6	4,816e+6	7,668e+06	4,816e+06	8,6e+6	2,3e+7
	a(high), см^{-1}						
	b(low), $\text{В}\cdot\text{см}^{-1}$	2,9759e+6	2,511e+6	2,9759e+06	2,511e+06	3,5e+6	6,4e+5
	b(high), $\text{В}\cdot\text{см}^{-1}$						
Пробивное электрическое поле	E_0 , $\text{В}\cdot\text{см}^{-1}$	4e+5	4e+5	2e+5	2e+5	8e+5	8e+5
Коэффициент энергии фотона, выражающий температурную зависимость	$\hbar\omega_{op}$, эВ	0.038	0.038	0.034	0.034	0.001	0.001

Рис. 3

Графики зависимости коэффициентов действительной (n) и мнимой (k) части комплексного показателя преломления для $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$ и InP от длины волны

циентов действительного (n) и мнимого (k) показателей преломления для комплексного показателя преломления от длины волны.

Моделирование работы ЛФД

Согласно приведённому выше описанию был проведён сравнительный анализ ВАХ, полученной аналитическим расчётным методом, с экспериментальной обратной ВАХ структуры ЛФД G8931–20 Hamamatsu [9, 10] (рис. 4).

По результатам анализа наблюдается корреляция расчётной и полученной экспериментальным путём ВАХ [10]. На рассматриваемую конструкцию ЛФД G8931–20 подавался оптический поток плотностью $0,01 \text{ Вт/см}^2$ (длина волны $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$).

Послойная структура ЛФД G8931–20 с размером входного окна 200 мкм [11, 12] состоит из:

1. Контактного слоя: InP p^+ -типа с концентрацией $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 1 мкм .
2. Слоя умножения: InP n -типа с концентрацией $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и толщиной $0,5 \text{ мкм}$.

Рис. 4

Графики экспериментальной и расчётной ВАХ при обратном смещении для G8931–20 (Hamamatsu Photonics K.K.)

3. Переходного зарядового слоя: InGaAsP n -типа с концентрацией $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 0,175 мкм.
4. Активного слоя: $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ n -типа с концентрацией $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 1 мкм.
5. Подложки: InP n^+ -типа с концентрацией $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 350 мкм.

Из рис. 4 видно, что на участке ~ 15 В присутствует повышение темнового тока. Моделирование показало сильную зависимость данного участка ВАХ от толщин слоёв — контактного слоя, слоя умножения и зарядового слоя. Просадка по уровню тока зависит от технологии изготовления структуры, на которую оказывает влияние наличие охранных колец в рабочей зоне структуры G8931–20 и качество структуры, из которой изготовлен прибор.

После корректировки алгоритма на исследуемом ЛФД был выполнен последовательный расчёт структуры с диаметром входного оптического

окна 100 мкм, минимальным диаметром контакта 110 мкм, мезой диаметром 120 мкм (табл. 2).

На рис. 5 представлены графики расчётных ВАХ тестовых структур разрабатываемого ЛФД.

Проведённый анализ показал, что расчётные ВАХ тестовых структур, разрабатываемых ЛФД, имеют значения темнового тока в 20–30 раз меньше, чем у зарубежного аналога (G8931–20), при этом значения фототоков отличаются не больше чем в 3–4 раза. В результате того, что в ходе исследования на разрабатываемом ЛФД была уменьшена светочувствительная площадь в 4 раза ($R_{\text{G8931-20}} = 100 \text{ мкм}$, $R_{\text{ЛФД}} = 50 \text{ мкм}$), наблюдается изменение диапазона рабочего напряжения на разработанных тестовых структурах в сторону уменьшения в зависимости от изменения концентраций слоёв «Multiplication» и «Charge». Так, например, участок рабочего смещения для 4-го типа тестовой структуры начинается с (10...12) В в отличие от зарубежного аналога (15...17) В.

Таблица 2

Исходные параметры тестовых структур разрабатываемого ЛФД

Слой	Материал, тип	Концентрация, см^{-3} / толщина, мкм							
		Структура 1		Структура 2		Структура 3		Структура 4	
Contact	InP, p^+	$2 \cdot 10^{18}$	1	$2 \cdot 10^{18}$	1	$2 \cdot 10^{18}$	1	$2 \cdot 10^{18}$	1
Multiplication	InP, n	$1 \cdot 10^{16}$	0,8	$1 \cdot 10^{15}$	0,8	$1 \cdot 10^{15}$	0,8	$1 \cdot 10^{15}$	0,8
Charge	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, n	$1 \cdot 10^{17}$	0,7	$1 \cdot 10^{17}$	0,7	$1 \cdot 10^{17}$	0,7	$5 \cdot 10^{16}$	0,9
Active	$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, n	$1 \cdot 10^{15}$	1,5	$1 \cdot 10^{15}$	1,5	$1 \cdot 10^{15}$	1,5	$1 \cdot 10^{15}$	1,6
Stopped	$\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$, n	$1 \cdot 10^{16}$	0,5	$1 \cdot 10^{16}$	0,5	$1 \cdot 10^{16}$	0,5	$1 \cdot 10^{15}$	0,5
Substrate	InP, n^+	$2 \cdot 10^{18}$	350	$2 \cdot 10^{18}$	350	$2 \cdot 10^{18}$	350	$2 \cdot 10^{18}$	350

Рис. 5

Расчётные ВАХ тестовых структур разрабатываемого ЛФД

Рис. 6

Спектральная характеристика тестовых структур ЛФД

В ходе исследования была получена спектральная характеристика разработанного ЛФД. На рис. 6 показана зависимость токовой чувствительности тестовых структур при обратном внешнем смещении с коэффициентом умножения $M = 10$, который определяется по эмпирической формуле:

$$M = \frac{1}{(1(U/U_b)^n)}, \quad (5)$$

где U — напряжение внешнего обратного смещения, В; U_b — напряжение обратного смещения, при котором наступает электрический пробой, В; n — целое число в диапазоне от 3 до 6.

Результаты моделирования показали, что конструкция тестовой структуры 4 по токовой чувствительности на 4 и более единиц (А/Вт) превышает значения данного параметра остальных исследуемых тестовых структур. В сравнении с импортным аналогом G8931–20, у которого токовая чувствительность при $M = 10$ на длине волны 1,55 мкм равна 9 А/Вт [12], превышает на 3 А/Вт.

Заключение

В результате исследования был разработан комплекс методов для моделирования лавинных фотодиодов на основе $InP/InAlAs/InGaAs/InP$, позволяющий в значительной степени сократить время разработки фоточувствительных элементов данного типа. В работе представлены параметры тестовых структур разрабатываемого ЛФД с вольт-амперными и спектральными характеристиками, позволяющие достичь десятикратного уменьшения темнового тока с увеличенным фотоответом на основе прямозонных материалов A_3B_5 . На тестовой структуре 4 разрабаты-

ваемого ЛФД были достигнуты следующие результаты: рабочее напряжение ~50 В, темновой ток ~10 нА с диаметром входного окна 100 мкм и токовой чувствительностью на длине волны 1,55 мкм, равной 11,5 А/Вт. В составе структуры присутствует широкозонный слой $InAlAs$, позволяющий снизить токи утечки.

Литература

1. Park J. K., Yun I. Modeling of avalanche gain for high-speed $InP/InGaAs$ avalanche photodiodes // *Electron Devices and Solid-State Circuits*, 2008.
2. Коновалов Г. Г. Создание и исследование высокоэффективных быстродействующих фотодиодов для средней ИК-области спектра (2-5 мкм) на основе узкозонных гетероструктур A^3B^5 // Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, 2014.
3. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В. Исследование фотодиодных лавинных элементов матричных фотоприёмных устройств на основе гетероэпитаксиальных структур $InGaAs$ // *Успехи прикладной физики*. — 2014. — Т. 2, № 4. — С. 374-382.
4. Anne M. Itsuno «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. Sudo H., Suzuki M. Surface degradation mechanism of $InP/InGaAs$ APDs // *Journal of Lightwave Technology*, 1988.
6. Chen J., Zhang Z., Zhu M., Xu J., Li X. Optimization of $InGaAs/InAlAs$ Avalanche Photodiodes // *Nanoscale Res Lett*, 2017.

7. Synopsys «Sentaurus Device User Guide». — 2009.
8. «NSM Archive — Physical Properties of Semiconductors». — URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html> (дата обращения: 24.08.2017).
9. Hasko D., Kovac J., Uherek F., Skriniarova J., Jakabovic J., Peternai L. Design and Properties of InGaAs/InGaAsP/InP avalanche photodiode // Journal of Electrical Engineering, 2007, vol. 58, № 3, pp. 173-176.
10. Park J. K., Yun I. Modeling of Avalanche Gain for High-speed InP/InGaAs Avalanche Photodiodes // IEEE — 978—1—4244—2540—2/08 — 2008.
11. Parks J., Brennan K., Tarof L. Macroscopic Device Simulation of InGaAs/InP Based Avalanche Photodiodes // VLSI Design, 1999, vol. 6, Nos. (1-4), pp. 79-82.
12. Hamamatsu Photonics K. K. — URL: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/alpha/I/4111/G8931-04/index.html#1328449175207> (дата обращения: 17.01.2017).
- heteroepitaxial structures. *Ushekhii prikladnoy fiziki* [Successes of Applied Physics], 2014, vol. 2, № 4, pp. 374-382.
4. Anne M. Itsuno «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. Sudo H., Suzuki M. Surface degradation mechanism of InP/InGaAs APDs // Journal of Lightwave Technology, 1988.
6. Chen J., Zhang Z., Zhu M., Xu J., Li X. Optimization of InGaAs/InAlAs Avalanche Photodiodes // Nanoscale Res Lett, 2017.
7. Synopsys «Sentaurus Device User Guide». — 2009.
8. «NSM Archive — Physical Properties of Semiconductors». — URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html> (accessed 24 August 2017).
9. Hasko D., Kovac J., Uherek F., Skriniarova J., Jakabovic J., Peternai L. Design and Properties of InGaAs/InGaAsP/InP avalanche photodiode // Journal of Electrical Engineering, 2007, vol. 58, №3, pp. 173-176.
10. Park J. K., Yun I. Modeling of Avalanche Gain for High-speed InP/InGaAs Avalanche Photodiodes // IEEE — 978—1—4244—2540—2/08 — 2008.
11. Parks J., Brennan K., Tarof L. Macroscopic Device Simulation of InGaAs/InP Based Avalanche Photodiodes // VLSI Design, 1999, vol. 6, Nos. (1-4), pp. 79-82.
12. Hamamatsu Photonics K. K. — URL: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/alpha/I/4111/G8931-04/index.html#1328449175207> (accessed 17 January 2017).

References

1. Park J. K., Yun I. Modeling of avalanche gain for high-speed InP/InGaAs avalanche photodiodes // Electron Devices and Solid-State Circuits, 2008.
2. Konovalov G. G. Creation and measurements of high-performance high-speed photodiodes for mid-IR spectrum (2-5 μm) based on narrow-bandgap A^3B^5 heterostructures. *Fiziko-tekhnicheskiiy institut imeni A. F. Ioffe RAN* [Ioffe Institute, RAS], 2014.
3. Yakovleva N. I., Boltar K. O., Sednev M. V. Investigation of avalanche photodiodes of photodetector arrays based on InGaAs