

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-02-76-87

УДК 538.911: 535.33:535.345.61:538.935

Рост и характеристика nВn-структур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для фотоприёмников спектрального диапазона 3–5 мкм

Николай Николаевич Михайлов¹✉, Василий Семенович Варавин²,
Сергей Алексеевич Дворецкий³, Роман Владимирович Менщиков⁴,
Владимир Григорьевич Ремесник⁵, Иван Николаевич Ужаков⁶

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

¹mikhailov@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>

²varavin@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0001-7722-6428>

³dvor@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>

⁴karpuy@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0001-6127-9469>

⁵remesnik@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0003-7495-929X>

⁶uzhakov@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0003-4982-2486>

Аннотация

Предмет исследования. Барьерные nВn-структуры на основе твёрдых растворов (013) $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$. **Цель работы.** Создание барьерных nВn-структур на основе твёрдых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с заданным профилем распределения состава и уровнем легирования, предназначенных для изготовления высокочувствительных инфракрасных фотоприёмников спектрального диапазона 3–5 мкм, работающих при повышенных температурах. **Метод.** Выращивание барьерных nВn-структур на основе HgCdTe проводилось методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из (013) GaAs с буферными слоями ZnTe и CdTe и контролем толщины и состава слоёв в реальном масштабе времени высокоскоростным эллипсометрическим методом. Легирование слоёв в процессе роста до необходимого уровня осуществлялось индием из эффузионного источника типа Кнудсена с прецизионным контролем (управлением) его температуры (потока). Состав и толщина слоёв определялись в процессе роста из измерений эллипсометрических параметров in-situ, по спектрам пропускания и отражения с последовательным травлением слоёв ex-situ. Концентрация основных носителей заряда в выращенных структурах определялась из Холловских измерений методом Ван-Дер-Пау с использованием послойного травления. **Основные результаты.** Получены барьерные nВn-структуры на основе HgCdTe . Параметры состава и толщины слоёв составили 0,3–0,35; 0,6–0,8; 0,31–0,36 молярных долей и 3–4 мкм, 0,2–0,35 мкм, 1–1,3 мкм для поглощающего, барьерного и контактного слоёв, соответственно. Концентрация основных носителей составила $(0,6\text{--}3)\times 10^{16}\text{ см}^{-3}$, $(0,6\text{--}3)\times 10^{16}\text{ см}^{-3}$ и $(0,9\text{--}5)\times 10^{17}\text{ см}^{-3}$ для поглощающего, барьерного и контактного слоёв, соответственно. Показана хорошая корреляция профиля распределения состава и уровня легирования по толщине выращиваемой структуры, задаваемая в процессе роста с результатами последующих послойных измерений. **Практическая значимость.** Полученные в работе результаты выращивания и характеристики nВn-структуры предназначены для разработки инфракрасных фотоприёмников для SWaP- (Size, Weight and Power) технологии с высокой чувствительностью в спектральном диапазоне 3–5 мкм различного формата, работающих при повышенных температурах, для инфракрасных оптико-электронных и тепловизионных устройств.

Ключевые слова: nBn-структуры, состав, толщина, эллипсометрические параметры, концентрация электронов, легирование

Благодарность: работа поддержана в рамках проекта РНФ 23-62-10021.

Ссылка для цитирования: Михайлов Н.Н., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Менщиков Р.В., Ремесник В.Г., Ужаков И.Н. Рост и характеристика nBn-структур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для фотоприёмников спектрального диапазона 3–5 мкм // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 76–87. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-76-87>

Коды OCIS: 160.6000, 190.2620, 190.4350.

Growth and characterization of nBn structures based on $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ for photodetectors in the 3–5 μm spectral range

NIKOLAY N. MIKHAILOV¹✉, VASILY S. VARAVIN², SERGEY A. DVORETSKY³,
ROMAN V. MENSCHNIKOV⁴, VLADIMIR G. REMESNIK⁵, IVAN N. UZHAKOV⁶

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

¹mikhailov@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>

²varavin@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0001-7722-6428>

³dvor@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>

⁴karpuy@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0001-6127-9469>

⁵remesnik@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0003-7495-929X>

⁶uzhakov@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0003-4982-2486>

Abstract

The subject of study is barrier nBn structures based on $(013)\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$ solid solutions. **The purpose of the work** is the creation of barrier nBn structures based on $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ solid solutions with given composition distribution profile and doping level intended for the manufacture of highly sensitive infrared photodetectors in the spectral range of 3–5 microns operating at elevated temperatures. **Method.** The growth of barrier nBn HgCdTe structures was carried out by molecular beam epitaxy on $(013)\text{GaAs}$ substrates with ZnTe and CdTe buffer layers and control of the thickness and composition of the layers in real time by a high-speed ellipsometric method. Doping of the layers during the growth process to the required level was carried out with indium from a Knudsen-type effusion source with precision control of its temperature (flow). The composition and thickness of the layers were determined during the growth process from in-situ measurements of ellipsometric parameters, transmission and reflection spectra with sequential etching of the ex-situ layers. The concentration of the majority charge carriers in the grown structures was determined from Hall measurements by the Van Der Pauw method using layer-by-layer etching. **Main results.** The barrier nBn structures based on HgCdTe have been obtained. The parameters of the composition and thickness of the layers were 0.3–0.35, 0.6–0.8, 0.31–0.36 mole fractions and 3–4 μm , 0.2–0.35 μm , 1–1.3 μm for the absorbent, barrier and contact layers, respectively. The concentration of the main carriers was $(0.6\text{--}3)\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$, $(0.6\text{--}3)\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ and $(0.9\text{--}5)\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ for the absorbing, barrier and contact layers, respectively. A good correlation between the distribution profile of the composition and the doping level over the thickness of the grown structure, which is specified during the growth process with the results of subsequent post-growth measurements, has been shown. **Practical significance.** The results of growing and characterizing the nBn structure obtained in this work are intended for the development of infrared photodetectors for SWaP (Size, Weight and Power) technology with high sensitivity in the spectral range of 3–5 microns of various formats, operating at elevated temperatures, for infrared optoelectronic and thermal imaging devices.

Keywords: nBn structures, composition, thickness, ellipsometric parameters, electron concentration, doping

Acknowledgment: this work was supported by RSF 23-62-10021.

For citation: Mikhailov N.N., Varavin V.S., Dvoretzky S.A., Menshchikov R.V., Remesnik V.I.G., Uzhakov I.N. Growth and characterization of nBn structures based on $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ for photodetectors in the 3–5 μm spectral range [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 2. P. 76–87. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-76-87>

OCIS codes: 160.6000, 190.2620, 190.4350.

ВВЕДЕНИЕ

Новая архитектура фотоприёмной структуры типа «XBn» была предложена для создания фотоэлектрических полупроводниковых приёмников (ФЭПП, фотоприёмник) инфракрасного (ИК) излучения на основе гомопереходного фотодиода в качестве альтернативы фотовольтаическим фотодиодам на основе p - n перехода [1, 2]. Такие структуры позволяют повысить рабочую температуру ФЭПП, которая определяется одним из важных параметров — величиной темнового тока. Темновой ток фотовольтаических ФЭПП определяется процессами генерации рекомбинации в области истощения носителей заряда, число которых с повышением температуры экспоненциально возрастает. Для XBn-структуры, включающей поглощающий n (ПС) и контактный X (КС) слои электронного типа проводимости, разделённые широкозонным барьерным слоем (БС), отсутствие области истощения носителей обуславливает величину темнового тока, который лимитируется только диффузионной компонентой, что позволяет повысить рабочую температуру. Для XBn-структур на основе соединений A_3B_5 типа $\text{AlAsSb}/\text{InAsSb}$ при сочетании различных компонентов поглощающего, контактного и барьерного слоёв удалось повысить рабочую температуру средневолновых фотоприёмников до температур 200 К, чувствительность которых ограничена длинноволновой границей менее 4 мкм [3–7]. Расширение спектрального диапазона чувствительности в более длинноволновую область спектра достигается за счёт создания в качестве ПС сверхрешёток 2 рода T2SL [8–11]. Такие барьерные структуры позволили обеспечить чувствительность до 5,1 мкм в диапазоне 3–5 мкм и в длинноволновом диапазоне до 14 мкм [12]. Проведённые исследования показывают, что поведение темнового тока для различных барьерных структур близко к эмпирическому правилу Rule 07 [13]. Подробный обзор по барьерным фотоприёмникам приведён в [14].

Многочисленные исследования и отработка технологических процессов при создании структур на основе твёрдого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ благодаря уникальным физическим свойствам этого фоточувствительного материала позволили создать линейку фотовольтаических матричных фотоприёмников различного формата для регистрации ИК излучения в широком спектральном диапазоне от коротковолнового до сверхдлинноволнового [15, 16]. Тенденции к повышению температуры таких фотоприёмников связаны с созданием p^+ - n переходов, которые получают легированием мышьяком КС и индием ПС; либо n^+ - p перехода при легировании акцепторной примесью I группы ПС и бором КС. Создание p^+ слоя требует проведения сложных процессов активации As. Для акцепторных примесей I группы характерны высокие коэффициенты диффузии, которые приведут к деградации n^+ - p перехода и, следовательно, к снижению времени эксплуатации фотоприёмника.

Ожидалось, что барьерные nBn-структуры на основе HgCdTe должны были обеспечить создание гомопереходного фотодиода и повышение температуры ИК фотоприёмников и значительно упростить технологию их изготовления по сравнению с технологией на основе структур с p - n переходами. Однако для nBn-структур на основе HgCdTe образуется барьер в валентной зоне ПС, который препятствует транспорту генерированных излучением неосновных носителей (дырок) от ПС к КС через БС [17, 18]. Такой барьер в валентной зоне может быть уменьшен или устранён при приложении отрицательного смещения, создании барьерного и контактного слоёв p -типа проводимости [19]. Также понизить высоту барьера в валентной зоне можно величиной уровня легирования поглощающего слоя и при создании сложного профиля легирования, как и при изменении состава в барьерном слое. Из данных работы [20] при сравнении барьерных структур типа $p^+\text{B}_p\text{nN}^+$ и $n^+\text{B}_n\text{nN}^+$ следует, что чувстви-

тельность фотоприёмника с барьерным слоем V_p превышает чувствительность фотоприёмника с барьерным слоем V_n при приложении обратного смещения. Различие в чувствительности увеличивается с увеличением обратного смещения. Однако можно получить одинаковую чувствительность для фотоприёмников на основе обеих барьерных структур, но при большем обратном смещении для V_n чем для V_p . Так, для $V = -0,7$ чувствительность фотоприёмника с V_n превышает чувствительность фотоприёмника с V_p с приложенным $V = -0,5$ на порядок. Такие данные позволяют сделать вывод, что для фотоприёмников на основе структур nVn необходимы более высокие значения обратного смещения для устранения транспорта дырок из активной области к контакту. Полученные характеристики фотоприёмников на основе барьерных структур, выращенных методом металлоорганической газовой эпитаксии (МО ГФЭ), показали возможность получения результатов, сравнимых с фотоприёмниками на основе $p-n$ переходов, как при изменении архитектуры барьерной структуры, так и при увеличении напряжения обратного смещения. Однако рост МО ГФЭ проводится при относительно высоких температурах (350°C) и, поэтому, получение сложных XVn -структур с резкими и хорошо контролируемыми градиентами состава и уровнем легирования структур затруднено вследствие высокой интердиффузии компонентов чередующихся ультратонких растущих бинарных слоёв (CdTe и HgTe).

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяет свести к минимуму процессы взаимодиффузии компонентов и снизить на 3–4 порядка интердиффузию ртути в барьерных структурах вследствие низкой температуры выращивания 180°C . Барьерные nVn -структуры $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ были оптимизированы по проведённым теоретическим расчётам зонной диаграммы и выращены методом МЛЭ с различной архитектурой и легированием слоёв для средневолновых и длинноволновых фотоприёмников [17, 18]. В структурах наблюдалось увеличение фототока и чувствительности при увеличении интенсивности падающего излучения и величины обратного смещения. Было показано, что при увеличении обратного смещения до -2 В барьер для транспорта дырок в валентной зоне уменьшается.

Предложения по устранению барьера для транспорта дырок в валентной зоне при дельта-легировании и создании варизонного барьерного слоя пока не привели к значительным успехам в реализации фотоприёмников на основе nVn -структур [21]. Возможно, что не только отсутствие барьера в валентной зоне, как принципиально физического свойства nVn -структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, не позволяет достигнуть характеристик фотоприёмников, сравнимых с аналогичными приборами на основе $p-n$ переходов. Но, для качественного материала ИК фотоприёмников также необходимо высокое кристаллическое совершенство слоёв. Выращивание nVn -структур методом МЛЭ проведено на подложках CdZnTe и GaAs с ориентацией (112). Для этой ориентации существует узкий интервал условий выращивания слоёв $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ высокого качества для заданного состава [22]. Это может привести к ухудшению кристаллического совершенства nVn -структуры, в которых слои ПС и КС имеют составы, значительно отличающиеся от состава БС. При сопряжении таких слоёв при неизменных условиях роста следует ожидать введение дефектов, которые приводят к снижению электрофизических параметров структуры и в последующем чувствительности фотоприёмников [23]. Исследования процессов роста на ориентации (013) показали, что слои $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ имеют высокое кристаллическое совершенство для составов в широком диапазоне величин. Было показано, что выращивание на такой ориентации слоёв HgCdTe с различным дизайном составов позволило создать линейку гетероструктур для различных SWIR-, MWIR-, LWIR- и MWIR/LWIR-фотоприёмников с высокой чувствительностью на основе $p-n$ переходов, работающих при температуре жидкого азота [24]. Следовательно, nVn -структуры при выращивании на этой ориентации будут иметь высокое качество и обеспечат высокую чувствительность фотоприёмников.

Поэтому для создания барьерных nVn -структур на основе твёрдых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с заданным профилем распределения состава и уровнем легирования, предназначенных для изготовления высокочувствительных инфракрасных фотоприёмников спектрального диапазона 3–5 мкм необходимо провести экспериментальное исследование процессов роста барьерных структур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

и характеризацию оптических и электрофизических параметров выращенных слоёв.

Цель работы — создание барьерных $n\text{Vn}$ -структур на основе твёрдых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с заданным профилем распределения состава и уровнем легирования, предназначенных для изготовления высокочувствительных инфракрасных фотоприёмников спектрального диапазона 3–5 мкм, работающих при повышенных температурах. Представлено комплексное исследование процессов роста и легирования индием $n\text{Vn}$ -структур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ методом МЛЭ на (013)GaAs-подложках с *in situ* эллипсометрическим контролем. Проведена характеристика выращенных структур по измерениям спектров пропускания и электрофизических параметров с использованием послойного травления для последующего создания фотоприёмников спектрального диапазона 3–5 мкм.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Барьерные структуры $n\text{Vn}$ на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ были выращены методом МЛЭ на подложках (013)GaAs с буферными слоями ZnTe (толщиной 50 нм) и CdTe (толщиной 5–7 мкм) в едином процессе в многокамерной сверхвысоковакуумной установке «Обь-М» (УНУ 353512) [24]. Технологический модуль для выращивания $n\text{Vn}$ -структур оснащён быстродействующим лазерным эллипсометром ($\lambda = 632,8$ нм) [25]. Контроль состава и толщины слоёв в $n\text{Vn}$ -структуре осуществлялся *in-situ* измерением эллипсометрических параметров [26]. Точность измерений состава и толщины, полученные из измерений эллипсометрических параметров, составляет 0,0005 молярных долей теллурида кадмия и 0,5 нм, соответственно.

Состав слоёв выращенной структуры $n\text{Vn}$ по толщине определялся путём анализа измеренных спектров пропускания (T) и отражения (R) при послойном химическом травления в 0,5%-ном растворе $\text{Br}_2:\text{HBr}$. Измерение спектральных характеристик T и R проводилось при температуре 300 К на ИК фурье-спектрометре «ФТ-803» (ООО «Симекс», Новосибирск, Россия), оснащённом специальной приставкой, в диапазоне волновых чисел 350–7500 см^{-1} с разрешением 0,4–16 см^{-1} с точностью не хуже 0,5 см^{-1} . Состав x и толщина $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ и буферного слоя CdTe определялись с помощью

специальной программы подгонки расчётного и экспериментального спектров пропускания. Расчётная интерференция в двухслойной системе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$ на GaAs при совпадении с экспериментально измеренной интерференцией позволяет определить толщину буферного слоя CdTe и слоя $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Ширина запрещённой зоны E_g определяется из соотношения E_g (эВ) = $1,24/\lambda$ (мкм), длина волны которого рассчитывается из значения волнового числа ν по уровню 0,5 от максимума в спектре пропускания. Состав ПС для обеспечения чувствительности фотоприёмников определяется из зависимости $E_g(x, T)$ от состава и температуры по уравнению [27]:

$$E_g(x, T) = -0,302 + 1,93x - 0,81x^2 + 0,832x^3 + 5 \times 35 \times 10^{-4}(1 - 2x)T, \quad (1)$$

где E_g в эВ и T в К.

Спектры отражения были измерены в диапазоне длин волн 200–1100 нм с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-1700 с приставкой. Расчётный состав определялся по калибровочной зависимости энергии пика E_1 от состава x , полученной экспериментальными измерениями эталонных образцов кристаллов:

$$E_1 = 0,3962x^3 - 3,6299x^2 + 11,621x - 12,065, \quad (2)$$

где E_1 в эВ и x в молярных долях.

Концентрация носителей заряда и времени жизни по толщине слоёв $n\text{Vn}$ была измерена с помощью методом Ван-дер-Пау в магнитном поле 0,1 Тл.

Архитектура типичной структуры $n\text{Vn}$ для фотоприёмников спектрального диапазона 3–5 мкм состоит из пяти слоёв $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$:

1. Буферный слой состава $x \approx 0,7$ толщиной около 1 мкм.

2. Варизонный широкозонный слой с изменением состава от состава буферного слоя HgCdTe до состава ПС.

3. ПС состава $x \approx 0,3$ толщиной 3–4,5 мкм.

4. БС состава $x \approx 0,7$ толщиной 0,2–0,3 мкм.

5. КС с $x \approx 0,32$ толщиной 1–1,5 мкм.

Концентрация носителей заряда в слоях определяется концентрацией индия при легировании в процессе роста по калибровочной зависимости от температуры молекулярно-го источника индия с учётом скорости роста.

При этом считается, что весь встроенный индий электрически активен, т.е. имеет практически 100-процентную электрическую активацию.

РЕЗУЛЬТАТЫ

МЛЭ-рост

При выращивании многослойной структуры nВn с большим различием в составе чередующихся слоёв необходимо обеспечить во времени оптимальные условия роста, когда слои с различным x должны иметь высокое структурное совершенство, что обеспечено проведением фундаментальных физико-химических исследований, выбором ориентации подложки (013) [24] и разработкой высокоскоростной и точной эллипсометрической методики контроля.

На рис. 1 представлено изменение эллипсометрических параметров Δ и ψ в плоскости Δ – ψ при выращивании типичной nВn-структуры на подложке (013)CdTe/ZnTe/GaAs для фотоприёмников спектрального диапазона 3–5 мкм.

При выращивании буферного слоя 1 (начало — точка А) наблюдается изменение эллипсометрических параметров Δ и ψ во времени

по сходящейся спиральной кривой к точке В. По полученным значениям толщины и времени роста определяется скорость роста, которая составляет 2,2 мкм/час. Далее проводится выращивание варизонного слоя 2 при уменьшении молекулярного потока кадмия, при котором изменения параметров следуют по прямой к точке С. Скорость роста остаётся постоянной с изменением потока кадмия, который в точке С определяет состав слоя 3. Толщина слоя определяется временем роста и скоростью роста, определённой на участке АВ, как и в случае выращивания последующих слоёв. При выращивании ПС параметры Δ и ψ постоянны, что характеризует заданные оптимальные условия роста. При достижении требуемой толщины ПС проводится выращивание БС, параметры Δ и ψ в процессе которого изменяются по кривой С–D. Состав БС близок по величине к составу буферного слоя. В конце процесса получения nВn-структуры проводится выращивание КС, при котором параметры Δ и ψ изменяются по кривой D–C' (точка С' по величине параметров Δ и ψ и, соответственно, состава близка к точке С).

Спектры пропускания и отражения

На образцах nВn-структур были проведены оптические измерения спектров пропускания и отражения. Типичный образец структуры толщиной 5,54 мкм имел следующие параметры толщин слоёв: для буферного слоя — 0,37 мкм, варизонного слоя — 0,63 мкм, ПС — 3,01 мкм, БС — 0,34 мкм, КС — 1,18 мкм. Неоднородность состава по толщине слоя ПС в образце не превышала величину 0,005 для структуры диаметром 76,2 мм, неоднородность толщины по площади структуры не превышала 0,2 мкм. Для послойных измерений из исследуемого образца вырезаны фрагменты размерами 1×1 см.

На рис. 2 приведены спектры пропускания фрагмента № 1 nВn-структуры при послойном травлении.

Толщина слоёв в nВn-структуре после травления определена из сравнения расчётных и наблюдаемых осцилляций в экспериментальных спектрах пропускания. Расчёт проводился на основе двухслойной модели для x порядка 0,3 с показателями преломления 3,4 для $\text{Cd}_{0,3}\text{Hg}_{0,7}\text{Te}$ и 2,8 для CdTe. Следует отметить, что составы, определяемые по спаду кривых спектров пропускания, показывают близкие значения. Это связано с определяющим влиянием на спектры

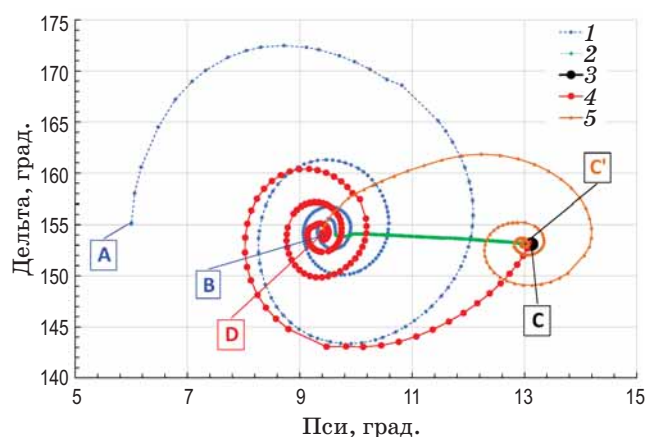


Рис. 1. Изменение эллипсометрических параметров Δ и ψ при выращивании nВn-структуры. Кривая А–В — рост слоя 1 на подложке (013)CdTe/ZnTe/GaAs; кривая В–С — рост слоя 2; точка С — рост слоя 3; кривая С–D — рост слоя 4; кривая D–C — рост слоя 5

Fig. 1. Changes in ellipsometric parameters Δ and ψ during nВn structure growth. Curve А–В — growth of layer 1 on the (013)CdTe/ZnTe/GaAs substrate; curve В–С — growth of layer 2; point С — growth of layer 3; curve С–D — growth of layer 4; curve D–C — growth of layer 5

пропускания ПС. В области интерференции спектров пропускания характерно заметное отличие в спектре исходного образца № 1 от спектров после травления. Такое поведение связано с заметным влиянием БС + КС на спектр пропускания при измерении исходного образца, которое исчезает при проведении последовательных травлений, приводящих вна-

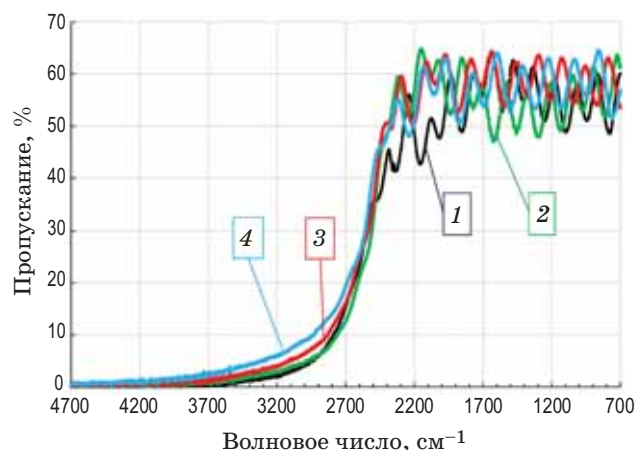


Рис. 2. Спектры пропускания nBn-структуры с послойным химическим травлением. Кривая 1 — исходный образец структуры толщиной 5,54 мкм; кривая 2 — после первого травления, толщина структуры 5,14 мкм; толщина после второго травления 4,88 мкм; кривая 3 — толщина после третьего травления, толщина структуры 4,80 мкм; кривая 4 — толщина после четвертого травления, толщины структуры 3,9 мкм.

Fig. 2. Transmission spectra of nBn structure with layer-by-layer chemical etching. Curve 1 — the initial sample of the structure is 5.54 microns thick; curve 2 — thickness after first etching 5.14 μm; thickness after second etching 4.88 μm; curve 3 — thickness after the third etching 4.80 μm; curve 4 — thickness after the fourth etching 3.9 microns

чае к заметному уменьшению его влияния и, в конечном итоге, его полному отсутствию при удалении КС. Таким образом, измерения спектров пропускания nBn-структуры позволяют подтвердить наличие встроенного БС и определить состав ПС.

В табл. 1 приведён состав nBn-структуры, полученный из анализа спектров пропускания при послойном травлении.

Измерение спектров отражения ex-situ даёт возможность получения более полной информации о распределении состава слоёв в структуре nBn. На рис. 3 приведены спектры отражения фрагмента № 2 nBn-структуры при послойном химическом травлении.

Как следует из приведённых спектров, наблюдается сильное изменение положения максимумов E_1 и $E_1 + \Delta$. Энергетическое положение пика E_1 изменялось немонотонно при травлении и определялось составом исследуемой поверхности. Так исходный спектр соответствует характеристикам поверхности КС. Резкое изменение энергетического положения пика E_1 после первого травления связано с приближением к поверхности БС. Дальнейшее изменение энергетического положения пика E_1 определяется характеристиками поверхности ПС и, наконец, смещение энергетического положения пика E_1 в сторону увеличения после последнего травления отражает свойства поверхности варизонного слоя.

В табл. 2 приведены составы nBn-структуры, полученный из анализа спектров отражения при послойном травлении.

Как следует из данных табл. 1 и 2, состав x ПС составляет порядка 0,325 мол. дол., что обеспечивает чувствительность в диапазоне 3–5 мкм с длинноволновой границей по уровню 0,5 от максимума, равной 4,39 мкм.

Таблица 1. Состав nBn-структуры, полученный при послойном травлении на основе спектров пропускания
Table 1. Composition of nBn structure obtained by layer-by-layer etching based on transmission spectra

Параметр	Номер травления			
	Исходный	1	2	3
Толщина, мкм	5,54	5,14	4,80	3,90
Состав, мол. дол.	0,324	0,309	0,325	0,326
E_g (300 К), эВ	0,3236	0,320	0,324	0,327
E_g (77 К), эВ	0,281	0,257	0,283	0,285
λ (77 К), мкм	4,41	4,82	4,39	4,35

Таблица 2. Состав nBn-структуры при послойном травлении на основе спектров отражения
Table 2. Composition of nBn structure by layer-by-layer etching based on reflectance spectra

Параметр	Номер травления					
	Исходный	1	2	3	4	5
Толщина, мкм	5,54	4,37	4,01	3,0	1,75	0,49
Состав, мол. дол.	0,338	0,523	0,328	0,326	0,334	0,637
E_g (300 К), эВ	0,342	0,597	0,328	0,326	0,336	0,769
E_g (77 К), эВ	0,303	0,603	0,287	0,284	0,297	0,802
λ (77 К), мкм	4,09	–	4,31	4,36	4,18	–

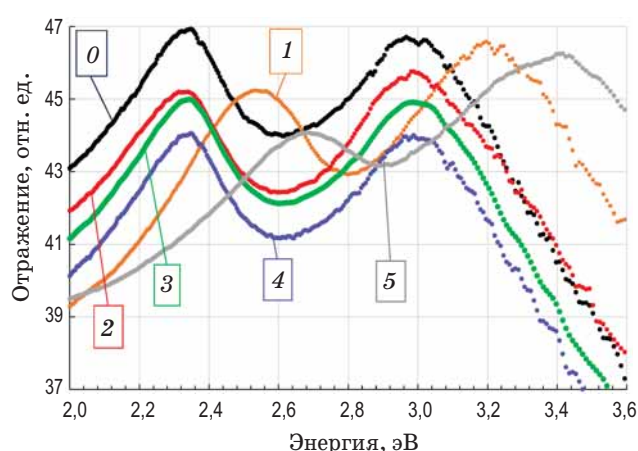


Рис. 3. Спектры отражения образца № 2 при послойном химическом травлении. Кривая 0 — исходный образец толщиной 5,54 мкм; кривая 1 — после первого травления, толщина структуры 4,37 мкм; кривая 2 — после второго травления, толщина 4,01 мкм; кривая 3 — после третьего травления, толщина структуры 3,0 мкм; кривая 4 — после четвертого травления, толщина структуры 1,75 мкм; кривая 5 — после пятого травления, толщина структуры 0,49 мкм

Fig. 3. Reflection spectra of sample № 2 with layer-by-layer chemical etching. Curve 0 — initial sample with a thickness of 5.54 μm ; curve 1 — after the first etching (thickness 4.37 μm), curve 2 — after the second etching (thickness 4.01 μm); curve 3 — after the third etching (thickness 3.0 μm), curve 4 — after the fourth etching (thickness 1.75 μm); curve 5 — after the fifth etching (thickness 0.49 μm)

Электрофизические параметры

Распределение концентрации основных носителей заряда n по толщине nBn-структуры было определено из измерений эффекта Холла при послойном химическом травлении. В стравленных слоях дифференциальным методом определялись проводимость и коэффи-

циент Холла с использованием двухслойной модели Петрица [28], на основе которых рассчитана концентрация электронов и их подвижность. В табл. 3 приведена концентрация и подвижность электронов в слоях после травления и в удалённых после травления слоях nBn-структуры.

Из приведённых данных следует, что при измерении исходного образца концентрация электронов повышена за счёт влияния тонкого КС с большой концентрацией индия. При последующих шагах травления концентрация электронов показывает близкие значения, определяемые концентрацией в ПС. Вариации величины подвижности связаны с влиянием КС и БС при начальных измерениях и буферным слоем после удаления КС и БС. Величина концентрации электронов в стравленном КС определяется на уровне $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что на порядок больше, чем в БС и ПС. Слабое падение концентрации электронов от $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до $1,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ наблюдается в слоях БС и ПС при приближении к буферному слою. Подвижность в этих слоях связана с изменением состава в БС и ПС, а для ПС — с влиянием нижнего варизонного слоя, как было отмечено нами в проведённых ранее исследованиях.

На рис. 4 приведены зависимости состава и концентрации электронов по толщине nBn-структуры, полученные из эллипсометрических измерений, спектров пропускания (табл. 1) и отражения (табл. 2), и из измерений эффекта Холла (табл. 3) соответственно.

Как видно из рисунка, наблюдается хорошее соответствие состава, определённого по спектрам пропускания, отражения и по эллипсометрическим измерениям, а также соответствие концентрации электронов в слоях заданному профилю легирования индием.

Таблица 3. Результаты Холловских измерений при послойном травлении**Table 3.** Results of Hall measurements during layer-by-layer etching

Параметр	Номер травления				
	Исходно	1	2	3	4
Толщина nВn, мкм	5,54	4,6	4,02	3,32	2,16
Интегральная концентрация электронов, $\text{см}^{-3} \times 10^{16}$	3,0	1,5	1,2	1,2	1,0
Подвижность, $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$	8300	12500	12500	9600	11000
Толщина удалённого слоя, мкм		0,94	0,58	0,7	1,16
Концентрация электронов в удалённом слое, $\text{см}^{-3} \times 10^{16}$		20,0	3,0	2,2	1,5
Подвижность в удалённом слое, $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$		2440	11300	16100	8670

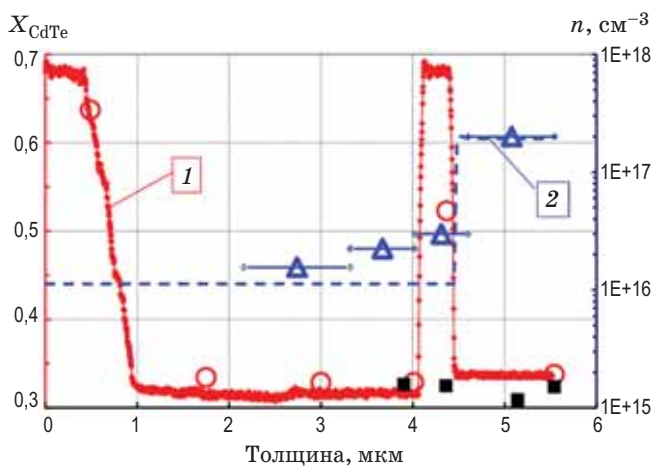


Рис. 4. Зависимость состава и концентрации электронов по толщине nВn-структуры. Кривая 1 — in situ эллипсометрические измерения; чёрные квадраты — из измерения спектров пропускания; красные открытые кружки — из измерения спектров отражения; кривая 2 — заданная концентрация индия при росте; открытые синие треугольники — концентрация электронов (77 К) в стратифицированных слоях. Синие отрезки — толщины стратифицированных слоёв

Fig. 4. Dependence of composition and electron concentration on the thickness of nBn structure: 1 (red curve) — in-situ ellipsometric measurements; black squares — measurements of transmission spectra; red open circles — measurements of reflection spectra; 2 (blue dashed line) — given indium concentration during growth; open blue triangles — electron concentration (77 K) in the stratified layers. Blue sections — thicknesses of the stratified layers

Результаты по измерениям темнового тока для тестовых мезоструктур на основе nВn-структур приведены в [29]. В диапазоне

температур 180–300 К значения темнового тока хорошо соответствуют эмпирической модели Rule-07. Эти значения сопоставимы со значениями темнового тока для современных барьерных фотоприёмников инфракрасного диапазона 3–5 мкм на основе MOCVD HgCdTe и III–V материалов на основе AlAsSb/InAsSb.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования процессов роста, найдены оптимальные технологические режимы и выращены типичные барьерные nВn-структуры на основе HgCdTe для фотоприёмников инфракрасного спектрального диапазона 3–5 мкм. Контроль состава и толщины слоёв осуществлялся в процессе роста с использованием высокоскоростного и высокоточного эллипсометра.

Проведены измерения спектров поглощения и отражения слоёв в nВn-структуре при послойном химическом травлении ex-situ. Показано, что спектры пропускания определяются составом поглощающего слоя. Спектры отражения позволили получить при послойном травлении распределение состава по толщине в слоях. Значения составов слоёв, определённые из спектров поглощения и отражения при послойном травлении, согласуются с данными, полученными из эллипсометрических измерений.

Измерения эффекта Холла при послойном химическом травлении показали, что концентрация электронов в контактном слое на порядок величины превышает их значение в

поглощающем слое и соответствует заданным значениям вводимого при легировании в процесс роста индия.

Измерения фотоэлектрических параметров меза-пВн-структур на выращенных образцах

продemonстрировали возможность создания высококачественных фотоприёмников для спектрального диапазона 3–5 мкм с пониженными темновыми токами, что позволяет им работать при повышенных температурах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Klipstein P.C. Depletion-less photodiode with suppressed dark current and method for producing the same // US Patent 7 928 473 B2. 2011. Publ. Apr. 19, 2011.
2. 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>
3. Klipstein P., Klin O., Grossman S., Snapi N., Lukomsky I., Aronov D., Yassen M., Glozman A., Fishman T., Berkowicz E., Magen O., Shtrichman I., Weiss E. XBn barrier photodetectors based on InAsSb with high operating temperatures // Opt. Eng. 2011. V. 50. № 6. P. 061002. <https://doi.org/10.1117/1.3572149>
4. Klipstein P., Klin O., Grossman S., Snapi N., Yaakovitz B., Brumer M., Lukomsky I., Aronov D., Yassen M., Yofis B., Glozman A., Fishman T., Berkowicz E., Magen O., Shtrichman I., Weiss E. MWIR InAsSb XBn detectors for high operating temperatures // Proc. SPIE. 2010. V. 7660. P. 76602Y. <https://doi.org/10.1117/12.849503>
5. Weiss E., Klin O., Grossmann S., Snapi N., Lukomsky I., Aronov D., Yassen M., Berkowicz E., Glozman A., Klipstein P., Fraenkel A., Shtrichman I. InAsSb based XBnn bariodes grown by molecular beam epitaxy on GaAs // J. Crystal Growth. 2012. V. 339. P. 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.11.076>
6. Savich G.R., Sidor D.E., Du X., Wicks G., Debnath M.C., Mishima T.D., Santos M.B., Golding T.D., Jain M., Craig A.P. et al. III-V semiconductor extended short-wave infrared detectors // J. Vac. Sci. Technol. B. 2017. V. 35. P. 02B105. <https://doi.org/10.1116/1.4975340>
7. Ting D.Z., Soibel A., Khoshakhlagh A., Keo S.A., Rafol S.B., Fisher A.M., Pepper B.J., Luong E.M., Hill C.J., Gunapala S.D. Advances in III-V semiconductor infrared absorbers and detectors // Infrared Phys. Technol. 2019. V. 97. P. 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.12.034>
8. Ting D.Z., Soibel A., Khoshakhlagh A., Rafol S.B., Keo S., Höglund L., Fisher A.M., Luong E.M., Gunapala S.D. Mid-wavelength high operating temperature barrier infrared detector and focal plane array // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 113. № 2. P. 021101. <https://doi.org/10.1063/1.5033338>
9. Wu D., Li J., Dehzangi A., Razeghi M. Mid-wavelength infrared high operating temperature pBn photodetectors based on type-II InAs/InAsSb superlattice // AIP Adv. 2020. V. 10. № 2. P. 025018. <https://doi.org/10.1063/1.5136501>
10. Klipstein P.C., Avnon E., Benny Y., Fraenkel R., Glozman A., Grossman S., Klin O., Langoff L., Livneh Y., Lukomsky M., Nitzani P., Shkedy L., Shtrichman I., Snapi N., Tuito A., Weiss E. InAs/GaSb Type II superlattice barrier devices with a low dark current and a high-quantum efficiency // Proc. SPIE. 2014. V. 9070. P. 90700U. <https://doi.org/10.1117/12.2049825>

REFERENCES

1. Klipstein P.C. Depletion-less photodiode with suppressed dark current and method for producing the same // US Patent 7 928 473 B2. 2011. Publ. Apr. 19, 2011
2. 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>
3. Klipstein O., Klin S., Grossman N., Snapi I., Lukomsky D., Aronov M., Yassen A., Glozman T., Fishman E., Berkowicz O., Magen I., Shtrichman I., Weiss E. XBn barrier photodetectors based on InAsSb with high operating temperatures // Opt. Eng. 2011. V. 50. 061002–1–10. <https://doi.org/10.1117/1.3572149>
4. Klipstein P., Klin O., Grossman S., Snapi N., Yaakovitz B., Brumer M., Lukomsky I., Aronov D., Yassen M., Yofis B., Glozman A., Fishman T., Berkowicz E., Magen O., Shtrichman I., Weiss E. MWIR InAsSb XBn detectors for high operating temperatures // Proc. SPIE 7660. Infrared Technology and Applications XXXVI. 76602Y (3 May 2010). <https://doi.org/10.1117/12.849503>
5. Weiss E., Klin O., Grossmann S., Snapi N., Lukomsky I., Aronov D., Yassen M., Berkowicz E., Glozman A., Klipstein P., Fraenkel A., Shtrichman I. InAsSb-based XBnn bariodes grown by molecular beam epitaxy on GaAs // J. Crystal Growth. 2012. V. 339. P. 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.11.076>
6. Savich G.R., Sidor D.E., Du X., Wicks G., Debnath M.C., Mishima T.D., Santos M.B., Golding T.D., Jain M., Craig A.P. et al. III-V semiconductor extended short-wave infrared detectors // J. Vac. Sci. Technol. B. 2017. V. 35. P. 02B105. <https://doi.org/10.1116/1.4975340>
7. Ting D.Z., Soibel A., Khoshakhlagh A., Keo S.A., Rafol S.B., Fisher A.M., Pepper B.J., Luong E.M., Hill C.J., Gunapala S.D. Advances in III-V semiconductor infrared absorbers and detectors // Infrared Phys. Technol. 2019. V. 97. P. 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.12.034>
8. Ting D.Z., Soibel A., Khoshakhlagh A., Rafol S.B., Keo S., Höglund L., Fisher A.M., Luong E.M., Gunapala S.D. Mid-wavelength high operating temperature barrier infrared detector and focal plane array // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 113. P. 021101. <https://doi.org/10.1063/1.5033338>
9. Wu D., Li J., Dehzangi A., Razeghi M. Mid-wavelength infrared high operating temperature pBn photodetectors based on type-II InAs/InAsSb superlattice // AIP Adv. 2020. V. 10. № 2. P. 025018. <https://doi.org/10.1063/1.5136501>
10. Klipstein P.C., Avnon E., Benny Y., Fraenkel R., Glozman A., Grossman S., Klin O., Langoff L., Livneh Y., Lukomsky M., Nitzani P., Shkedy L., Shtrichman I., Snapi N., Tuito A., Weiss E. InAs/GaSb Type II superlattice barrier devices with a low dark current and a high-quantum efficiency // Proc. SPIE. 2014. V. 9070. P. 90700U. <https://doi.org/10.1117/12.2049825>

11. Ting D.Z., Hill C.J., Soibel A., Keo S., Mumolo J., Nguyen J., Gunapala S.D. A high-performance long wavelength superlattice complementary barrier infrared detector // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 95. P. 023508. <https://doi.org/10.1063/1.3177333>
12. Ting D.Z., Soibel A., Khoshakhlagh A., Keo S., Rafol S.B., Fisher A.M., Pepper B.J., Luong E.M., Hill C.J., Gunapala S.D. Antimonide e-SWIR, MWIR, and LWIR barrier infrared detector and focal plane array development // *Proc. SPIE.* 2018. V. 1062410. <https://doi.org/10.1117/12.2305248>
13. Tennant W.E. "Rule 07" revisited: still a good heuristic predictor for p/n HgCdTe photodiode performance? // *J. Electron. Mater.* 2010. V. 39. № 7. P. 1030–1035. <https://doi.org/10.1007/s11664-010-1084-9>
14. Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M., Madejczyk P., Krishna S. InAsSb-based infrared photodetectors: Thirty years later on // *Sensors.* 2020. V. 20. № 24. P. 7047. <https://doi.org/10.3390/s20247047>
15. Lei W., Antoszewski J., Faraone L. Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors // *Appl. Phys. Rev.* 2015. V. 2. P. 041303. <https://doi.org/10.1063/1.4936577>
16. Hanna S., Eich D., Mahlein M., Fick W., Schirmacher W., Thöt R., Wendler J., Figgemeier H. MCT-based LWIR and VLWIR 2D focal plane arrays for low dark currents application at AIM // *J. Electron. Mater.* 2016. V. 45. № 9. P. 4542–4551. <http://doi.org/10.1007/s11664-016-4523-4>
17. Itsuno A.M., Phillips J.D., Velicu S. Mid-wave infrared HgCdTe nBn photodetector // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 100. P. 161102. <https://doi.org/10.1063/1.4704359>
18. Itsuno A.M., Phillips J.D., Velicu S. Design of an Auger-suppressed unipolar HgCdTe NBnN photodetector // *J. Electron. Mater.* 2012. V. 41. № 10. P. 2886–2892. <https://doi.org/10.1007/s11664-012-1992-y>
19. Kopytko M., Keblowski A., Gawron W., Madejczyk P., Kowalewski A., Jozwikowski K. High-operating temperature MWIR nBn HgCdTe detector grown by MOCVD // *Opto-Electron. Rev.* 2013. V. 21. № 4. P. 402–405. <https://doi.org/10.2478/s11772-013-0101-y>
20. Kopytko M., Keblowski A., Gawron W., Martyniuk P., Madejczyk P., Jozwikowski K., Kowalewski A., Markowska O., Rogalski A. MOCVD grown HgCdTe barrier detectors for MWIR high-operating temperature operation // *Optical Engineering.* 2015. V. 54. № 10. P. 105105. <https://doi.org/10.1117/1.OE.54.10.105105>
21. Gravrand O., Boulard F., Ferron A., Ballet P., Hassis W. A new nBn IR detection concept using HgCdTe material // *J. Electron. Mater.* 2015. V. 44. № 9. P. 3069–3075. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3821-6>
22. He Li., Wu Y., Chen L., Wang S.L., Yu M.F., Qiao Y.M., Yang J.R., Li Y.J., Ding R.J., Zhang Q.Y. Composition control and surface defects of MBE-grown HgCdTe // *Journal of Crystal Growth.* 2001. V. 227–228. P. 677–682. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)00801-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)00801-6)
23. Jówikowski K., Rogalski A. Effect of dislocations on performance of LWIR HgCdTe photodiodes // *J. Electron. Mater.* 2000. V. 29. № 6. P. 736–741. <https://doi.org/10.1007/s11664-000-0217-y>
24. Сидоров Ю.Г., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Якушев М.В., Варавин В.С., Анциферов А.П. Молекулярно-лучевая эпитаксия узкозонных соединений $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Оборудование и технология // *Оптический журнал.* 2000. Т. 67. № 1. С. 39–44.
25. Спесивцев Е.В., Рыхлицкий С.В., Швецов В.А. Развитие методов и средств оптической эллипсометрии
11. Ting D.Z., Hill C.J., Soibel A., Keo S., Mumolo J., Nguyen J., Gunapala S.D. A high-performance long wavelength superlattice complementary barrier infrared detector // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 95. P. 023508. <https://doi.org/10.1063/1.3177333>
12. Ting D.Z., Soibel A., Khoshakhlagh A., Keo S., Rafol S.B., Fisher A.M., Pepper B.J., Luong E.M., Hill C.J., Gunapala S.D. Antimonide e-SWIR, MWIR, and LWIR barrier infrared detector and focal plane array development // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10624. P. 10. <https://doi.org/10.1117/12.2305248>
13. Tennant W.E. "Rule 07" revisited: still a good heuristic predictor for p/n HgCdTe photodiode performance? // *J. Electron. Mater.* 2010. V. 39. № 7. P. 1030–1035. <https://doi.org/10.1007/s11664-010-1084-9>
14. Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M., Madejczyk P., Krishna S. InAsSb-based infrared photodetectors: Thirty years later on // *Sensors.* 2020. V. 20. № 24. P. 7047. <https://doi.org/10.3390/s20247047>
15. Lei W., Antoszewski J., Faraone L. Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors // *Appl. Phys. Rev.* 2015. V. 2. P. 041303. <https://doi.org/10.1063/1.4936577>
16. Hanna S., Eich D., Mahlein M., Fick W., Schirmacher W., Thöt R., Wendler J., Figgemeier H. MCT-based LWIR and VLWIR 2D focal plane arrays for low dark currents application at AIM // *J. Electron. Mater.* 2016. V. 45. № 9. P. 4542–4551. <http://doi.org/10.1007/s11664-016-4523-4>
17. Itsuno A.M., Phillips J.D., Velicu S. Mid-wave infrared HgCdTe nBn photodetector // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 100. P. 161102. <https://doi.org/10.1063/1.4704359>
18. Itsuno A.M., Phillips J.D., Velicu S. Design of an Auger-suppressed unipolar HgCdTe NBnN photodetector // *J. Electron. Mater.* 2012. V. 41. № 10. P. 2886–2892. <https://doi.org/10.1007/s11664-012-1992-y>
19. Kopytko M., Keblowski A., Gawron W., Madejczyk P., Kowalewski A., Jozwikowski K. High-operating temperature MWIR nBn HgCdTe detector grown by MOCVD // *Opto-Electron. Rev.* 2013. V. 21. № 4. P. 402–405. <https://doi.org/10.2478/s11772-013-0101-y>
20. Kopytko M., Keblowski A., Gawron W., Martyniuk P., Madejczyk P., Jozwikowski K., Kowalewski A., Markowska O., Rogalski A. MOCVD grown HgCdTe barrier detectors for MWIR high-operating temperature operation // *Optical Engineering.* 2015. V. 54. № 10. P. 105105. <https://doi.org/10.1117/1.OE.54.10.105105>
21. Gravrand O., Boulard F., Ferron A., Ballet P., Hassis W. A new nBn IR detection concept using HgCdTe material // *J. Electron. Mater.* 2015. V. 44. № 9. P. 3069–3075. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3821-6>
22. He Li., Wu Y., Chen L., Wang S.L., Yu M.F., Qiao Y.M., Yang J.R., Li Y.J., Ding R.J., Zhang Q.Y. Composition control and surface defects of MBE-grown HgCdTe // *Journal of Crystal Growth.* 2001. V. 227–228. P. 677–682. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)00801-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)00801-6)
23. Jówikowski K., Rogalski A. Effect of dislocations on performance of LWIR HgCdTe photodiodes // *J. Electron. Mater.* 2000. V. 29. № 6. P. 736–741. <https://doi.org/10.1007/s11664-000-0217-y>
24. Sidorov Yu.G., Dvoretzki S.A., Mikhalov N.N., Yakushev M.V., Varavin V.S., Antsiferov A.P. Molecular-beam epitaxy of narrow-band $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Equipment and technology // *J. Opt. Technol.* 2000. V. 67. № 1. P. 31–36. <https://doi.org/10.1364/JOT.67.000031>
25. Spesivtsev E.V., Rykhlytskii S.V., Shvets V.A. Development of methods and instruments for optical ellipso-

- в Институте физики полупроводников СО РАН // Автометрия. 2011. Т. 47. № 5. С. 5–7.
26. Dvoretzky S., Mikhailov N., Sidorov Yu., Shvets V., Danilov S., Wittman B., Ganichev S. Growth of HgTe quantum wells for IR to THz detectors // J. Electron. Mater. 2010. V. 39. № 7. P. 918. <https://doi.org/10.1007/s11664-010-1191-7>
27. Hansen G.L., Schmit J.L., Casselman T.N. Energy gap versus alloy composition and temperature in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. P. 7099–7101. <https://doi.org/10.1063/1.330018>
28. Petritz R.L. Theory of an experiment for measuring the mobility and density of carriers in the space-charge region of a semiconductor surface // Phys. Rev. 1958. V. 110. P. 1254–1262. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.110.1254>
29. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Diffusion-limited dark currents in mid-wave infrared HgCdTe-based nBn structures with Al_2O_3 passivation // Journal of Physics D: Applied Physics. 2020. V. 53. P. 055107. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab5487>

АВТОРЫ

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

Василий Семенович Варавин — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 7003347783; <https://orcid.org/0000-0001-7722-6428>; varavin@isp.nsc.ru

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

Роман Владимирович Менщиков — старший инженер-технолог, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия; <https://orcid.org/0009-0001-6127-9469>; karpuy@yandex.ru

Владимир Григорьевич Ремесник — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 6602971779; <https://orcid.org/0009-0003-7495-929X>; remesnik@isp.nsc.ru

Иван Николаевич Ужаков — ведущий инженер - технолог, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия; <https://orcid.org/0009-0003-4982-2486>; uzhakov@isp.nsc.ru

- metry at the Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences // Optoelectron. Instrument. Data Process. 2011. V. 47. P. 419. <https://doi.org/10.3103/S8756699011050219>
26. Dvoretzky S., Mikhailov N., Sidorov Yu., Shvets V., Danilov S., Wittman B., Ganichev S. Growth of HgTe quantum wells for IR to THz detectors // J. Electron. Mater. 2010. V. 39. № 7. P. 918. <https://doi.org/10.1007/s11664-010-1191-7>
27. Hansen G.L., Schmit J.L., Casselman T.N. Energy gap versus alloy composition and temperature in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. P. 7099–7101. <https://doi.org/10.1063/1.330018>
28. Petritz R.L. Theory of an experiment for measuring the mobility and density of carriers in the space-charge region of a semiconductor surface // Phys. Rev. 1958. V. 110. P. 1254–1262. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.110.1254>
29. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Diffusion-limited dark currents in mid-wave infrared HgCdTe-based nBn structures with Al_2O_3 passivation // Journal of Physics D: Applied Physics. 2020. V. 53. P. 055107. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab5487>

AUTHORS

Nikolay N. Mikhailov — Ph.D. in Physics, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 7006462618; <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>; mikhailov@isp.nsc.ru

Vasily S. Varavin — Ph.D. in Physics, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 7003347783; <https://orcid.org/0000-0001-7722-6428>; varavin@isp.nsc.ru

Sergey A. Dvoretzky — Ph.D. in Physics, Leading Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 6701661877; <https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>; dvor@isp.nsc.ru

Roman V. Menshchikov — Senior Engineer Technologist, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; <https://orcid.org/0009-0001-6127-9469>; karpuy@yandex.ru

Vladimir G. Remesnik — Ph.D. in Physics, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 6602971779; <https://orcid.org/0009-0003-7495-929X>; remesnik@isp.nsc.ru

Ivan N. Uzhakov — Lead Engineer Technologist, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; <https://orcid.org/0009-0003-4982-2486>; uzhakov@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 29.09.2023

Одобрена после рецензирования 27.11.2023

Принята к печати 29.12.2023

The article was submitted to the editorial office 29.09.2023

Approved after review 27.11.2023

Accepted for publication 29.12.2023