



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 621.383.525

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12216>**Электрофизические характеристики PIN-фотодиодов диапазона 2.2–2.6 мкм на основе гетероструктур InGa(Al)As/InP с метаморфным буферным слоем****Е. И. Василькова¹✉, Е. В. Пирогов¹, К. Ю. Шубина¹, К. О. Воропаев², А. А. Васильев², Л. Я. Карачинский^{1,3}, И. И. Новиков^{1,3}, О. В. Баранцев¹, М. С. Соболев¹**¹ФГБУ ВОН «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук»
ул. Хлопина, 8к3, лит. А, Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация²АО «ОКБ-Планета»

Большая Московская ул., д. 13а, пом. 1н, Великий Новгород 173004, Российская Федерация

³ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Кронверкский пр., д. 49, лит. А, Санкт-Петербург 197101, Российская Федерация

Аннотация

Благодаря широкому спектру применений в ближнем инфракрасном диапазоне и сравнительно высокой обнаружительной способности, pin-фотодиоды на основе эпитаксиальных гетероструктур InGa(Al)As/InP вызывают интерес исследователей в мире. Рабочий спектральный диапазон подобных фотодетекторов доходит до 2.6 мкм, однако для достижения таких длин волн необходимо осуществлять синтез гетероструктур с включением метаморфных буферных слоев. В данной работе исследуются вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики pin-фотодиодов на основе гетероструктур InGa(Al)As/InP с метаморфным буферным слоем оригинальной конструкции и поглощающим слоем $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$, выращенными методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

Рабочие кристаллы pin-фотодиодов были сформированы стандартными методами пост-ростовой обработки и имели диаметр фоточувствительной площадки диода 140 мкм. Полученные темновые токи и шунтирующие сопротивления составили ~ 300 нА при напряжении -10 мВ и ~ 25 кОм соответственно.

Таким образом, выбранный дизайн метаморфного буферного слоя успешно подавляет появление проникающих дислокаций в активной области гетероструктуры. На основе изготовленных гетероструктур с метаморфным буферным слоем возможно создание инфракрасных фотодетекторов спектрального диапазона 2.2–2.6 мкм.

Ключевые слова: молекулярно-пучковая эпитаксия, метаморфные буферные слои, фотодетекторы ближнего ИК диапазона, вольт-амперная характеристика, вольт-фарадная характеристика, темновые токи

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственных заданий №ФСРМ-2023-0006 и №ФСРМ-2023-0007 и Российского научного фонда в рамках научного проекта №22-79-00146.

Для цитирования: Василькова Е. И., Пирогов Е. В., Шубина К. Ю., Воропаев К. О., Васильев А. А., Карачинский Л. Я., Новиков И. И., Баранцев О. В., Соболев М. С. Электрофизические характеристики PIN-фотодиодов диапазона 2.2–2.6 мкм на основе гетероструктур InGa(Al)As/InP с метаморфным буферным слоем. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(3): 417–423. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12216>

✉ Василькова Елена Игоревна, e-mail: elenvasilkov@gmail.com

© Василькова Е. И., Пирогов Е. В., Шубина К. Ю., Воропаев К. О., Васильев А. А., Карачинский Л. Я., Новиков И. И., Баранцев О. В., Соболев М. С., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

For citation: Vasilkova E. I., Pirogov E. V., Shubina K. Yu., Voropaev K. O., Vasil'ev A. A., Karachinsky L. Ya., Novikov I. I., Barantsev O. V., Sobolev M. S. Electrophysical properties of PIN photodiodes of the 2.2–2.6 μm range based on InGa(Al)As/InP heterostructures with a metamorphic buffer layer. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(3): 417–423. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12216>

1. Введение

Интерес к инфракрасным (ИК) фотодетекторам вызван особенностями этого спектрального диапазона – высокой контрастностью коротковолнового ИК излучения при распространении в земной атмосфере, а также множеством возможных применений ИК фотодетекторов в окнах прозрачности атмосферы в диапазоне 1–3 мкм, включающим в себя спутниковые приложения, приборы ночного видения и тепловизоры, лидары, спектроскопию жидкостей и газов, и другие [1]. Именно поэтому разработка эффективных фотодетекторов ближнего инфракрасного диапазона является перспективным направлением развития науки и техники.

На сегодняшний день наиболее освоен диапазон длин волн до 1.7 мкм, в котором лидерами являются фотодиоды на основе решеточно-согласованных гетероструктур $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$, характеризующиеся более низкими темновыми токами и высокими подвижностями носителей по сравнению с фотодиодами на основе германия (Ge). Однако для многих приложений более востребованным является спектральный диапазон 1.9–2.7 мкм, лежащий между линиями сильного поглощения водяных паров. Здесь, как и в более коротковолновом диапазоне, хорошо показывают себя pin-фотодиоды на основе гетероструктур с активными слоями $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x > 0.53$), выращенными на подложках фосфида индия. Длина волны отсечки у них на данный момент может достигать 2.6 мкм [2; 3]. Однако при переходе от решеточно-согласованной конструкции гетероструктуры к слоям, обогащенным индием, темновые токи фотодиодов резко возрастают на несколько порядков, что приводит к скачкообразному падению их обнаружительной способности [4]. Несмотря на это, технология наногетероструктур InGa(Al)As на подложках InP составляет конкуренцию материалам HgCdTe или InAsSb в спектральном диапазоне 2.2–2.6 мкм, т. к. предоставляет возможность синтеза кристаллически совершенных полупроводниковых структур с высокой однородностью параметров и позволяет применять отработанные процедуры пост-ростовой обработки для формирования кристаллов фотодиодов. Фотодетекторы на основе InGa(Al)As/InP обладают достаточно высокими рабочими характеристиками при комнат-

ной температуре, поэтому не требуют пассивного или активного отведения тепла, что способствует уменьшению размеров конечного прибора и широкому коммерческому распространению.

Сложность в реализации фотодетекторов на основе InGa(Al)As спектрального диапазона 2.2–2.6 мкм по сравнению с фотодетекторами на основе решеточно-согласованных гетероструктур $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ заключается в необходимости получения активных слоев большой толщины (порядка 1–2 мкм) с высоким (до 83 %) содержанием индия. Эпитаксиальный рост таких слоев на InP в псевдоморфном режиме невозможен вследствие накопления слишком больших упругих напряжений деформации [5]. Для стабильного роста относительно толстых слоев $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ на подложках InP требуется искусственно достичь согласования параметров кристаллической решетки рабочего материала и подложки.

Дислокации несоответствия, возникающие в процессе эпитаксиального роста, являются протяженными заряженными дефектами кристаллической структуры и возникают из-за упругих деформаций при росте несогласованных по параметру решетки слоев. Существование дислокаций всегда негативным образом сказывается на характеристиках активных приборов оптоэлектроники, таких как фотодетекторы. В частности, они способствуют снижению напряжения пробоя и увеличению токов утечки во всем диапазоне обратных напряжений смещения [6]. При прорастании дислокаций в активную область фотодиода, они могут выступать в качестве проводящего канала между *p*- и *n*-областями, то есть являться источником закоротки *p-n* перехода. Кроме того, они являются источниками состояний в запрещенной зоне – ловушек для носителей заряда, играющих роль паразитных центров рекомбинации. Способом решения данной проблемы является внедрение между подложкой InP и активной областью InGaAs переходных эпитаксиальных слоев переменного состава – так называемого метаморфного буферного слоя [7]. Основная идея роста метаморфных структур заключается в торможении прорастающих дислокаций в буферных слоях и получении релаксировавшей активной области с низкой плотностью дефектов кристаллической структуры [8–10]. Метаморфные буферные слои предотвраща-

ют прораствание дислокаций в активную область фотодиода с поглощающим слоем $\text{In}_{0.85}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$, тем самым понижая значения темновых токов. Темновые токи, наряду с шунтирующим сопротивлением и собственной емкостью фотодиода, имеют критическое значение при обнаружении малого оптического сигнала и распознавании его среди имеющихся шумов.

Таким образом, актуальным является получение гетероструктур InGa(Al)As/InP для pin-фотоприемников, характеризующихся высоким структурным качеством и малыми темновыми токами, при этом работающих в спектральном диапазоне до 2.6 мкм. Для реализации подобной гетероструктуры был предложен оригинальный дизайн метаморфных буферных слоев InAlAs и осуществлен эпитаксиальный рост тестовых образцов с активной областью высокого структурного качества [11]. В настоящей работе рассматривается влияние разработанной конструкции метаморфного буферного слоя на электрофизические характеристики кристаллов pin-фотодиода.

2. Экспериментальная часть

Образцы гетероструктур с метаморфным буферным слоем для pin-фотодиодов выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии на легированных подложках n^+ - InP (100) качества "epi-ready" с использованием промышленной установки молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) Riber MBE49. Конструкция гетероструктуры для pin-фотодиода изображена на рис. 1. Гетероструктура содержала область p^+ - $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$, слой n^- - $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ толщиной 1500 нм, выступающий в роли i-области поглощения ИК излучения, градиентный метаморфный буферный слой n^+ - InAlAs переменного состава толщиной 2 мкм и решеточно-согласованный слой

p^+ - $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$	20 нм
p^+ - $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$	600 нм
n^- - $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$	1,5 мкм
буфер n^+ - $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ $x=0.52 \rightarrow 0.86$	2 мкм
n^+ - $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	100 нм
подложка n^+ - InP	

Рис. 1. Конструкция гетероструктуры для pin-фотодиода

$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ толщиной 100 нм. Слои от подложки вплоть до активной области InGaAs легировались кремнием (n^+), а контактные слои – бериллием (p^+). Область InGaAs была легирована до степени $(0.5-2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Метаморфный буферный слой $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ был сформирован путем линейного увеличения мольной доли In от 0.52 до 0.86 при постоянной температуре подложки с тремя тонкими вставками $[\text{InAs/InAlAs}] \times 3$ через каждые 0.5 мкм. В конце роста градиентного слоя был осуществлен пиковый отжиг с последующим опусканием температуры подложкодержателя. Подробно технология эпитаксиального выращивания гетероструктуры метаморфного буфера для pin-фотодиода описана в работе [11].

На рис. 2 приведена дифракционная кривая от тестовой структуры. На рентгенодифракционной картине образца присутствуют пики от подложки InP , от слоя InGaAs и метаморфного буфера InAlAs с линейным градиентом состава. Исследования методом рентгеновской дифракции производились на дифрактометре ДРОН-8 с установленным монохроматором Бартельса и острофокусной рентгеновской трубкой с типом излучения $\text{CuK}\alpha_1 = 0.15406 \text{ нм}$. Дифракционный максимум от слоя InGaAs соответствует расчетному максимуму от полностью релаксированного слоя с составом около 83 %.

Для проведения электрофизических измерений на данной гетероструктуре методом взрывной фотолитографии по двойной фоторезистивной маске были сформированы омические контакты p - и n -типа на основе невжигаемой системы металлов Ti/Pt/Au , а также контактные площадки анода и катода на основе металлизации V/Au . Диаметр фоточувствительной площадки диода составил 140 мкм. Фотография изготовленных кристаллов фотодиодов, полученная с помощью оптического микроскопа, представлена на рис. 3. Изготовленные кристаллы pin-фотодиодов затем исследовались электрофизическими методами с использованием микрозондовой установки SUSS MicroTec PM 8 при температуре 295 К.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Вольт-амперные характеристики

Показателем эффективности выбранного дизайна метаморфного буферного слоя может являться темновая вольт-амперная характеристика изготовленного фотодиода. Темновые вольт-амперные характеристики нескольких фотодиодов со средней части пластины представлены

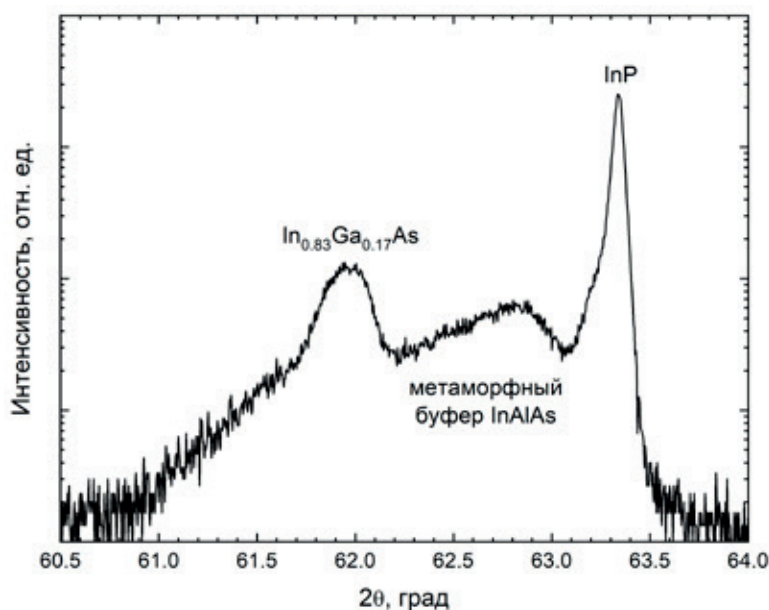


Рис. 2. Рентгенодифракционная кривая гетероструктуры относительно симметричного рефлекса InP (004)

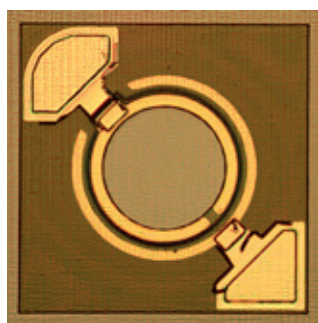


Рис. 3. Фотография кристалла pin-фотодиода

на рис. 4. Они были получены с помощью анализатора полупроводниковых приборов Agilent B1500A в диапазоне напряжений смещения V от -1 до 0.25 В с шагом измерения 5 мВ. На рисунке отчетливо наблюдаются прямая и обратная ветви, имеющие строго асимметричный вид, характерный для диода. Обратная ветвь токов, изначально расположенная в третьем квадранте, была отражена в положительную полуплоскость для удобства отображения в логарифмическом масштабе. Область наиболее резкого возрастания темнового тока находится при малых обратных напряжениях смещения до 100 мВ. Обратной ветви соответствуют низкие значения темновых токов: ~ 10 мкА при обратном напряжении смещения 1 В и ~ 300 нА при 10 мВ соответственно.

Шунтирующее сопротивление фотодиода представляет собой сопротивление несмещенного $p-n$ перехода. На практике оно обыч-

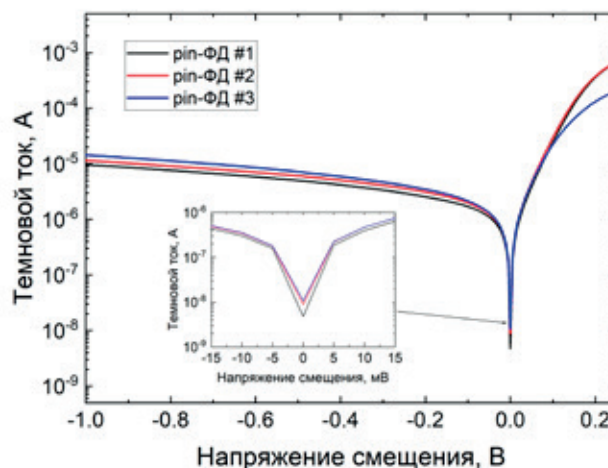


Рис. 4. Темновые вольт-амперные характеристики кристаллов pin-фотодиодов при температуре 295 К

но определяется по значению тока при напряжении смещения 10 мВ $< kT/q$ при комнатной температуре $T = 295$ К (где k – постоянная Больцмана, q – элементарный заряд), в соответствии с законом Ома: $R_0 = \frac{dU}{dI}$. Рассчитанное таким образом шунтирующее сопротивление составило в среднем ~ 25 кОм, что соответствует произведению $R_0 A \sim 4$ Ом·см², где A – площадь поперечного сечения фотодиода.

При воздействии на кристаллы pin-фотодиодов источником инфракрасного излучения с широким спектром с максимумом интенсивности в области 2.5 мкм наблюдалось возрастание значений токов обратной ветви примерно на поря-

док. Этот результат свидетельствует об успешной генерации электронно-дырочных пар в *i*-области фотодиода. Таким образом, продемонстрировано, что выращенная гетероструктура может использоваться для изготовления фотодетекторов ближнего ИК излучения.

Для фотодетекторов темновой ток является наиболее существенным параметром, влияющим на соотношение сигнал-шум и обнаружительную способность. Существует несколько основных механизмов протекания темнового тока в фотодиодах: диффузионный ток неосновных носителей заряда, генерационно-рекомбинационный ток в области обеднения, и ток туннелирования через глубокие примесные уровни [3]. Кроме того, вклад в темновой ток может вносить поверхностная утечка носителей с боковых стенок меза-структуры [12]. Для более точного понимания внутренних процессов в фотодиоде необходимо выявить преобладающий механизм, который может определяться по зависимости величины темнового тока фотодиода от температуры. Эта зависимость в общем виде является экспоненциальной вида $I_T \sim \exp(-E_a/kT)$, однако для различных механизмов темнового тока отличаются энергии активации E_a в показателе экспоненты. Для механизма диффузионного тока энергия активации составляет порядка ширины запрещенной зоны полупроводникового материала E_g , для случая генерационно-рекомбинационного – порядка $E_g/2$, а для туннелирования через глубокие уровни и поверхностных утечек – $E_g/4$ [12]. В литературе было описано преобладающее влияние токов генерационно-рекомбинационной природы и туннелирования через

ловушки [2, 3]. Действительно, твердый раствор InGaAs при высокой доле индия становится узкозонным материалом. Это может быть одной из причин резкого возрастания генерационно-рекомбинационной компоненты темнового тока по сравнению с решеточно-согласованными гетероструктурами. Однако большое количество дислокаций, характерных для гетероструктур с метаморфными буферными слоями, могут являться источником дополнительных уровней в запрещенной зоне. Поэтому вклад в темновой ток имеет смешанную природу. В рамках данной работы удалось наблюдать снижение темнового тока, соответствующего напряжению –10 мВ, в 4 раза при термоэлектрическом охлаждении кристаллов pin-фотодиодов на 10 градусов (рис. 5). Для уточнения механизма, ответственного за величину темнового тока, нужны дополнительные исследования в более широком диапазоне температур до 77 К.

3.2. Вольт-фарадные характеристики

Стандартные вольт-фарадные характеристики pin-фотодиодов были получены микроскопическим методом с помощью прецизионного лабораторного измерителя LCR Agilent E4980A на частотах 200 кГц и 1 МГц в диапазоне напряжений обратного смещения от 0 до 3 В. Типичные вольт-фарадные характеристики представлены на рис. 6. Как видно из рис. 6, вольт-фарадные кривые практически совпадают при различных частотах. Емкость фотодиода в отсутствие смещения составила порядка 14 пФ и далее уменьшалась с увеличением обратного напряжения. В диапазоне обратных напряжений до 2 В кри-

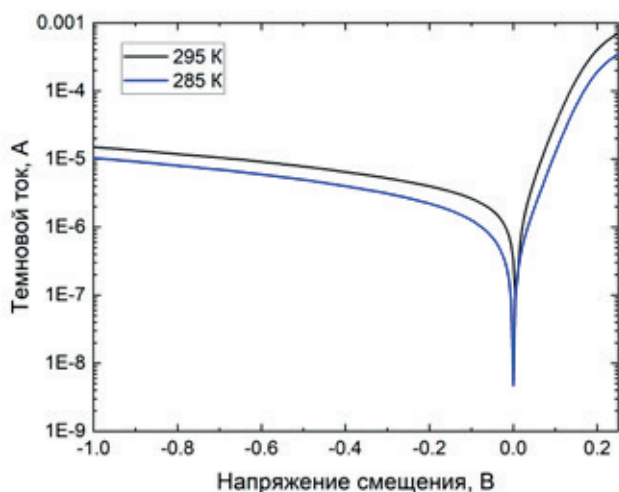


Рис. 5. Темновые вольт-амперные характеристики одного из кристаллов pin-фотодиодов при различных температурах

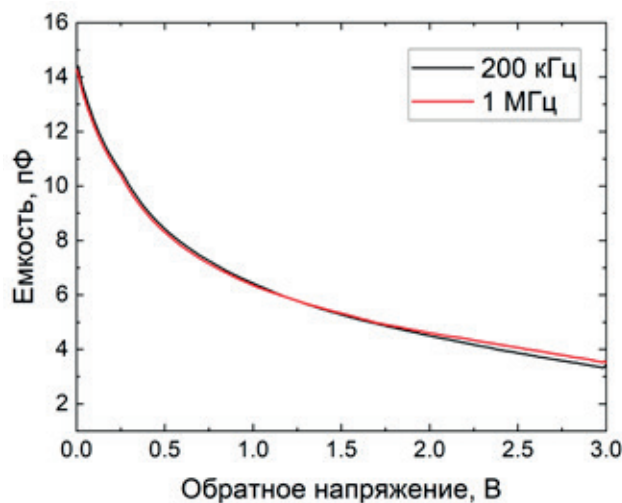


Рис. 6. Вольт-фарадные характеристики кристаллов pin-фотодиодов при 295 К

вые $1/C^2(V)$ характеризуются высокой линейностью с коэффициентом наклона, практически не зависящим от частоты сигнала (рис. 7), что может свидетельствовать о резком характере полученного p - n перехода [13].

4. Заключение

В ходе данной работы были изготовлены кристаллы pin -фотодиодов ближнего ИК диапазона на основе гетероструктур $InAlAs/In_{0.83}Ga_{0.17}As/InP$ с метаморфным буферным слоем. Измеренные электрофизические характеристики кристаллов pin -фотодиодов с диаметром чувствительной площадки 140 мкм составили: темновой ток ~ 300 нА при обратном напряжении смещения 10 мВ, шунтирующее сопротивление ~ 25 кОм, шунтирующая емкость ~ 14 пФ. Сравнительно малые темновые токи являются признаком успешного сдерживания появления проникающих дислокаций в активной области гетероструктуры – основных источников шумов и утечек в активной области прибора. Данные результаты свидетельствуют о перспективности предложенной конструкции метаморфных буферных слоев гетероструктуры для изготовления pin -фотодиодов спектрального диапазона 2.2–2.6 мкм.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. Детекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе $InGaAs$ (обзор). *Успехи прикладной физики*. 2014;2(2). Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21505376>
2. Chen X. Y., Gu Y., Zhang Y. G., ... Zhu Y. $In_{0.83}Ga_{0.17}As$ photodetectors with different doping concentrations in the absorption layers. *Infrared Physics & Technology*. 2018;89: 381–386. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.01.029>
3. Ji X., Liu B., Tang H., ... Yan F. 2.6 μm MBE grown $InGaAs$ detectors with dark current of SRH and TAT. *AIP Advances*. 2014;4(8): 087135. <https://doi.org/10.1063/1.4894142>
4. Rogalski A. Infrared detectors: status and trends. *Progress in Quantum Electronics*. 2003;27(2-3): 59–210. [https://doi.org/10.1016/S0079-6727\(02\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6727(02)00024-1)

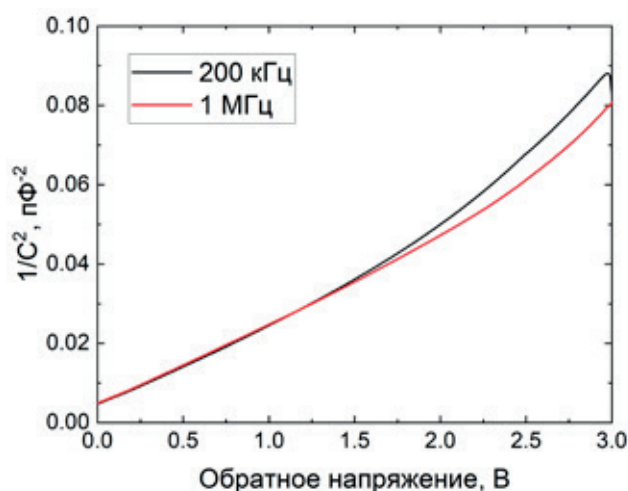


Рис. 7. Зависимость $1/C^2$ от приложенного напряжения для кристаллов pin -фотодиодов при 295 К

5. Gendry M., Drouot V., Santinelli C., Hollinger G. Critical thicknesses of highly strained $InGaAs$ layers grown on InP by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*. 1992;60(18): 2249–2251. <https://doi.org/10.1063/1.107045>

6. Beam E. A., Temkin H., Mahajan S. Influence of dislocation density on IV characteristics of InP photodiodes. *Semiconductor Science and Technology*. 1992;7(1A): A229. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/7/1A/044>

7. Tersoff J. Dislocations and strain relief in compositionally graded layers. *Applied Physics Letters*. 1993;62(7): 693–5. <https://doi.org/10.1063/1.108842>

8. Karachinsky L. Y., Kettler T., Novikov I. I., ... Vasil'Ev A. P. Metamorphic 1.5 μm -range quantum dot lasers on a $GaAs$ substrate. *Semiconductor Science and Technology*. 2006;21(5): 691. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/5/022>

9. Egorov A. Yu., Karachinsky L. Ya., Novikov I. I., Babichev A. V., Berezovskaya T. N., Nevedomskiy V. N. Metamorphic distributed Bragg reflectors for the 1440–1600 nm spectral range: Epitaxy, formation, and regrowth of mesa structures. *Semiconductors*. 2015;49(10): 1388–1392. <https://doi.org/10.1134/S1063782615100073>

10. Egorov A. Yu., Karachinsky L. Ya., Novikov I. I., Babichev A. V., Nevedomskiy V. N., Bugrov V. E. Optical properties of metamorphic $GaAs/InAlGaAs/InGaAs$ heterostructures with $InAs/InGaAs$ quantum wells, emitting light in the 1250–1400-nm spectral range. *Semiconductors*. 2016;50(5): 612–615. <https://doi.org/10.1134/S1063782616050079>

11. Василькова Е. И., Пирогов Е. В., Соболев М. С., Убийвовк Е. В., Мизеров А. М., Середин П. В. Молекулярно-пучковая эпитаксия метаморфного буфера для $InGaAs/InP$ фотодетекторов

с высокой фоточувствительностью в диапазоне 2.2–2.6 мкм. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(1): 20–26. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/10972>

12. Liu Y., Ma Y., Li X., ... Fang J. Surface leakage behaviors of 2.6 μm $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ photodetectors as a function of mesa etching depth. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2020;56(2): 1–6. <https://doi.org/10.1109/JQE.2020.2970745>

13. Sze S. M., Li Y., Ng K. K. *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & Sons; 2021. 994 p.

Информация об авторах

Елена Игоревна Василькова, аспирант, инженер, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-0349-7134>
elenvasilkov@gmail.com

Евгений Викторович Пирогов, н. с., Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-7186-3768>
zzzavr@gmail.com

Ксения Юрьевна Шубина, к. ф.-м. н., н. с., Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-1835-1629>
rein.raus.2010@gmail.com

Кирилл Олегович Воропаев, начальник группы, АО «ОКБ Планета» (Великий Новгород, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6159-8902>
kirill.voropaev@novsu.ru

Андрей Андреевич Васильев, инженер-технолог, АО «ОКБ Планета» (Великий Новгород, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0009-2615-6795>
Wasiliew.andre@yandex.ru

Леонид Яковлевич Карачинский, д. т. н., г. н. с., Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук; в. н. с., Национальный исследовательский университет ИТМО (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-5634-8183>
karach@switch.ioffe.ru

Иннокентий Игоревич Новиков, к. ф.-м. н., с. н. с., Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук; с. н. с., Национальный исследовательский университет ИТМО (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>
novikov@switch.ioffe.ru

Олег Вячеславович Баранцев, студент, лаборант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0001-6873-8488>
ovbarantsev@gmail.com

Максим Сергеевич Соболев, к. ф.-м. н., заведующей лабораторией, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8629-2064>
sobolevsms@gmail.com

Поступила в редакцию 16.11.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023; принята к публикации 06.12.2023; опубликована онлайн 01.10.2024.