

Оптический журнал

Физика полупроводников и элементы оптоэлектроники
Semiconductor physics and optoelectronics elements

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-02-6-22

УДК 539.216

Унипольные барьерные структуры на основе *n*-HgCdTe со сверхрешётками в качестве барьера. Обзор

АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ Войцеховский¹, СТАНИСЛАВ МИХАЙЛОВИЧ Дзядух²,
ДМИТРИЙ ИГОРЕВИЧ ГОРН³✉, НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ МИХАЙЛОВ⁴,
СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ДВОРЕЦКИЙ⁵, ГЕОРГИЙ ЮРЬЕВИЧ СИДОРОВ⁶,
МАКСИМ ВИТАЛЬЕВИЧ ЯКУШЕВ⁷

^{1, 2, 3, 4}Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия
^{4, 5, 6, 7}Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

¹vav43@mail.tsu.ru <https://orcid.org/0000-0002-1196-6199>

²bonespirit@mail2000.ru <https://orcid.org/0000-0003-1853-9533>

³gorn.di@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0308-4011>

⁴mikhailov@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>

⁵dvor@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>

⁶george@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-3449-6548>

⁷yakushev@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>

Аннотация

Предмет исследования. Применение сверхрешёток в качестве барьерных слоёв в унипольных барьерных nBn-структур на основе полупроводникового твёрдого раствора *n*-HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии. **Цель работы.** Определение диапазонов оптимальных значений параметров сверхрешётки (составы и толщины барьерных слоёв и квантовых ям), используемой в качестве барьераного слоя в описанных в литературе унипольных фоточувствительных барьерных nBn-структурах на основе полупроводникового твёрдого раствора *n*-HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии. **Метод.** Для достижения поставленной в работе цели был проведён анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований применения сверхрешёток в качестве барьерных слоёв в унипольных барьерных nBn-структурах на основе теллурида ртути кадмия *n*-HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В силу того, что ab initio моделирование энергетической диаграммы сверхрешёток в целом и сверхрешёток на основе теллурида ртути кадмия HgCdTe, в частности, является крайне трудоёмкой задачей, для оценки применимости сверхрешёток в качестве барьера в nBn-структурах на HgCdTe были проанализированы результаты подобных расчётов, выполненные авторами других работ, а также результаты немногочисленных экспериментальных исследований. На основе данного анализа ставилась целью определить оптимальные значения параметров сверхрешётки. **Основные результаты.** На основе анализа результатов известных на текущий момент теоретических и экспериментальных работ в области применения сверхрешёток в качестве барьера в nBn-структурах на основе *n*-HgCdTe определены диапазоны оптимальных значений параметров сверхрешётки (составы и толщины барьерных слоёв сверхрешётки и квантовых ям). Отдельно отмечена необходимость проведения дополнительных исследований по защите (пассивации) боковых граней при изготовлении экспериментальных образцов в конфигурации мезаструктур для минимизации вклада токов поверхностной утечки в темновой ток

фоточувствительной структуры. **Практическая значимость.** Данная работа преследовала цель проанализировать текущее состояние исследований в рассматриваемой области и сделать вывод о том, какие конфигурации сверхрешёточных барьеров видятся наиболее оптимальными. С учётом того факта, что применение сверхрешёток в барьерах nBn-структур на основе *n*-HgCdTe рассматривается как наиболее перспективный способ устранения потенциального барьера для неосновных носителей заряда, результаты данной работы могут составить основу для разработки конструкций фоточувствительных структур средней и дальней частей инфракрасного спектра диапазонов и последующего создания фотоприёмных элементов.

Ключевые слова: барьера структура, теллурид ртути кадмия HgCdTe, nBn, сверхрешётка, молекулярно-лучевая эпитаксия, униполярная структура, фотоприёмное устройство

Благодарность: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>.

Ссылка для цитирования: Войцеховский А.В., Дзядух С.М., Горн Д.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В. Униполярные барьера структуры на основе *n*-HgCdTe со сверхрешётками в качестве барьера. Обзор // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 6–22. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-6-22>

Коды OCIS: 250.5590, 040.4200, 040.3060.

Unipolar barrier structures based on *n*-HgCdTe with superlattices as a barrier. Review

ALEXANDER V. VOITSEKHOVSKII¹, STANISLAV M. DZYADUKH²,
DMITRY I. GORN^{3✉}, NIKOLAY N. MIKHAILOV⁴, SERGEY A. DVORETSKY⁵,
GEORGY YU. SIDOROV⁶, MAXIM V. YAKUSHEV⁷

^{1, 2, 3, 4}National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

^{4, 5, 6, 7}The Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

¹vav43@mail.tsu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1196-6199>

²bonespirit@mail2000.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1853-9533>

³gorn.di@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0308-4011>

⁴mikhailov@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>

⁵dvor@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>

⁶george@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3449-6548>

⁷yakushev@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>

Abstract

The subject of study is the application of superlattices as barrier layers in unipolar barrier nBn structures based on *n*-HgCdTe grown by molecular beam epitaxy. The aim of study is the analysis of the current state of theoretical and experimental research on the creation of unipolar photosensitive barrier nBn structures based on $Hg_{1-x}Cd_xTe$ grown by molecular beam epitaxy with superlattices as the barrier layer. Method. To achieve the goal set in the work, the results of theoretical and experimental studies of the use of superlattices as the barrier layers in unipolar barrier nBn structures based on *n*-HgCdTe grown by molecular beam epitaxy were analyzed. Due to the fact that ab initio modeling of the energy diagram of superlattices in general and superlattices based on HgCdTe, in particular, is an extremely labor-intensive task, the results of similar calculations performed by other authors, as well as the results of experimental studies that verify these calculations were analyzed for the purpose of assessing the applicability of superlattices as the barrier in HgCdTe nBn structures. The goal was to determine the optimal values of the superlattice parameters based on this analysis. Main results. Based on the analysis of the results of currently known theoretical and experimental work in the field of using superlattices as barriers in nBn structures based on *n*-HgCdTe, the ranges of optimal values of superlattice parameters (compositions and thicknesses of superlattice barrier layers and quantum wells) were determined. The need for additional research on the protection (passivation) of the side

faces during the manufacture of experimental samples in the configuration of mesa structures to minimize the contribution of surface leakage currents to the dark current of the photosensitive structure is noted separately. **Practical significance.** This work was aimed at analyzing the current state of the research in the area under consideration and at concluding about what configurations of superlattice barriers seem to be the most optimal. Taking into account the fact that the use of superlattices in barrier nBn structures based on n -HgCdTe is considered to be the most promising way to eliminate the potential barrier for minority charge carriers, the results of this work can form the basis for developing the design of photosensitive structures in the MWIR and LWIR ranges and the subsequent creation of photodetector elements.

Keywords: barrier structure, HgCdTe, nBn, superlattice, molecular beam epitaxy, unipolar structure, photodetector

Acknowledgment: this work was supported by the Russian Science Foundation, project № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>.

For citation: Voitsekhovskii A.V., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Mikhailov N.N., Dvoretsky S.A., Sidorov G.Yu., Yakushev M.V. Unipolar barrier structures based on n -HgCdTe with superlattices as a barrier. Review [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 91. № 2. P. 6–22. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-6-22>

OCIS codes: 250.5590, 040.4200, 040.3060.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективное развитие тепловизионной техники требует кардинального совершенствования технологии инфракрасных (ИК) фотоприёмных устройств (ФПУ) среднего (3–5 мкм) и дальнего (8–14 мкм) диапазонов. Это развитие в настоящее время связано с переходом на фоточувствительные элементы третьего поколения — матричные фотоприёмные устройства большого формата с повышенными рабочими температурами и расширенными функциональными возможностями (мультиспектральность, сверхмалый размер пикселя, лавинное умножение и т.п.), обеспечивающие сохранение температурной чувствительности и качества ИК изображения. Повышение температуры охлаждения ФПУ позволяет снижать массу, габариты и энергопотребление систем охлаждения, что делает применение таких ФПУ более дешёвым и доступным.

Традиционно для создания фотодиодных матриц среднего и дальнего ИК диапазонов применяются высококачественные гетероэпитаксиальные структуры теллурида ртути кадмия HgCdTe с архитектурами « p^+ на n » и « n^+ на p » [1–3]. Создание же фотоприёмных устройств третьего поколения напрямую связано с разработкой и внедрением новых фоточувствительных полупроводниковых гетероструктур, реализующих низкие темновые токи за счёт подавления отдельных компонент тока и, как следствие, малые собственные

шумы. Создание подобных гетероструктур обеспечивается благодаря развитию методов эпитаксиального выращивания — молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и газофазной эпитаксии из металлоганических соединений (ГФЭМОС) — позволяющих формировать полупроводниковые структуры с наноразмерными, запорными, буферными, барьерными и другими функциональными слоями.

Матричные ФПУ для среднего и дальнего ИК диапазонов обычно имеют гибридную архитектуру — матрицу чувствительных элементов на основе HgCdTe, состыкованную с кремниевой схемой считывания. Рабочие температуры ФПУ, при которых реализуется режим ограничения пороговых характеристик шумами фонового излучения, определяются генерационно-рекомбинационными механизмами в HgCdTe, влияющими на величину темновых токов (шумов). Для подавления темновых токов приходится охлаждать чувствительные элементы фотоприёмных устройств до достаточно низких температур (например, до 77 К при детектировании в дальнем ИК диапазоне). Ключевым условием для создания «высокотемпературного» детектора является минимизация тепловой генерации в активной области без снижения квантовой эффективности.

В работе [4] была предложена барьерная фоточувствительная структура, которую в наиболее простой конфигурации принято обозначать как nBn (унипольярная фоточувствительная

барьерная структура). В случае конфигурации nBn подобная структура состоит из узкозонного контактного *n*-слоя, широкозонного барьера В и узкозонного поглощающего *n*-слоя. За счёт введения широкозонного барьера В при подаче на структуру отрицательного смещения (отрицательный потенциал приложен к контактному слою) возникает потенциальный барьер для электронов (происходит подавление темновых токов основных носителей заряда), но при этом отсутствует энергетический барьер для неосновных носителей заряда (дырок), возникших в результате фотогенерации.

Концепция nBn-структурьбыла впервые реализована на практике для детекторов на основе InAs-соединений (группа A₃B₅) с разрывом зон на гетерограницах 2-го типа [4, 5]. Структура состояла только из слоёв *n*-типа проводимости с нелегированным барьером из InAsSb (или AlAsSb). Особенностью таких детекторов является почти нулевой разрыв валентной зоны на гетерограницах барьера слоя при большой высоте барьера (более 1 эВ) в зоне проводимости. Разработки nBn-детекторов на основе InAs-соединений активно продолжаются [6, 7]. Имеются разработки nBn-структур на основе InGaAs [8, 9].

Наибольший прогресс по nBn-структурям достигнут на основе твёрдого раствора InAsSb, который сочетает в себе преимущества соединения InSb с возможностью достижения новых свойств при переходе к эпитаксиальным слоям InAsSb с барьером на основе гетероперехода InAs_{1-x}Sb_x/InAs_{1-y}Sb_y. Теоретически и экспериментально показано, что nBn-детекторы на основе соединений группы A₃B₅ при полной реализации их потенциальных преимуществ способны конкурировать с традиционными детекторами из HgCdTe [10], особенно в среднем ИК диапазоне.

В настоящее время исследования и разработки nBn-структур для матричных ФПУ ведутся как на основе материалов группы A₃B₅, так и для A₂B₆. В последнем случае используется полупроводниковый твёрдый раствор HgCdTe [10, 11]. HgCdTe является идеальным материалом для создания ИК детекторов, что обусловлено его фундаментальными свойствами. В связи с этим применение концепции униполярных фоточувствительных барьерных структур для случая HgCdTe является вполне оправданным. К тому же, реализация барь-

ных детекторов на основе HgCdTe в конфигурации nBn позволит в технологии изготовления фотодиодов на основе данного материала не прибегать к технологически сложным и дефектообразующим операциям создания слоёв *p*-типа (ионная имплантация, высокотемпературный отжиг) [12].

Среди актуальных фундаментальных задач при разработке nBn-структур на основе Hg_{1-x}Cd_xTe для среднего и дальнего ИК диапазонов можно выделить следующие: формирование эффективного барьера для основных носителей заряда в зоне проводимости для снижения темновых токов, устранение энергетического барьера в валентной зоне в структурах на основе *n*-HgCdTe для повышения квантовой эффективности и чувствительности, а также напрямую связанную с ними задачу анализа механизмов протекания темнового тока [13].

В работе [14] было показано, что ни один из применённых к настоящему моменту подходов, направленных на решение задачи создания минимального барьера для неосновных носителей заряда (дырок) в nBn-структуре, не позволил снизить барьер до величин, обеспечивающих приемлемые значения чувствительности структуры при одновременном сохранении эффективности блокирования основных носителей заряда (электронов) в зоне проводимости. Применение методов зонной инженерии (сложные профили легирующей примеси, использование слоёв с переменным составом на интерфейсах, дельта-легированных слоёв и пр.), а также оптимизация параметров слоёв nBn-структурьбыла (стехиометрический состав, толщина, легирование) и подбор оптимального значения напряжения смещения не привели к желаемым результатам. Количество публикаций по тематике создания nBn-структур на основе HgCdTe в литературе составляет величину порядка ста, при этом число ежегодно выходящих работ систематически снижается уже несколько лет подряд. Это, вероятно, связано, с одной стороны, с тем, что параметрическая оптимизация HgCdTe nBn-структур исчерпала свои возможности в теоретических работах, а, с другой стороны, связано с малым количеством и несистемным характером экспериментальных работ, посвящённых изготовлению nBn-структур на HgCdTe и изучению их свойств. Уменьшение числа работ также, вероятно, связано с тем, что

накопленный теоретический материал вышел за рамки ресурсных возможностей имеющихся в распоряжении исследователей установок эпитаксиального роста. К тому же, очевидно, не каждая научная группа в принципе имеет доступ к технологически сложной и дорогостоящей методике изготовления гетероструктур $HgCdTe$ и ограничивается теоретическими исследованиями. Несмотря на это, авторы одного из последних обзоров достижений nBn ИК детекторов [15] делают вывод о том, что для случая $HgCdTe$ технология барьера детекторов является самой многообещающей для достижения рабочих температур, близких к комнатным.

Ещё одним подходом, не исчерпавшим свой потенциал как в теоретическом, так и в экспериментальном аспектах, является применение сверхрешёточных структур в качестве барьера слоя nBn -структур на основе МЛЭ $HgCdTe$ ($nB(SL)n$ -структуры). Несмотря на незначительное число работ, посвящённых этой теме, можно заключить, что перспектива создания барьера на основе сверхрешётки, эффективно блокирующего ток электронов и не препятствующего протеканию дырочного тока, является теоретически обоснованной.

Реализация данной концепции в теории может позволить полностью решить проблему наличия разрывов валентной зоны на гетерограницах барьера слоя с поглощающим и контактным слоями. С другой стороны, за счёт управляемости свойствами сверхрешётки через составы и толщины слоёв её применение обеспечит высокую вариативность рабочих характеристик фоточувствительных структур без принципиальной модификации технологического режима их выращивания.

При этом следует иметь в виду, что уровень технологического развития методов эпитаксиального выращивания наногетероструктур $HgCdTe$ позволяет изготавливать подобные структуры только с помощью МЛЭ.

Целью настоящей работы было определение диапазонов оптимальных значений параметров сверхрешётки (составы и толщины барьера слоя и квантовых ям), используемой в качестве барьера слоя в описанных в литературе унипольярных фоточувствительных барьерах nBn -структур на основе полупроводникового твёрдого раствора n - $HgCdTe$, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим текущее состояние исследований в области применения в nBn -структур на основе сверхрешёток на $HgCdTe$ с заданными параметрами в качестве барьера слоя.

Впервые идея использовать сверхрешётку в качестве барьера слоя nBn -структур для устранения энергетического барьера для неосновных носителей заряда была высказана в 2015 г. в [16] М. Корутко и др. Авторами работы [16] были проведены теоретические расчёты энергетических диаграмм фоточувствительных структур с составами поглощающих слоёв $x = 0,315$ (для среднего ИК диапазона) и $x = 0,235$ (для дальнего ИК диапазона) со сверхрешётками в качестве барьера.

На рис. 1 показаны рассчитанные зонные диаграммы барьера фоточувствительных структур для среднего и дальнего ИК диапазонов, у которых роль барьера выполняют однородные слои n - и p -типов проводимости — $Hg_{0,4}Cd_{0,6}Te$ для среднего и $Hg_{0,5}Cd_{0,5}Te$ для дальнего ИК диапазонов [16].

На рис. 2 представлены рассчитанные зонные диаграммы барьера фоточувствительных структур для среднего и дальнего ИК диапазонов, у которых роль барьера выполняют сверхрешётки $HgTe/Hg_{0,05}Cd_{0,95}Te$ с различными значениями толщины квантовых ям $HgTe$ — от 1,62 нм (5 монослоёв, МС) до 2,27 нм (7 монослоёв). При этом толщина барьера слоёв $Cd_{0,95}Hg_{0,05}Te$ во всех рассматриваемых случаях составляла величину 9,07 нм (28 монослоёв).

Моделирование, имеющее в своей основе понятие «эффективной ширины запрещённой зоны» в сверхрешётке (фактически энергетическое расстояние между первым уровнем размерного квантования электронов и первым уровнем квантования тяжёлых дырок), показало, что в такой системе при определённом значении ширины квантовой ямы (при толщине слоёв $HgTe$ 1,62 нм для структур среднего и 1,94 нм для структур дальнего ИК диапазонов) возможно полное устранение потенциального барьера в валентной зоне без образования области пространственного заряда. К сожалению, в [16] не даётся информация о том, какое количество периодов сверхрешётки закладывалось при расчётах. Однако из энергетических диаграмм, приведённых на рис. 2, можно определить примерную толщину

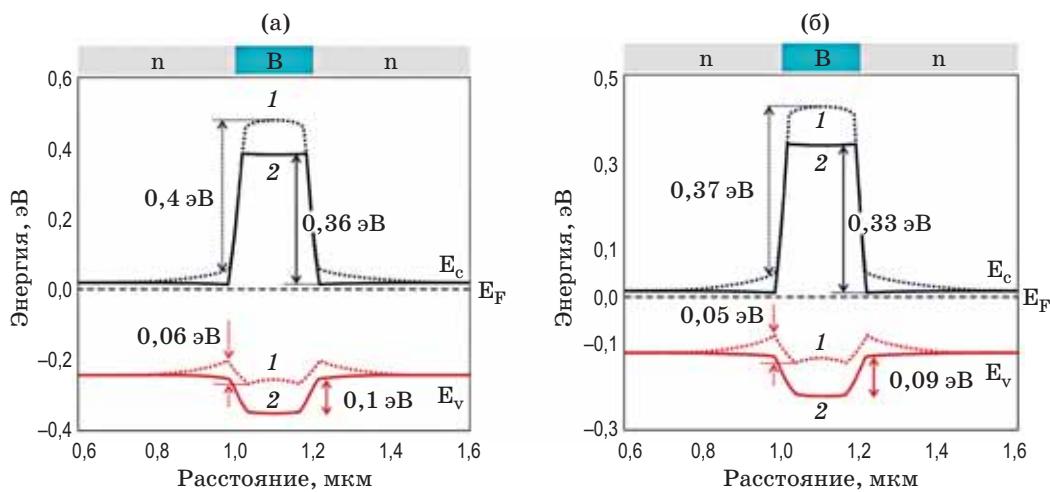


Рис. 1. Рассчитанные зонные диаграммы структур с барьерами *p*- (1) и *n*-типа (2) проводимости для фоточувствительных барьерных nBn-структур для среднего (а) и дальнего (б) ИК диапазонов при температуре 80 К при нулевом внешнем смещении. Состав в барьерном слое: $x = 0,6$; состав в поглощающем слое: $x = 0,315$ (а), $x = 0,235$ (б) (Перепечатано из [16] без изменений. Опубликована в 2015 издательством Springer Nature как статья с открытым доступом)

Fig. 1. Calculated band diagrams of structures with barriers of *p*-type (1) and *n*-type (2) for nBn barrier structures for MWIR (a) and LWIR (b) ranges at a temperature of 80 K at zero external bias. Composition in the barrier layer: $x = 0,6$; composition in the absorbing layer: $x = 0,315$ (a), $x = 0,235$ (b) (Reprinted from [16] without changes. Published in 2015 by Springer Nature as open access)

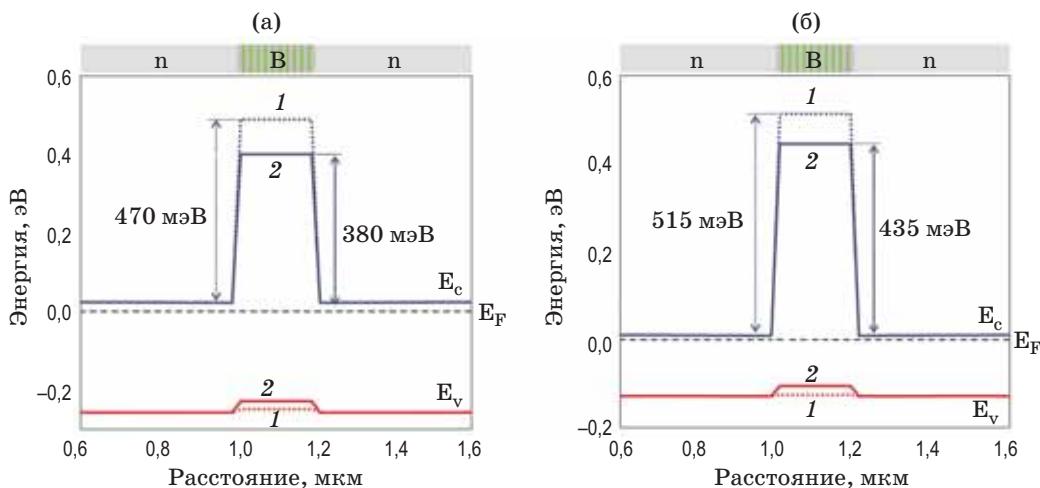


Рис. 2. Рассчитанные зонные диаграммы для фоточувствительных барьерных nBn-структур для среднего (а) и дальнего (б) ИК диапазонов с барьером в виде сверхрешётки при температуре 80 К при нулевом внешнем смещении. Состав в поглощающем слое: $x = 0,315$ (а), $x = 0,235$ (б); параметры сверхрешётки: а — HgTe(5 MC)/CdTe(28 MC) (1), HgTe(6 MC)/CdTe(28 MC) (2), б — HgTe(6 MC)/CdTe(28 MC) (1), HgTe(7 MC)/CdTe(28 MC) (2). Перепечатано из [16] без изменений. Опубликована в 2015 издательством Springer Nature как статья с открытым доступом)

Fig. 2. Calculated band diagrams for photosensitive barrier nBn structures for MWIR (a) and LWIR (b) ranges with a barrier in the form of a superlattice at a temperature of 80 K at zero bias. Composition in the absorbing layer: $x = 0,315$ (a), $x = 0,235$ (b); superlattice parameters: а — HgTe(5 ML)/CdTe(28 ML) (1), HgTe(6 ML)/CdTe(28 ML) (2), б — HgTe(6 ML)/CdTe(28 ML) (1), HgTe(7 MC)/CdTe(28 MC) (2) (Reprinted from [16] without changes. Published in 2015 by Springer Nature as open access)

барьерного слоя — порядка 0,2 мкм. Вероятно, следует предположить, что оценки энергий уровней размерного квантования в сверхрешётке проводились для случая бесконечного числа периодов. Также следует отметить, что в своей модели авторы работы [16] предполагали, что все слои nBn фоточувствительной структуры имеют *n*-тип проводимости с концентрацией доноров $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а квантовые ямы HgTe в сверхрешётке имеют *p*-тип проводимости с концентрацией акцепторов $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

В работе [16] также было продемонстрировано, что варьирование толщины квантовых ям сверхрешётки позволяет управлять положениями краёв энергетических зон в барьере и свести к нулю величину разрывов энергетических зон на гетерограницах «барьер — поглощающий слой» и «контактный слой — барьер» как для структур среднего и дальнего диапазонов. При этом следует иметь в виду, что моделирование проводилось для условий нулевого внешнего смещения. Необходимость использования сверхрешётки в качестве барьера была мотивирована тем, что альтернативный способ устранения барьера для дырок в барьерной струк-

туре на основе HgCdTe — создание барьерного слоя *p*-типа — согласно результатам расчётов приводил к возрастанию темнового тока за счёт вклада генерационно-рекомбинационных механизмов Шокли–Рида–Холла из-за наличия анизотипных гетерограниц.

Оптимальные по мнению авторов работы [16] параметры фоточувствительных nBn-структур со сверхрешётками приведены в табл. 1.

Данные исследования были продолжены в работах [17, 18], в которых этой же группой авторов исследовались аналогичные структуры со сверхрешётками HgTe(HgCdTe)/CdTe при температуре 150–155 К и наличии внешнего смещения. В работах [17, 18] была рассчитана зависимость темнового тока и обнаружительной способности от прикладываемого напряжения для температуры 155 К. В данных работах также приводятся результаты измерения темнового тока структуры со сверхрешёткой HgTe/CdTe в качестве барьерного слоя при температуре 155 К, а также результаты соответствующего расчёта. Экспериментальные образцы, исследуемые в различных работах данной группы, выращивались преимущественно методом ГФЭМОС на установке Aixtron AIX-200.

Таблица 1. Параметры слоёв исследованных в [16] структур
Table 1. Parameters of layers of structures studied in [16]

Структура	Контактный слой	Барьерный слой			Поглощающий слой
		Толщина	Параметры слоёв сверхрешётки	Количество периодов	
Средний ИК диапазон	$d = 1 \text{ мкм}$ $x = 0,315$ $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$	$0,2 \text{ мкм}$	HgTe (1,62 нм, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$)/ Hg _{0,05} Cd _{0,95} Te (9,07 нм, $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$)	18	$d = 5 \text{ мкм}$ $x = 0,315$ $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$
Дальний ИК диапазон	$d = 1 \text{ мкм}$ $x = 0,235$ $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$	$0,2 \text{ мкм}$	HgTe (1,94 нм, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$)/ Hg _{0,05} Cd _{0,95} Te (9,07 нм, $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$)	16	$d = 5 \text{ мкм}$ $x = 0,235$ $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Таблица 2. Параметры слоёв исследованных в [17, 18] структур
Table 2. Parameters of layers of structures studied in [17, 18]

Структура	Контактный слой	Барьерный слой			Поглощающий слой
		Толщина	Параметры слоёв сверхрешётки	Количество периодов	
Средний ИК диапазон	$d = 0,3 \text{ мкм}$ $x = 0,3$ $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$0,05 \text{ мкм}$	HgTe (2,5 нм) / CdTe (9 нм) Нелегированные слои	4	$d = 4 \text{ мкм}$ $x = 0,3$ $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$

Исследования структур со сверхрешётками носили исключительно теоретический характер. Однако в работах [17, 18] приводятся результаты экспериментального исследования подобной структуры, выращенной методом МЛЭ в Университете Западной Австралии.

Толщина ям в рассматриваемой сверхрешётке составляла величину 2,5 нм, а толщина барьера — 9 нм. Детально параметры исследованных структур приведены в табл. 2, а результаты измерения и моделирования темнового тока приведены на рис. 3.

Следует отметить, что приведённые на рис. 3 данные — это первые результаты экспериментального исследования nBn фоточувствительной структуры на основе HgCdTe, выращенного МЛЭ со сверхрешёткой в качестве барьера слоя. Как можно судить из литературы,

данная научная группа более не проводила экспериментальных исследований подобных структур.

Отметим, что авторы работ [16–18] делают вывод о том, что использование сверхрешётки в качестве барьера является перспективным методом устранения потенциального барьера для неосновных носителей заряда.

В работе [19] рассматривалась структура, аналогичная структуре со сверхрешёткой, описанной в [16] (с незначительными отличиями). Существенная часть работы рассматривает выбор оптимальной подложки для выращивания подобных структур. В работе приводятся изображения структуры, полученные при помощи просвечивающей электронной микроскопии, и делается вывод о том, что её качество вполне удовлетворительно. Также авторами [19] отмечается, что на момент написания статьи (2016 год) производится изготовление фоточувствительной структуры на основе выращенной гетероструктуры и её характеристизация. Несколько известно из открытых источников, последующие результаты этой работы в открытой печати опубликованы не были.

Значительное развитие концепции применения сверхрешёток в качестве барьера при реализации барьерных фоточувствительных структур на основе HgCdTe внесла группа учёных из Университета Западной Австралии. Однако работы этой группы носят исключительно теоретический характер, и экспериментальных данных в их публикациях не приводилось.

Работа [20] представляет собой краткое сообщение, посвящённое, главным образом, методу расчёта зависимостей вероятностей туннелирования электронов через барьер от их энергий для нелегированной сверхрешётки CdTe (1 нм)/HgTe (1 нм).

Работа [21] также посвящена моделированию энергетических диаграмм и процессам транспорта носителей в nBn-структурах со сверхрешётками в качестве барьера. В работе показано, что толщина слоя HgTe в сверхрешёточном барьере HgTe/CdTe оказывает существенное влияние на выравнивание краёв зон между поглощающим слоем и барьером. Отмечается необходимость её контроля для того, чтобы одновременно получить большое смещение в зоне проводимости и минимальное смещение

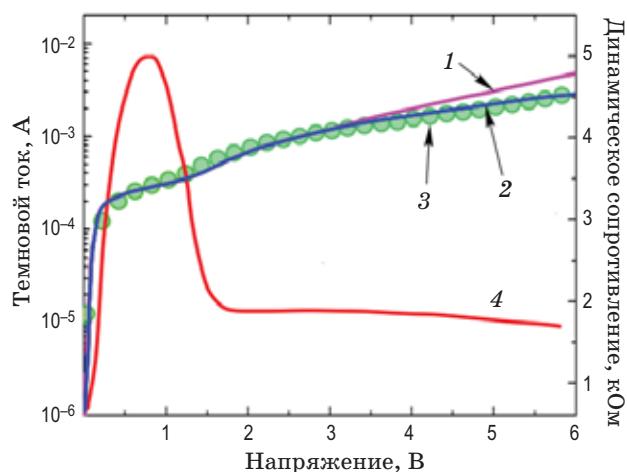


Рис. 3. Рассчитанные (1, 2) и измеренные (3) зависимости темнового тока (I_{dark}), а также рассчитанная зависимость динамического сопротивления (4) от напряжения для nBn-структуре со сверхрешёткой HgTe (2,5 нм) / CdTe (9 нм) в качестве барьера при температуре 155 К. 1 — расчёт с учётом эффектов туннелирования, 2, 4 — расчёт без учёта эффектов туннелирования. (Перепечатано из [18] без изменений. Опубликована в 2016 издательством Springer Nature как статья с открытым доступом)

Fig. 3. Calculated (1, 2) and measured (3) dependences of the dark current (I_{dark}), as well as the calculated dependence of the dynamic resistance (4) on voltage for an nBn structure with a HgTe (2.5 nm) / CdTe (9 nm) superlattice at a temperature of 155 K. 1 — calculation with the consideration of tunneling effects, 2, 4 — calculation exclusive of tunneling effects (Reprinted from [18] without changes. Published in 2016 by Springer Nature as open access)

Таблица 3. Параметры слоёв исследованных в [22] структур
Table 3. Parameters of layers of structures studied in [22]

Структура	Контактный слой	Барьерный слой			Поглощающий слой
		Толщина	Параметры слоёв сверхрешётки	Количество периодов	
Средний ИК диапазон	$x = 0,3$	Более 0,06 мкм	HgTe (3,7 нм)/CdTe (1,3 нм)	Более 12	$x = 0,3$

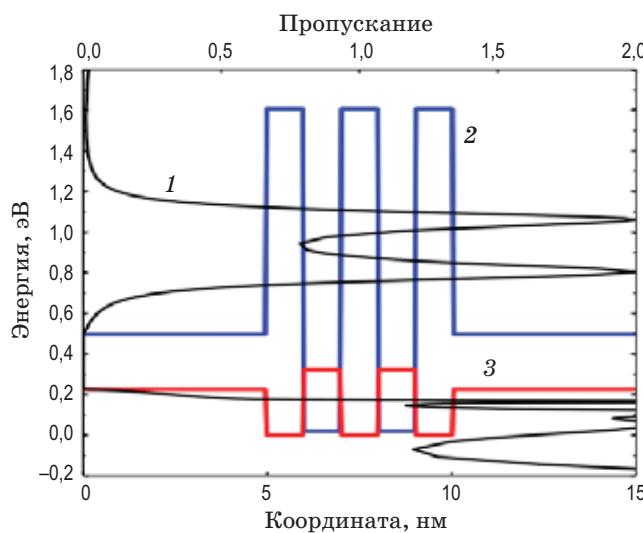


Рис. 4. Зависимость пропускания барьевой области (1) носителей заряда от их энергий для сверхрешёточной структуры с двумя ямами HgTe (1 нм) / CdTe (1 нм). 2 — профиль зоны проводимости, 3 — профиль валентной зоны. (Перепечатано из [21] без изменений с разрешением. Опубликована в 2016 издательством IEEE)

Fig. 4. Dependence of the transmission of the barrier region (1) of charge carriers on their energies for a superlattice structure with two HgTe (1 nm) / CdTe (1 nm) wells. 2 — conduction band profile, 3 — valence band profile. (Reprinted from [21] without changes with permission. Published in 2016 by IEEE)

в валентной зоне. Подробно параметры структур в работе не описываются, а толщины слоёв в исследуемой сверхрешётке HgTe/CdTe находятся в пределах 2 нм для слоёв HgTe и в пределах 1–8 нм для слоёв CdTe. На рис. 4 приведена зависимость вероятностей туннелирования электронов через барьер от их энергий для сверхрешёточной структуры с двумя ямами HgTe (1 нм)/CdTe (1 нм). Данный расчёт наглядно демонстрирует эффект, достигаемый

за счёт применения сверхрешётки в качестве барьера: энергетический барьер для дырок в валентной зоне сведён к минимуму в то время как энергетический барьер для электронов в зоне проводимости имеет величину порядка 0,7 эВ.

В работе [22], являющейся на текущий момент завершающей публикацией цикла работ [20, 21, 22], посвящённых теоретическому исследованию барьёровых структур HgCdTe со сверхрешётками, приводится серия расчётов энергетических диаграмм сверхрешётки HgTe/CdTe в рамках формализма неравновесной функции Грина, на основании которых проводится её оптимизация по толщинам ям и барьёров, а также по числу периодов с целью минимизации темнового тока. Оптимальной с точки зрения авторов [22] является сверхрешётка с толщиной барьёров из CdTe 1,3 нм, толщиной ям из HgTe 3,7 нм и количеством периодов более 12. Таким образом, посредством теоретического анализа авторы [22] демонстрируют преимущество использования сверхрешётки с заданными свойствами в качестве барьера по сравнению с однородным широкозонным барьером.

При этом в данной работе отсутствует информация о параметрах иных слоёв потенциальной фоточувствительной структуры за исключением составов контактного и поглощающего слоёв ($x = 0,3$). Параметры структуры приведены в табл. 3.

Рисунок 5 наглядно демонстрирует сильную зависимость спектра пропускания сверхрешётки от небольшого изменения параметров слоёв сверхрешётки в абсолютных значениях. Изменение толщины ямы на 1 нм (изменение толщины в 2 раза) в сторону увеличения в представленном примере приводит к диаметральному изменению свойств сверхрешётки — формируется эффективный энергетический барьер для дырок в валентной

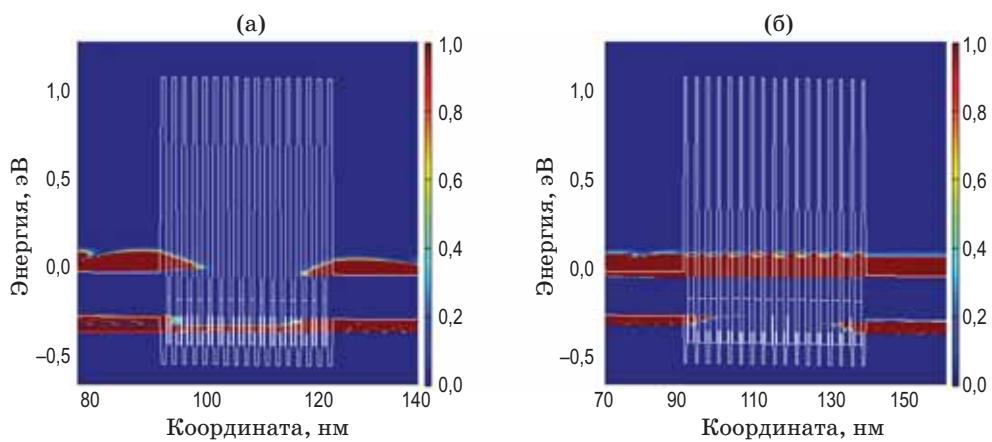


Рис. 5. Рассчитанные зонные диаграммы сверхрешёточных структур HgTe (1 нм) / CdTe (1,3 нм) (а) и HgTe (2 нм) / CdTe (1,3 нм) (б), состоящих из 15 периодов, а также цветовая диаграмма распределения плотности носителей заряда в валентной зоне и зоне проводимости. (Перепечатано из [22] без изменений с разрешением. Опубликована в 2018 издательством IEEE)

Fig. 5. Calculated band diagrams of superlattice structures HgTe (1 nm) / CdTe (1.3 nm) (a) and HgTe (2 nm) / CdTe (1.3 nm) (b), consisting of 15 periods, as well as a color diagram of electron/hole density distribution. (Reprinted from [22] without changes with permission. Published in 2018 by IEEE)

зоне при практически беспрепятственном прохождении электронов через барьерный слой в зоне проводимости, что, очевидно, полностью нарушает работоспособность барьерной структуры.

В работе [23], опубликованной А.В. Войцеховским и др. из Томского государственного университета и ИФП СО РАН, представлены результаты исследования изготовленной тестовой барьерной гетероструктуры со сверхрешёткой из 18 периодов $Hg_{0,20}Cd_{0,80}Te$ (9 нм) — HgTe (2 нм) и приведены результаты измерения её вольтамперных характеристик (ВАХ) и температурной зависимости плотности темнового тока.

Эпитаксиальные образцы со сверхрешётками выращивались на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Обь-М» в Институте физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск). После окончания процесса выращивания для создания отдельных структур (мезаструктур) эпитаксиальные плёнки подвергались химическому травлению в 0,5%-растворе Br в HBr через специальную маску. После этого вся структура покрывалась пассивирующим слоем Al_2O_3 , который наносился при температуре 120 °C путём плазменного атомно-слоевого осаждения. В пассивирующем покрытии вскрывались окна для напыления индиевых контактов к контактному слою для каждой

структуре и поглощающему слою. Для исследования влияния тока поверхностной утечки на характеристики структур для каждой эпитаксиальной плёнки были изготовлены структуры с различными диаметрами поперечного сечения от 0,50 мм до 0,02 мм. Исследования проводились на автоматизированной установке температурной спектроскопии адmittанса полупроводниковых наногетероструктур, состоящей из неоптического гелиевого криостата замкнутого цикла Janis с контроллером температуры Lake Shore 335, что позволило стабилизировать температуру исследуемого образца не хуже ±0,1 К в диапазоне 11–330 К.

Темновые ВАХ исследованной в [23] структуры имели симметричную форму, что обусловлено тем, что темновой ток в данной структуре ограничен в основном током поверхностной утечки. Это подтверждалось также и слабой температурной зависимостью плотности тока. Дополнительный анализ данной гетероструктуры был проведён методом спектроскопии адmittанса в конфигурации металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), который позволяет выявлять доминирующие механизмы токопереноса. При этом другая структура, имевшая однородный широкозонный барьер с составом 0,84 мол. дол., продемонстрировала существенно меньшие значения темнового тока, поскольку, как показал

Таблица 4. Параметры слоёв исследованных в [23] структур
Table 4. Parameters of layers of structures studied in [23]

Структура	Контактный слой	Барьерный слой			Поглощающий слой
		Толщина	Параметры слоёв сверхрешётки	Количество периодов	
Средний ИК диапазон	$d = 1,6 \text{ мкм}$ $x = 0,32$ $N_d = 3,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$	0,198 мкм	HgTe (2 нм)/CdTe (9 нм) Нелегированные слои	18	$d = 5,47 \text{ мкм}$ $x = 0,33$ $N_d = 2,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$

анализ МДП-структуры на его основе, в нём объёмная компонента тока превалирует над поверхностной. Данный факт, по мнению авторов [23], наглядно демонстрирует необходимость решения проблемы эффективной пассивации поверхности подобных гетероструктур. Ранее этой же группой авторов неоднократно экспериментально было продемонстрировано, что проблема пассивации поверхности гетероструктур имеет место в целом для всего класса фоточувствительных nBn-структур на основе HgCdTe [24–26].

На рис. 6 представлены вольтамперные характеристики данной структуры, измеренные при различных температурах. Детально параметры исследованной в [23] структуры приведены в табл. 4.

В работе [27] представлены результаты экспериментального исследования серии nBn-структур на основе HgCdTe со сверхрешёткой в барьере слое. Эпитаксиальные плёнки HgCdTe также выращивались на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Объ-М» в ИФП СО РАН. Основные физические параметры плёнок приведены в табл. 5.

Фоточувствительные структуры на основе эпитаксиальных плёнок представляют собой последовательность из поглощающего *n*-слоя с составом $x = 0,32$ толщиной около 4 мкм, барьера слоя со сверхрешёткой, содержащего 11 барьеров и 10 ям и контактный *n*-слой толщиной около 300 нм. Дополнительно в процессе роста в контактный слой внедрялась легирующая примесь индия с концентрацией $1,0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Толщина барьеров для всех изготовленных образцов составляла величину около 2,5 нм. Ширины ям для одного типа образцов составляли величину 10,0 нм, а для другого типа — 3,2 нм.

В качестве примера на рис. 7 приведены зависимости плотностей тока J от напряже-

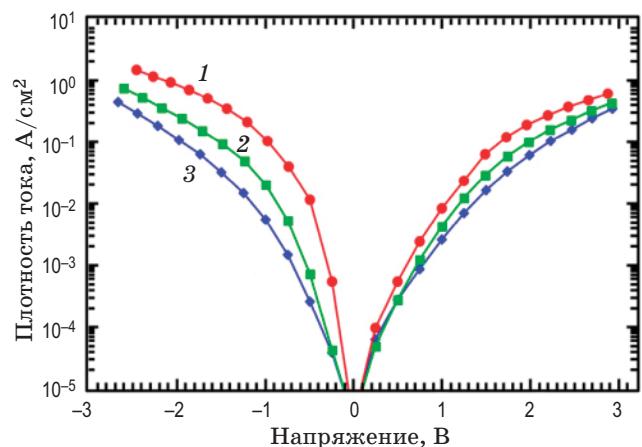


Рис. 6. Вольтамперные характеристики nBn-структуры, включающей сверхрешётку из 18 периодов $\text{Hg}_{0,20}\text{Cd}_{0,80}\text{Te}$ (9 нм)/HgTe (2 нм) в качестве селективного барьера, измеренные при разных температурах: 1 — 300 К, 2 — 200 К, 3 — 90 К. (Перепечатано из [23] без изменений с разрешением. Опубликована в 2020 издательством Springer Nature)

Fig. 6. Current-voltage characteristics of the nBn-structure, including a superlattice of 18 periods $\text{Hg}_{0,20}\text{Cd}_{0,80}\text{Te}$ (9 nm)/HgTe (2 nm) as a selective barrier, measured at different temperatures: 1 — 300 K, 2 — 200 K, 3 — 90 K (Reprinted from [23] without changes with permission. Published in 2020 by Springer Nature)

ния смещения V для структур среднего ИК диапазона 1–4 при температуре 80 К, а на рис. 8 — зависимости плотностей объёмной J_{bulk} и поверхностной J_{surf} компонент тока от температуры T для структуры № 1 при напряжении $V = +0,5$ В.

В [27] было показано, что в исследованных структурах вольтамперные характеристики формируются как объёмной, так и поверхностной составляющими тока в зависимости от температуры и напряжения смещения. Рис. 7 демонстрирует различия в значениях

Таблица 5. Параметры слоёв исследованных в [27] структур
Table 5. Parameters of layers of structures studied in [27]

Структура	Контактный слой	Барьерный слой			Поглощающий слой
		Толщина	Параметры слоёв сверхрешётки	Количество периодов	
Средний ИК диапазон –1	$d = 0,03 \text{ мкм}$, $x = 0,32$ $N_d = 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$	0,127 мкм	$\text{Hg}_{0,95}\text{Cd}_{0,05}\text{Te}$ (10 нм)/ $\text{Hg}_{0,3}\text{Cd}_{0,7}\text{Te}$ (2,5 нм) Нелегированные слои	10	$d = 4 \text{ мкм}$ $x = 0,32$ Нелегированный слой
Средний ИК диапазон –2	$d = 0,03 \text{ мкм}$, $x = 0,32$ $N_d = 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$	0,059 мкм	$\text{Hg}_{0,95}\text{Cd}_{0,05}\text{Te}$ (3,2 нм)/ $\text{Hg}_{0,25}\text{Cd}_{0,75}\text{Te}$ (2,5 нм) Нелегированные слои	10	$d = 4 \text{ мкм}$ $x = 0,32$ Нелегированный слой
Средний ИК диапазон –3	$d = 0,03 \text{ мкм}$, $x = 0,32$ $N_d = 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$	0,059 мкм	$\text{Hg}_{0,95}\text{Cd}_{0,05}\text{Te}$ (3,2 нм)/ $\text{Hg}_{0,3}\text{Cd}_{0,7}\text{Te}$ (2,5 нм) Нелегированные слои	10	$d = 4 \text{ мкм}$ $x = 0,32$ Нелегированный слой
Средний ИК диапазон –4	$d = 0,03 \text{ мкм}$, $x = 0,32$ $N_d = 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$	0,127 мкм	$\text{Hg}_{0,95}\text{Cd}_{0,05}\text{Te}$ (3,2 нм)/ $\text{Hg}_{0,28}\text{Cd}_{0,72}\text{Te}$ (2,5 нм) Нелегированные слои	10	$d = 4 \text{ мкм}$ $x = 0,32$ Нелегированный слой

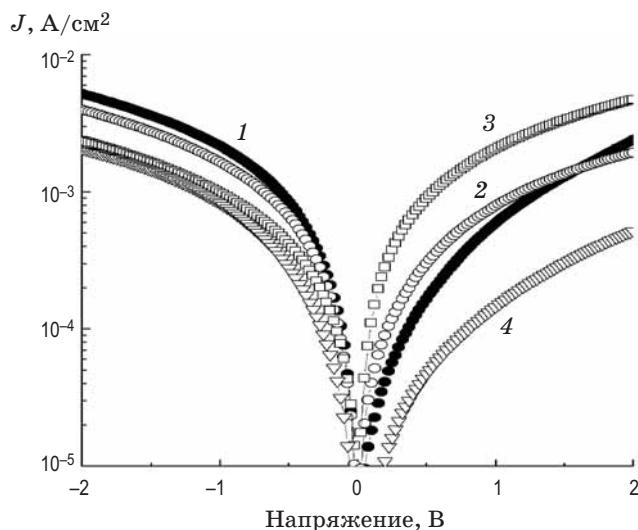


Рис. 7. Зависимости плотностей тока J от напряжения для структур среднего ИК диапазона 1–4 при температуре 80 К и диаметре 0,25 мм. (Перепечатано из [27] с изменениями. Опубликована в 2023 издательством НПО «Орион» как статья с открытым доступом)

Fig. 7. Dependence of current densities on voltage for MWIR 1–4 structures at a temperature of 80 K and a structure diameter of 0.25 mm. (Reprinted from [27] with changes. Published in 2023 by the publishing office of Scientific and Production Association “Orion” as open access article)

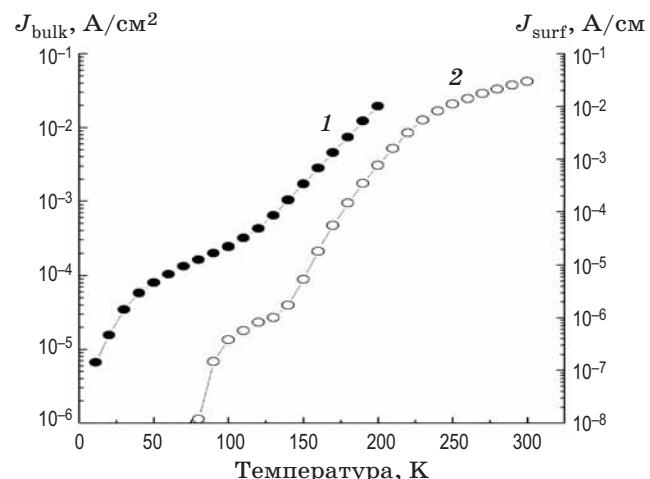


Рис. 8. Зависимости плотностей объёмной J_{bulk} (1) и поверхностной J_{surf} (2) компонент тока от температуры для структуры среднего ИК диапазона 1 при напряжении $V = +0,5$ В. (Перепечатано из [27] с изменениями. Опубликована в 2023 издательством НПО «Орион» как статья с открытым доступом)

Fig. 8. Dependences of the densities of the volume J_{bulk} (1) and surface J_{surf} (2) current components on temperature for the MWIR structure 1 at voltage $V = +0.5$ V. (Reprinted from [27] with changes. Published in 2023 by the publishing office of Scientific and Production Association “Orion” as open access article)

темнового тока для разных структур. Из рис. 8 видно, что при низких температурах (примерно до 80 К) определяющую роль играет объёмная компонента тока через структуру. С увеличением температуры плотность тока поверхностной утечки растёт существенно быстрее, чем объёмная компонента, что приводит к её определяющей роли в общей плотности темнового тока при температурах выше 200 К. Аналогичные результаты были получены при исследовании зависимости плотности тока от отношения периметра структуры к её площади (отношение P/A) [27], а также при исследовании адmittанса МДП-структур, изготовленных на основе nBn-структур со сверхрешёткой в барьерном слое среднего ИК диапазона 1–4 (табл. 5) [28].

В заключении приведём ранее нигде неопубликованные данные по исследованию фотоэлектрических характеристик nBn-структур на основе HgCdTe со сверхрешёткой в барьерном слое. На рис. 9 представлены зависимости плотностей тока от напряжения для структуры среднего ИК диапазона 2, параметры

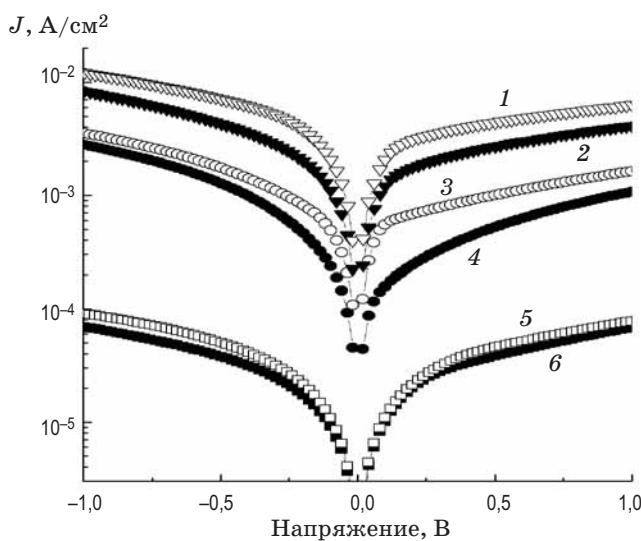


Рис. 9. Зависимости плотностей тока J от напряжения для структуры среднего ИК диапазона 2 при отсутствии подсветки ИК светодиодом (2, 4, 6) и её наличии (1, 3, 5) при различных температурах: 1, 2 — 150 К, 3, 4 — 77 К, 5, 6 — 11 К.

Fig. 9. Dependences of current densities J on voltage for the MWIR-2 structure in the absence (dark) and presence of IR light-emitting diode (LED) illumination at different temperatures: 1, 2 — 150 K, 3, 4 — 77 K, 5, 6 — 11 K

которой приведены в табл. 5, при отсутствии и наличии подсветки ИК светодиодом с длиной волны 940 нм при трёх различных температурах — 11, 77 и 150 К.

Исследуемый образец помещался в вакуумную камеру на охлаждаемый столик с отверстием. Излучение от ИК светодиода, проходя через фокусировочную систему, попадает на образец со стороны подложки, прозрачной для излучения светодиода, через отверстие в охлаждаемом столике. В процессе измерения ток, протекающий через светодиод, стабилизируется лабораторным источником питания и составлял величину 18 мА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье проведен анализ текущего состояния теоретических и экспериментальных исследований, посвящённых разработке и созданию униполярных фоточувствительных барьерных структур на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ со сверхрешётками в качестве барьерного слоя. Незначительное число работ по данной теме и крайне малое число экспериментальных исследований не позволяет в полной мере опираться на литературные данные в решении задачи устранения потенциального барьера для неосновных носителей заряда в барьерной области nBn-структур на основе HgCdTe. В работе ставилось целью проанализировать текущее состояние исследований в рассматриваемой области и сделать вывод о том, какие конфигурации сверхрешёточных барьеров являются наиболее оптимальными. С учётом того факта, что применение сверхрешёток в барьерных nBn-структурах на основе n -HgCdTe рассматривается как наиболее перспективный способ устранения потенциального барьера для неосновных носителей заряда, результаты данной работы могут составить основу для разработки конструкций фоточувствительных структур среднего и дальнего ИК диапазонов и последующего создания фотоприёмных элементов.

С точки зрения теоретического анализа возможность реализации сверхрешёточного барьера в nBn-структурах можно считать вполне обоснованной. Как показал обзор теоретических работ, в литературе рассматриваются, главным образом, достаточно хорошо изученные сверхрешётки HgTe–CdTe или близкие

к ним по составу с толщинами квантовых ям 2–2,5 нм и толщинами барьера 1–9 нм.

С другой стороны, выбор параметров сверхрешётки в барьере слое nBn-структуры должен опираться на технологические возможности молекулярно-лучевой эпитаксии. При этом видно, что примеров практической реализации сверхрешёточных барьера HgTe–CdTe с описанными выше параметрами в литературе практически нет. Лишь в одной работе [18] была изготовлена такая фоточувствительная nBn-структура со сверхрешёткой HgTe (2,5 нм) / CdTe (9 нм) с относительно «толстыми» барьера слоями и проведены её экспериментальные исследования. Это, вероятно, связано с технологической сложностью выращивания многослойных структур с гетерослоями толщиной около 2 нм, которые, по мнению авторов [18] теоретических работ, являются наиболее оптимальными. При этом эти же авторы в своём анализе наглядно демонстрируют сильную зависимость спектра пропускания сверхрешётки от небольшого изменения толщин её слоёв.

Почти все работы, направленные на практическую реализацию и экспериментальную характеристизацию унипольярных nBn-фоточувствительных структур на основе HgCdTe, выполнены в Томском государственном университе-

те и Институте физики полупроводников СО РАН в Новосибирске и описаны в совместных публикациях. Авторами данных исследований было изготовлено и экспериментально исследовано всего 5 различных конфигураций структур со сверхрешёточными барьераами. Были проведены комплексные исследования изготовленных экспериментальных образцов методом спектроскопии адмиттанса. В данных исследованиях продемонстрирована возможность практической реализации подобных структур методом МЛЭ. Изготавливались сверхрешётки с толщинами квантовых ям 2–10 нм и толщинами барьера 2,5–9 нм. При этом кроме классических структур с квантовой ямой HgTe/CdTe изготавливались и структуры с составами, отличными от данного соотношения стехиометрических составов. Авторы обращают внимание на тот факт, что в nBn-структурах в целом и, в частности, в структурах со сверхрешётками, изготавливаемых в мезаконфигурации, на результаты экспериментальных исследований существенное влияние оказывают токи поверхностной утечки. Это заставляет уделять особое внимание пассивации боковых граней мезаструктур при изготовлении экспериментальных образцов, а также проводить дополнительные исследования пассивирующих покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rogalski A. Infrared and terahertz detectors. 3 Edition. Milton Park: Taylor & Francis, 2019. 1066 p. <https://doi.org/10.1201/b21951>
2. Kinch M.A. The future of infrared; III-Vs or HgCdTe? // J. Electron. Mater. 2015. V. 44. № 9. P. 2969–2976. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3717-5>
3. Gu R., Antoszewski J., Lei W., Madni I., Umana-Membreno G., Faraone L. MBE growth of HgCdTe on GaSb substrates for application in next generation infrared detectors // J. Cryst. Growth. 2017. V. 468. P. 216. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.12.034>
4. Maimon S., Wicks G.W. nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 151109. <https://doi.org/10.1063/1.2360235>
5. Pedrazzani J.R., Maimon S., Wicks G.W. Use of nBn structures to suppress surface leakage currents in unpassivated InAs infrared photodetectors // Electron. Lett. 2008. V. 44. № 25. P. 1487. <https://doi.org/10.1049/el:20082925>
6. Reine M., Pinkie B., Schuster J., Bellotti E. Numerical simulation and analytical modeling of InAs nBn infrared detectors with n-type barrier layers // J. Electron. Mater. 2014. V. 43. № 8. P. 2915–2934. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3148-8>

REFERENCES

1. Rogalski A. Infrared and terahertz detectors. 3 Edition. Milton Park: Taylor & Francis, 2019. 1066 p. <https://doi.org/10.1201/b21951>
2. Kinch M.A. The future of infrared; III-Vs or HgCdTe? // J. Electron. Mater. 2015. V. 44. № 9. P. 2969–2976. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3717-5>
3. Gu R., Antoszewski J., Lei W., Madni I., Umana-Membreno G., Faraone L. MBE growth of HgCdTe on GaSb substrates for application in next generation infrared detectors // J. Cryst. Growth. 2017. V. 468. P. 216. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.12.034>
4. Maimon S., Wicks G.W. nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 151109. <https://doi.org/10.1063/1.2360235>
5. Pedrazzani J.R., Maimon S., Wicks G.W. Use of nBn structures to suppress surface leakage currents in unpassivated InAs infrared photodetectors // Electron. Lett. 2008. V. 44. № 25. P. 1487. <https://doi.org/10.1049/el:20082925>
6. Reine M., Pinkie B., Schuster J., Bellotti E. Numerical simulation and analytical modeling of InAs nBn infrared detectors with n-type barrier layers // J. Electron. Mater. 2014. V. 43. № 8. P. 2915–2934. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3148-8>

7. Soibel A., Keo S.A., Fisher A., Hill C.J., Luong E., Ting D.Z., Gunapala S.D., Lubyshev D., Qiu Y., Fas-tenau J.M., Liu A.W.K. High operating temperature nBn detector with monolithically integrated micro-lens // *Appl. Phys. Lett.* 2018. V. 112. № 4. P. 041105. <https://doi.org/10.1063/1.5011348>
8. Седнев М.В., Болтарь К.О., Иродов Н.А., Демидов С.С. Исследование фотоэлектрической взаимосвязи элементов матричных ФП на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 73–79.
9. Болтарь К.О., Иродов Н.А., Седнев М.В., Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Рябощтан Ю.Л. Исследование фотодиодов с граничной длиной волны до 2,06 мкм на основе структур InGaAs // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 49–53.
10. Martyniuk P., Kopytko M., Rogalski A. Barrier infrared detectors // *Opto-Electron. Rev.* 2014. V. 22. № 2. P. 127–146. <https://doi.org/10.2478/s11772-014-0187-x>
11. Itsuno A.M. Bandgap-engineered Mercury Cadmium Telluride infrared detector structures for reduced cooling requirements // Doctoral dissertation. Ann Arbor: University of Michigan, 2012. 197 p.
12. Филатов А.В., Сусов Е.В., Карпов В.В. Образование, природа и отжиг дефектов в гетероэпитаксиальных структурах Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te и фоторезисторах, подвергнутых ионному травлению // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 4. С. 67–72.
13. Burlakov I.D., Kulchitsky N.A., Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Gorn D.I. Unipolar semiconductor barrier structures for infrared photodetector arrays (Review) // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2021. V. 66. № 9. P. 1084–1091. <https://doi.org/10.1134/S1064226921090035>
14. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y. Ch. 6. II–VI semiconductor-based unipolar barrier structures for infrared photodetector arrays in handbook of II–VI semiconductor-based sensors and radiation detectors. Cham: Springer, 2023. P. 135–154. <https://doi.org/10.1134/S1064226921090035>
15. Shi Q., Zhang S.-K., Wang J.-L., Chu J.-H. J. Progress on nBn infrared detectors // *Infrared Millim. Waves*. 2022. V. 41. № 1. P. 139–150. <https://doi.org/10.11972/j.issn.1001-9014.2022.01.010>
16. Kopytko M., Wrobel J., Jozwikowska K., Rogalski A., Antoszewski J., Akhavan N.D., Umana-Membreno G.A., Faraone L., Becker C.R. Engineering the bandgap of unipolar HgCdTe-based nBn infrared photodetectors // *Journal of Electronic Materials*. 2015. V. 44. № 1. P. 158–166. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3511-9>
17. Benyaya J., Martyniuk P., Kopytko M., Antoszewski J., Gawron W., Madejczyk P. nBn HgCdTe infrared detector with HgTe/CdTe SLs barrier // IEEE Xplore. 2015 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD). Taipei, Taiwan. September 7–11, 2015. P. 179–180. <https://doi.org/10.1109/NUSOD.2015.7292881>
18. Benyahia D., Martyniuk P., Kopytko M., Antoszewski J., Gawron W., Madejczyk P., Rutkowski J., Gu R., Faraone L. nBn HgCdTe infrared detector with HgTe(HgCdTe)/CdTe SLs barrier // *Opt. Quant. Electron.* 2016. V. 48. P. 215. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0439-8>
19. Gu R., Lei W., Antoszewski J., Madni I., Umana-Membreno G., Faraone L. Recent progress in MBE
7. Soibel A., Keo S.A., Fisher A., Hill C.J., Luong E., Ting D.Z., Gunapala S.D., Lubyshev D., Qiu Y., Fas-tenau J.M., Liu A.W.K. High operating temperature nBn detector with monolithically integrated micro-lens // *Appl. Phys. Lett.* 2018. V. 112. № 4. P. 041105. <https://doi.org/10.1063/1.5011348>
8. Sednev M.V., Boltar' K.O., Irodov N.A., Demidov S.S., Research of photoelectric interrelation of elements in a photodiode matrix on the basis of InGaAs heteroepitaxy structures [in Russian] // *Applied Physics*. 2015. № 3. P. 73–79.
9. Boltar' K.O., Irodov N.A., Sednev M.V., Marmalyuk A.A., Ladugin M.A., Ryaboshstan Yu.L. Research of photodiodes based on the InGaAs/nBn structures with a boundary wavelength up to 2.06 microns [in Russian] // *Applied Physics*. 2017. № 6. P. 49–53.
10. Martyniuk P., Kopytko M., Rogalski A. Barrier infrared detectors // *Opto-Electron. Rev.* 2014. V. 22. № 2. P. 127–146. <https://doi.org/10.2478/s11772-014-0187-x>
11. Itsuno A. M. Bandgap-engineered Mercury Cadmium Telluride infrared detector structures for reduced cooling requirements // Doctoral dissertation. Ann Arbor: University of Michigan, 2012. 197 p.
12. Filatov A.V., Susov E.V., Karpov V.V. Formation, nature, and annealing of defects in Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te heteroepitaxial structures and photoresistors subjected to ion etching // *Journal of Optical Technology*. 2017. V. 84. № 4. P. 275–280. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000275>
13. Burlakov I.D., Kulchitsky N.A., Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Gorn D.I. Unipolar semiconductor barrier structures for infrared photodetector arrays (Review) // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2021. V. 66. № 9. P. 1084–1091. <https://doi.org/10.1134/S1064226921090035>
14. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y. Ch. 6. II–VI semiconductor-based unipolar barrier structures for infrared photodetector arrays in handbook of II–VI semiconductor-based sensors and radiation detectors. Cham: Springer, 2023. P. 135–154. <https://doi.org/10.1134/S1064226921090035>
15. Shi Q., Zhang S.-K., Wang J.-L., Chu J.-H. J. Progress on nBn infrared detectors // *Infrared Millim. Waves*. 2022. V. 41. № 1. P. 139–150. <https://doi.org/10.11972/j.issn.1001-9014.2022.01.010>
16. Kopytko M., Wrobel J., Jozwikowska K., Rogalski A., Antoszewski J., Akhavan N.D., Umana-Membreno G.A., Faraone L., Becker C.R. Engineering the bandgap of unipolar HgCdTe-based nBn infrared photodetectors // *Journal of Electronic Materials*. 2015. V. 44. № 1. P. 158–166. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3511-9>
17. Benyaya J., Martyniuk P., Kopytko M., Antoszewski J., Gawron W., Madejczyk P. nBn HgCdTe infrared detector with HgTe/CdTe SLs barrier // IEEE Xplore. 2015 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD). Taipei, Taiwan. September 7–11, 2015. P. 179–180. <https://doi.org/10.1109/NUSOD.2015.7292881>
18. Benyahia D., Martyniuk P., Kopytko M., Antoszewski J., Gawron W., Madejczyk P., Rutkowski J., Gu R., Faraone L. nBn HgCdTe infrared detector with HgTe(HgCdTe)/CdTe SLs barrier // *Opt. Quant. Electron.* 2016. V. 48. P. 215. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0439-8>
19. Gu R., Lei W., Antoszewski J., Madni I., Umana-Membreno G., Faraone L. Recent progress in MBE

- grown HgCdTe materials and devices at UWA // Proc. of SPIE. 2016. V. 9819. 98191Z. <https://doi.org/10.1117/12.2222997>
20. Akhavan N.D., Umana-Membreno G.A., Antoszewski J., Faraone L. Self-consistent carrier transport in band engineered HgCdTe nBn detector // IEEE Xplore. 2016 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD). Sydney, NSW, Australia. July 11–15 2016. P. 119–120. <https://doi.org/10.1109/NUSOD.2016.7547060>
 21. Akhavan N.D., Umana-Membreno G.A., Gu R., Asadnia M., Antoszewski J., Faraone L. Superlattice barrier HgCdTe nBn infrared photodetectors: Validation of the effective mass approximation // IEEE Transactions On Electron Devices. 2016. V. 63. № 12. P. 4811–4818. <https://doi.org/10.1109/TED.2016.2614677>
 22. Akhavan N.D., Umana-Membreno G.A., Gu R. Optimization of superlattice barrier HgCdTe nBn infrared photodetectors based on an NEGF approach // IEEE Transactions On Electron Devices. 2018. V. 65. № 2. P. 591–598. <https://doi.org/10.1109/TED.2017.2785827>
 23. Izhnin I.I., Kurbanov K.R., Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Unipolar superlattice structures based on MBE HgCdTe for infrared detection // Applied Nanoscience. 2020. № 10. P. 4571–4576. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01297-y>
 24. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Diffusion-limited dark currents in mid-wave infrared HgCdT_d-based nBn structures with Al₂O₃ passivation // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. V. 53. 055107 (6pp). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab5487>
 25. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y. Electrical properties of nBn structures based on HgCdTe grown by molecular beam epitaxy on GaAs substrates // Infrared Physics and Technology. 2019. V. 102. 103035. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103035>
 26. Izhnin I.I., Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Admittance of barrier nanostructures based on MBE HgCdTe // Applied Nanoscience. 2020. № 12. P. 403–409. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01636-z>
 27. Войцеховский А.В., Дзядух С.М., Горн Д.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В. Компоненты темнового тока nB(SL)n-структур на основе HgCdTe для широкого диапазона напряжений смещения // Прикладная физика. 2023. № 4. С. 78–86. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-4-78-86>
 28. Войцеховский А.В., Дзядух С.М., Горн Д.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В. Определение электрофизических свойств МДП на основе nB(SL)n-структуры из HgCdTe в широком температурном диапазоне // Прикладная физика. 2023. № 5. С. 75–83. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-5-75-83>
- grown HgCdTe materials and devices at UWA // Proc. of SPIE. 2016. V. 9819. 98191Z. <https://doi.org/10.1117/12.2222997>
20. Akhavan N.D., Umana-Membreno G.A., Antoszewski J., Faraone L. Self-consistent carrier transport in band engineered HgCdTe nBn detector // IEEE Xplore. 2016 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD). Sydney, NSW, Australia. July 11–15 2016. P. 119–120. <https://doi.org/10.1109/NUSOD.2016.7547060>
 21. Akhavan N.D., Umana-Membreno G.A., Gu R., Asadnia M., Antoszewski J., Faraone L. Superlattice barrier HgCdTe nBn infrared photodetectors: Validation of the effective mass approximation // IEEE Transactions On Electron Devices. 2016. V. 63. № 12. P. 4811–4818. <https://doi.org/10.1109/TED.2016.2614677>
 22. Akhavan N.D., Umana-Membreno G.A., Gu R. Optimization of superlattice barrier HgCdTe nBn infrared photodetectors based on an NEGF approach // IEEE Transactions On Electron Devices. 2018. V. 65. № 2. P. 591–598. <https://doi.org/10.1109/TED.2017.2785827>
 23. Izhnin I.I., Kurbanov K.R., Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Unipolar superlattice structures based on MBE HgCdTe for infrared detection // Applied Nanoscience. 2020. № 10. P. 4571–4576. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01297-y>
 24. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Diffusion-limited dark currents in mid-wave infrared HgCdT_d-based nBn structures with Al₂O₃ passivation // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. V. 53. 055107 (6pp). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab5487>
 25. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y. Electrical properties of nBn structures based on HgCdTe grown by molecular beam epitaxy on GaAs substrates // Infrared Physics and Technology. 2019. V. 102. 103035. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103035>
 26. Izhnin I.I., Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Admittance of barrier nanostructures based on MBE HgCdTe // Applied Nanoscience. 2020. № 12. P. 403–409. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01636-z>
 27. Voitsekhovskii A.V., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Dark current components of nB(SL)n structures based on HgCdTe for a wide range of bias voltages [in Russian] // Applied Physics. 2023. № 4. P. 78–86. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-4-78-86>
 28. Voitsekhovskii A.V., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Determination of the electrical properties of MIS based on the nB(SL)n-structure of HgCdTe in a wide temperature range [in Russian] // Applied Physics. 2023. № 5. P. 75–83. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-5-75-83>

АВТОРЫ

Александр Васильевич Войцеховский — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор Томского государственного университета, 634050, Томск, Россия; Scopus ID: 7003912639, <https://orcid.org/0000-0002-1196-6199>, vav43@mail.tsu.ru

AUTHORS

Alexander V. Voitsekhovskii — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Russia; Scopus ID: 7003912639, <https://orcid.org/0000-0002-1196-6199>, vav43@mail.tsu.ru

Станислав Михайлович Дзядух — канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный университет, 634050, Томск, Россия; Scopus ID: 15730695900, <https://orcid.org/0000-0003-1853-9533>, bonespirit@mail2000.ru

Дмитрий Игоревич Горн — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, Томский государственный университет, 634050, Томск, Россия; Scopus ID: 36080464800, <https://orcid.org/0000-0003-0308-4011>, gorn.di@gmail.com

Николай Николаевич Михайлов — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Томский государственный университет, 634050, Томск, Россия; старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 7006462618, <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>, mikhailov@isp.nsc.ru

Сергей Алексеевич Дворецкий — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Томский государственный университет, 634050, Томск, Россия; ведущий научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 6701661877, <https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>, dvor@isp.nsc.ru

Георгий Юрьевич Сидоров — канд. физ.-мат. наук, заместитель директора, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 17435706500, <https://orcid.org/0000-0002-3449-6548>, george@isp.nsc.ru

Максим Витальевич Якушев — доктор физ.-мат. наук, заместитель директора, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 35363240800, <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>, yakushev@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 29.09.2023
Одобрена после рецензирования 14.11.2023
Принята к печати 29.12.2023

Stanislav M. Dzyadukh — PhD in Physics and Mathematics, Assistant Professor, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Russia; Scopus ID: 15730695900, <https://orcid.org/0000-0003-1853-9533>, bonespirit@mail2000.ru

Dmitry I. Gorn — PhD in Physics and Mathematics, Head of Laboratory, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Russia; Scopus ID: 36080464800, <https://orcid.org/0000-0003-0308-4011>, gorn.di@gmail.com

Nikolay N. Mikhaylov — Phd in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Russia; Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 7006462618, <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>, mikhailov@isp.nsc.ru

Sergey A. Dvoretzky — Phd in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Russia; Leading Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 6701661877, <https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>, dvor@isp.nsc.ru

Georgy Yu. Sidorov — PhD in Physics and Mathematics, Deputy Head, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 17435706500, <https://orcid.org/0000-0002-3449-6548>, george@isp.nsc.ru

Maxim V. Yakushev — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Deputy Head, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 35363240800, <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>, yakushev@isp.nsc.ru

The article was submitted to the editorial office 29.09.2023
Approved after review 14.11.2023
Accepted for publication 29.12.2023