

УДК 621.383.4/5
DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-28-35
EDN: YJLDES

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,
07.57.Kp, 85.60.Dw



Исследования оптических характеристик *nВп*-гетероструктур на основе CdHgTe средневолнового ИК-диапазона

Н. И. Яковлева, К. О. Болтарь, Р. В. Давлетшин, А. В. Войцеховский,
С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, В. В. Лопатин, С. Е. Яковсон

*Проведены исследования оптических параметров униполярной *nВп*-гетероструктуры с поглощающим слоем *n*-CdHgTe, фоточувствительном в средневолновом ИК диапазоне спектра, измерены спектры отражения и пропускания. Определены толщины и состав слоев, входящих в *nВп*-гетероструктуру на основе CdHgTe методом подгонки параметров по теоретической модели расчета, связывающей электрические векторы падающего, отраженного и поглощенного излучения в рассматриваемой многослойной структуре. Спрогнозирована ожидаемая граничная длина волны ИК фотоприемника на основе этой *nВп*-гетероструктуры.*

Ключевые слова: CdHgTe (КРТ), инфракрасный (ИК) спектральный диапазон, *nВп*-гетероструктура, спектры пропускания.

1. Введение

В последние годы в России [1] и за рубежом [2] проводятся широкомасштабные исследования и разработка фотоприемных устройств (ФПУ), работающих при повышенных температурах. Основной акцент делается на разработку дизайна и топологии многоэлементных фотоприемных (МФП) структур MWIR- и LWIR-диапазонов на основе *nВп*-гетероструктур *n*-CdHgTe с барьерными слоями различной конфигурации. Конструкция гетеро-

структур КРТ и дизайн ФПУ нового класса имеют огромное значение для создания приборной аппаратуры с минимальными темновыми токами и предельными параметрами.

В мировой фотоэлектронике известны барьерные ФПУ на основе InSb и InAsSb в *XВп*-конфигурации [3–6], в которых за счет специального построения зонной диаграммы подавляются диффузионный, генерационно-рекомбинационный, туннельный токи, а также токи поверхностной утечки за счет пассивации поглощающего слоя широкозонными

Яковлева Наталья Ивановна¹, гл.н.с., д.т.н.
Болтарь Константин Олегович^{1,2}, нач. НТК, д.ф.-м.н.
Давлетшин Ренат Валиевич¹, инженер 1 кат.
Войцеховский Александр Васильевич³, гл.н.с., д.ф.-м.н.
Дворецкий Сергей Алексеевич^{3,4}, в.н.с., к.ф.м.н.
Михайлов Николай Николаевич^{3,4}, с.н.с., к.ф.-м.н.
Лопатин Вадим Владимирович⁵, рук. проекта, д.т.н.
Яковсон Сергей Евгеньевич⁶, дир. департамента, к.т.н.

¹ АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).
Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

³ Томский государственный университет.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

⁴ Институт физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова.

Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13.

⁵ Фонд перспективных исследований.

Россия, 121059, Москва, Бережковская наб., 22, стр. 3.

⁶ АО «Швабе».

Россия, 129366, Москва, Проспект Мира, 176.

Статья поступила в редакцию 31.10.2023

После доработки 20.11.2023

Принята к публикации 29.11.2023

© Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Давлетшин Р. В., Войцеховский А. В., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Лопатин В. В., Яковсон С. Е., 2023

барьерными слоями. Для таких ФПУ характерным является высокое отношение сигнал/шум, что позволяет повысить фотоэлектрические параметры или работать при повышенной температуре.

Большое внимание ведущие разработчики фотоэлектроники уделяют созданию униполярных *nВп*-структур с поглощающими *n*-слоями на основе тройных соединений CdHgTe (КРТ). Выбор архитектуры униполярного типа на основе CdHgTe [7, 8] оптимален с точки зрения работы как в средневолновом ИК диапазоне спектра (3–8 мкм), соответствующем окну прозрачности атмосферы 3–5 мкм, так и в длинноволновом ИК-диапазоне (8–12 мкм) спектра, поскольку в таких архитектурах отсутствуют технологически трудно получаемые слои *p*-типа проводимости. Преимуществом архитектур униполярного типа на основе CdHgTe являются минимальные темновые токи, а следовательно, малые шумы и предельные параметры.

В связи с выше сказанным, основные усилия ученых РФ направлены на разработку и совершенствование униполярных структур *nВп*-гетероструктур КРТ с барьерными слоями [9, 10] различного типа. Прорабатывается технология изготовления таких гетероструктур, как на подложках КЦТ, так и альтернативных подложках из материалов группы A_3B_5 .

Целью данной работы являлись исследования оптических характеристик *nВп*-гетероструктур на основе CdHgTe, выращенных методом МЛЭ, для дальнейшего прогнозирования параметров и построения на их основе высокотемпературных ФПУ нового поколения.

2. Моделирование спектра пропускания *nВп*-структуры

Спектр пропускания полупроводниковой структуры позволяет оценить толщины слоев и мольную долю содержания CdTe в тройном растворе CdHgTe, а также на ранней стадии контроля исходного материала спрогнозировать граничную длину волны спектральной чувствительности ФПУ, планируемого к изготовлению.

Известны методы измерения состава, основанные на измерении спектров пропускания полупроводниковых структур [11] и толщины

по количеству наблюдаемых интерференционных экстремумов [12] и Фурье-анализу интерференционной картины спектра пропускания [13, 14]. Вопрос прохождения излучения через многослойные полупроводниковые гетеросистемы изучен рядом авторов [15–17]. Для вычисления спектров отражения и пропускания многослойной гетероструктуры необходимо установить связь интенсивностей падающего излучения E_0^+ с отраженным E_0^- и излучением, прошедшим образец, учитывая поглощение в каждом слое и многократные отражения от границ раздела между соседними слоями.

Общее уравнение, связывающее электрические векторы падающего, отраженного и прошедшего излучений в рассматриваемой многослойной структуре, имеет вид

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \prod_{j=1}^{s+1} t_j \\ \prod_{j=1}^s M_j \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & r_{s+1} \\ r_{s+1} & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{s+1}^+ \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где r_{m+1} (t_{m+1}) коэффициенты отражения (пропускания) Френеля, m – порядковый номер слоя, $m = 1 \dots s$.

$$r_{m+1} = \frac{N_m - N_{m+1}}{N_m + N_{m+1}}, \quad t_{m+1} = \frac{2N_m}{N_m + N_{m+1}}, \quad (2)$$

N_m и N_{m+1} – комплексные показатели преломления, $N_m = n_m - ik_m$;

$M_{m+1} = \begin{pmatrix} \exp(i\delta_{m+1}) r_{m+1} \exp(-i\delta_{m+1}) \\ r_{m+1} \exp(i\delta_{m+1}) \exp(-i\delta_{m+1}) \end{pmatrix}$ – характеристическая матрица;

k_m – мнимая часть показателя преломления, называемая коэффициентом экстинкции, которая связана с коэффициентом поглощения $\alpha_m(\lambda)$, соответствующим длине волны λ , соотношением

$$\alpha_m(\lambda) = \frac{4\pi k_m}{\lambda};$$

$\delta_{m+1} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) N_{m+1} d_{m+1} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) (n_{m+1} - ik_{m+1}) d_{m+1}$ – аргумент экспоненциальной функции;

d_m – толщина m -го слоя в многослойной структуре.

Для вычисления коэффициентов отражения и пропускания многослойной гетеросистемы используется матричный метод Абея

[18], учитывающий связь векторов электрического и магнитного полей на поверхности раздела: E_m^+ , E_m^- , E_{s+1}^+ , E_{s+1}^- :

$$\begin{pmatrix} E_m^+ \\ E_m^- \end{pmatrix} = \frac{1}{t_{m+1}} M_{m+1} \begin{pmatrix} E_{m+1}^+ \\ E_{m+1}^- \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Коэффициент отражения рассчитывается как отношение мощности излучения, отраженного от первой поверхности раздела, к мощности падающего излучения (коэффициент отражения)

$$R_1 = \left| \frac{E_0^-}{E_0^+} \right|^2. \quad (4)$$

Коэффициент пропускания рассчитывается как отношение мощности излучения, прошедшего в подложку, к мощности излучения, падающего на первую поверхность раздела

$$T_{s+1} = \frac{n_{s+1}}{n_0} \left| \frac{E_{s+1}^+}{E_0^+} \right|^2. \quad (5)$$

Особенностью используемого в данной работе метода являлось то, что учитывалось не только поглощение в подложке, но и отражение от границы воздух подложка [19], при этом коэффициент поглощения в подложке задается формулой

$$T_{sub} = \frac{t_{sub} \cdot Att}{1 - r_{sub} \cdot Att^2}, \quad (6)$$

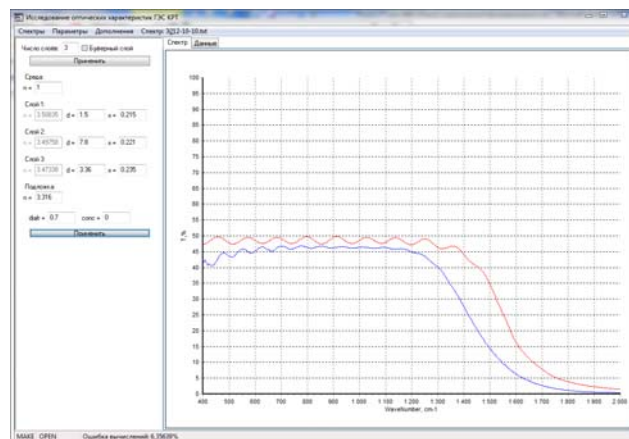
где $Att = \exp\left(-\frac{conc}{\lambda}\right)$, $t_{sub} = \frac{4 \cdot N_{sub} \cdot N_0}{(N_{sub} + N_0)^2}$,

$r_{sub} = \frac{(N_{sub} - N_0)^2}{(N_{sub} + N_0)^2}$, N_0 – показатель преломления среды, N_{sub} – показатель преломления подложки, $conc$ – параметр поглощения, задаваемый пользователем.

Оборудование для измерения спектральных характеристик многослойных гетероструктур, используемых для изготовления ФПУ барьерного типа, включала в состав ИК Фурье-спектрометр «Vertex» и программное обеспечение для расчета параметров слоев гетероструктур по спектрам пропускания (рис. 1а, б).



а)



б)

Рис. 1. Фурье-спектрометр и рабочее окно программного обеспечения, для расчета параметров структур ГЭС CdHgTe по спектрам пропускания

Фурье-спектроскопия основана на использовании явления интерференции, что обуславливает высокую точность определения волновых чисел, высокое разрешение, и почти полное отсутствие рассеянного света. Сигнал, регистрируемый в зависимости от изменения оптической разности хода, характеризуется интерферограммой. Каждой длине волны соответствует определенная интерференционная кривая, получаемая при перемещении подвижного элемента оптической схемы Фурье-спектрометра (зеркала). После проведения Фурье-анализа интерферограмма преобразуется в спектр, который в дальнейшем анализируется.

Программное обеспечение, входящее в состав оборудования (рис. 1б), позволяет определять параметры рабочих слоев сложных гетероструктур на основе КРТ путем приближения экспериментальной кривой с расчетной, варьируя начальные параметры. При моделировании спектра пропускания учитывается наличие и влияние рабочих,

варизонных, буферных слоёв КРТ, поглощение в подложке и показатель неравномерности поверхности структуры.

Метод определения коэффициента пропускания является косвенным и основывается на измерении коэффициента поглощения $\alpha(\nu)$, который находится из законов дисперсии зоны проводимости, зоны легких и тяжелых дырок. Для расчета коэффициента поглощения использовалась модель из работы [20]. Для определения состава эпитаксиального слоя КРТ применялась эмпирическая формула зависимости ширины запрещенной зоны от состава и температуры [21]

$$E_g(x, T) = -0,303 \cdot (1-x) + 1,606 \cdot x - 0,132 \cdot x \cdot (1-x) + \frac{6,3 \cdot (1-x) - 3,25 \cdot x - 5,92 \cdot x \cdot (1-x)}{11 \cdot (1-x) + 78,7 \cdot x + T} \times 10^{-4} \cdot T^2. \quad (7)$$

Для расчета показателя преломления использовалась характеристическая зависимость из работы [22], которая представляет собой эмпирическую формулу, для показателя преломления КРТ от длины волны и температуры

$$n(\lambda, T)^2 = A + \frac{B}{1 - (C/\lambda)^2} + D\lambda^2, \quad (8)$$

где A, B, C, D – коэффициенты, изменяющиеся в зависимости от состава и температуры:

$$\begin{aligned} A &= 13,173 - 9,852x + 2,909x^2 + 10^{-3} \cdot (300 - T) \\ B &= 0,83 - 0,246x + 0,0961x^2 + 8 \cdot 10^{-4} \cdot (300 - T) \\ C &= 6,706 - 14,437x + 8,531x^2 + 7 \cdot 10^{-4} \cdot (300 - T) \\ D &= 1,953 \cdot 10^{-4} - 0,00128x + 1,853 \cdot 10^{-4} x^2 \end{aligned}$$

Согласно формуле (8) показатель преломления быстро падает в диапазоне длин волн вблизи ширины запрещенной зоны и медленно снижается с дальнейшим ростом длины волны.

3. Экспериментальная часть

Технология получения ГЭС КРТ методом молекулярно-лучевой эпитаксии разработана в ИФП СО РАН (г. Новосибирск)

(ТУ 1778-003-03533808-2003). Эпитаксиальные слои выращивались на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Обь», модернизированной для работы с ртутью [23]. В качестве подложек использовался GaAs с ориентацией (013) с буферными слоями ZnTe/CdTe. На рис. 2 показана конфигурация тестовой nBn -гетероструктуры с поглощающим слоем CdHgTe состава $x = 0,32$ мол. дол., выращенной в ИФП СО РАН методом МЛЭ [24].

Контактный слой n -слой $Cd_{0,35}Hg_{0,65}Te$, толщина 0,35 мкм
Барьерный слой $Cd_{0,84}Hg_{0,16}Te$, толщина 0,2 мкм
Переходный слой CdHgTe
Поглощающий n -слой $Cd_{0,32}Hg_{0,68}Te$ толщина 4–8 мкм
Градиентный слой CdHgTe
Буферные слои ZnTe/CdTe
Оптически прозрачная подложка GaAs

Рис. 2. Конфигурация тестовой nBn -гетероструктуры с поглощающим слоем CdHgTe состава $x = 0,32$ мол. дол.

На рис. 3 представлен спектр пропускания nBn -гетероструктуры на основе CdHgTe с широкозонным барьерным слоем.

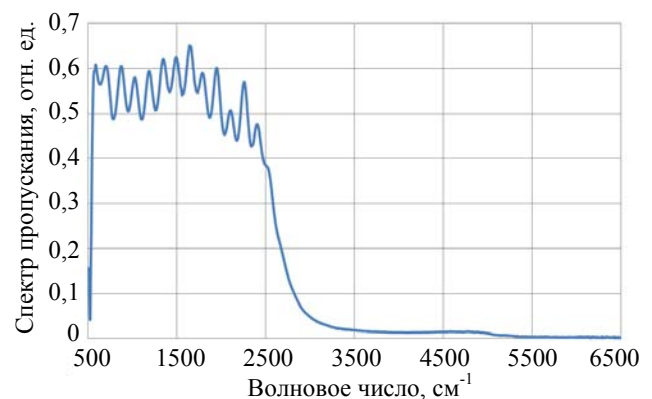


Рис. 3. Спектр пропускания nBn -гетероструктуры на основе CdHgTe с широкозонным барьерным слоем

На рис. 4 представлен спектр отражения от фронтальной поверхности nBn -гетероструктуры на основе CdHgTe с широкозонным барьерным слоем.

На рис. 5 представлены результаты моделирования спектра пропускания nBn -гетероструктуры на основе CdHgTe с широкозонным барьерным слоем.

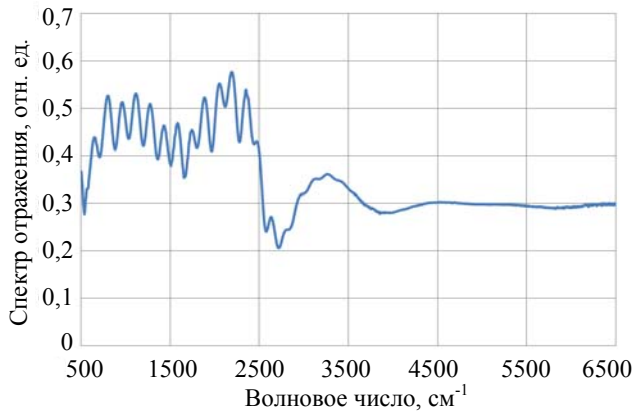


Рис. 4. Спектр отражения *nBn*-гетероструктуры на основе *CdHgTe* с широкозонным барьерным слоем

В результате моделирования спектра пропускания получены следующие результаты (таблица).

Соответствие параметров, представленных в сертификате на *nBn*-гетероструктуру на основе *CdHgTe* и полученных в результате метода подгонки параметров по разработанной модели, удовлетворительное. Пики модуляции совпадают по длинам волн. Результаты расчёта толщин слоёв близки к паспортным данным. Применение усовершенствованной модели показателя преломления обеспечило удовлетворительную сходимость расчётного графика к экспериментальному, ошибка вычислений составила $\sim 13,6\%$.

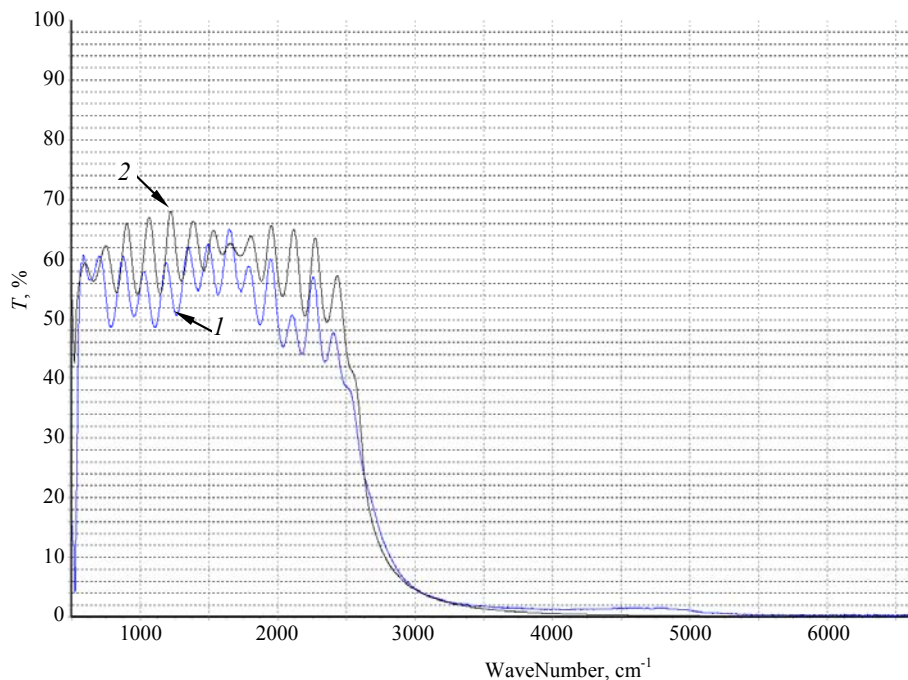


Рис. 5. Спектры пропускания *nBn*-гетероструктуры на основе *CdHgTe*: 1 – данные измерений; 2 – данные моделирования

Таблица

Параметры *nBn*-гетероструктуры на основе *CdHgTe*

Спектр образца <i>nBn</i> № ЭО-01			
Параметр		Начальные данные	Результаты вычислений
Верхний контактный слой	Толщина, мкм	0,3	0,22
	Состав, мол. дол.	0,35	0,326
Барьерный слой	Толщина, мкм	0,21	0,21
	Состав, мол. дол.	0,84	0,84
Поглощающий слой	Толщина, мкм	8,0	8,1
	Состав, мол. дол.	0,32	0,322
Варизонный слой	Толщина, мкм	1,0	1,5
	Состав, мол. дол.	0,50	0,59
Буферный слой	Толщина, мкм	5,5	5,5
Ошибка вычислений, %			13,6 %

Поглощение излучения происходит в слое CdHgTe толщиной $\sim 8,1$ мкм состава $x = 0,322$ мол. дол., по экспериментальным данным можно оценить граничную длину волны фотоприемного устройства, изготовленного на основе nVn -гетероструктуры, которая составит $\lambda_{0,5} \approx 4,5$ мкм при $T = 77$ К.

4. Заключение

Уровень фотоэлектрических параметров оптико-электронных приборов и систем зависит как от конструкции прибора в целом, так и от архитектуры фоточувствительных элементов (ФЧЭ), формирующих фоточувствительную матрицу на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$, что подтверждается результатами исследований ведущих зарубежных разработчиков фотоэлектроники. Исследования nVn -структур на основе CdHgTe открывают возможности построения барьерных ФПУ для оптико-электронных систем различного назначения.

Проведены исследования оптических параметров исходной nVn -гетероструктуры с поглощающим слоем n -CdHgTe и широкозонным барьерным слоем, измерены спектры отражения и пропускания. Определены толщины и состав слоев. Соответствие параметров, представленных в сертификате на nVn -гетероструктуру на основе КРТ и полученных в результате метода подгонки параметров по представленной модели, удовлетворительное. Пики модуляции совпадают по длинам волн. Результаты расчёта толщин слоёв близки к паспортным данным. Применение усовершенствованной модели показателя преломления обеспечило большую сходимость расчетного графика к экспериментальному, ошибка вычислений параметров составила $\sim 13,6$ %.

Проведенные расчеты и экспериментальные исследования подтвердили возможность изготовления фотоприемных устройств нового поколения на основе униполярных nVn -гетероструктур с поглощающим слоем n -CdHgTe и барьерным широкозонным слоем, детектирующих излучение в спектральном диапазоне 3–5 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В. / Прикладная физика. 2020. № 1. С. 25–31.
2. Olivier Gravrand, Clément Lobre, Jean Louis Santailler, Nicolas Baier, Wilfried Rabaud, Alexandre Kerlain, Diane Sam-Giao, Pascal Leboterf, Benoit Cornus, Laurent Rubaldo / Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVIII. 2022. Vol. 12107. P. 121070U.
3. Antoni Rogalski, Piotr Martyniuk, Malgorzata Kopytko, Pawel Madejczyk, Sanjay Krishna / Sensors. 2020. Vol. 20. P. 7047.
4. Evirgen A., Abautret J., Perez J. P., et al. / Electron. Lett. 2014. Vol. 50. P. 1472–73.
5. Soibel A., Ting D. Z., Rafol S. B., et al. / Appl. Phys. Lett. 2019. Vol. 114. P. 161103.
6. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., et al. / IEEE Trans. Electron Dev. 2016. Vol. 63. № 12. P. 4811–4818.
7. Kopytko M., Wróbel J., Józwickowski K., et al. / J. Electron. Mater. 2015. Vol. 44. № 1. P. 158–166.
8. Martyniuk P., Kopytko M., Rogalski A. / Opto-Electron. Rev. 2014. Vol. 22. № 2. P. 127–146.
9. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., et al. / Mater. Res. Expr. 2019. Vol. 6. № 11. P. 116411.
10. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М. и др. / Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 5. С. 77–85.
11. Белогорохов А. И., Белогорохова Л. И., Денисов И. А., Смирнова Н. А., Кобелева С. П., Флоренцев А. А. / Материалы электронной техники. 2003. № 2. С. 43–49.
12. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. – М.: Высшая школа, 1987. С. 222–225.
13. Болтарь К. О., Федирко В. А. / Тезисы докладов V отраслевой конф. «Аналитические методы исследования материалов и изделий микроэлектроники». – М., ЦНИИ «Электроника», 1989. С. 169–170.
14. Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Каиуба А. С., Удалова А. Г. / Прикладная физика. 2008. № 1. С. 26–31.
15. Hansen G. L., Schmit J. L., Casselman T. N. / J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. P. 7099–7101.
16. Melnikov A. A. / Proceedings of SPIE. 2000. Vol. 325. P. 4340.
17. Никонов А. В., Болтарь К. О., Яковлева Н. И. / Прикладная физика. 2011. № 5. С. 100–106.
18. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ., под ред. Мотулевич Г. П. – М.: Наука, 1970. С. 77–96.
19. Boltar K. O., Yakovleva N. I. / Proceedings of SPIE. 2007. Vol. 6636. № 1. P. 663606-1–663606-7.
20. Lubzens D., Rosenfeld D., Nemirovsky Y. / Infrared Phys. 1988. Vol. 28. № 6. P. 417–423.
21. Laurenti J. P., Camassel J., Bouhemadou A., Toulouse B., Legros R., Lusson A. / J. Appl. Phys. 1990. Vol. 67 (10). P. 6454.
22. Finkman E., Nemirovsky Y. / J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50. № 6. P. 4356–4361.

23. Varavin V. S., Vasiliev V. V., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Ovsyuk V. N., Sidorov Yu. G., Suslyakov A. O., Yakushev M. V., Aseev A. L. / Optoelectronics Rewier. 2003. № 11 (2). P. 99–111.

24. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Г. Ю., Якушев М. В. / Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. Вып. 12. С. 34–37.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Investigation of optical properties of MWIR CdHgTe nBn heterostructures

*N. I. Iakovleva*¹, *K. O. Boltar*^{1,2}, *R. V. Davletshin*¹, *A. V. Voitsekhovskii*³,
S. A. Dvoretzky^{3,4}, *N. N. Mikhailov*^{3,4}, *V. V. Lopatin*⁵ and *S. E. Yakubson*⁶

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

³ National Research Tomsk State University
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

⁴ A. V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS
13 Lavrentieva Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

⁵ Foundation for Advanced Research
Bd. 3, 22 Berezhkovskaya nab., Moscow, 121059, Russia

⁶ Shvabe Holding
176 Prospekt Mira, Moscow, 129366, Russia

Received 31.10.2023; revised 20.11.2023; accepted 29.11.2023

This paper presents the results of measuring optical reflection and transmission spectra of MWIR CdHgTe nBn heterostructure with an absorbing n-layer, grown by molecular beam (MBE) epitaxy. The thicknesses and compositions of CdHgTe layers have been determined by the fitting parameter method using physical models of incident, reflected and absorbed radiation electric vectors in the multilayer structure. The expected boundary wavelength of the IR photodetector based on this nBn heterostructure have been predicted.

Keywords: infrared detectors, HgCdTe, molecular beam epitaxy, nBn structure, transmission spectra.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-28-35

REFERENCES

1. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu. and Yakushev M. V., Applied Physics, № 1, 25–31 (2020) [in Russian].
2. Olivier Gravrand, Clément Lobre, Jean Louis Santailier, Nicolas Baier, Wilfried Rabaud, Alexandre Kerlain, Diane Sam-Giao, Pascal Leboterf, Benoit Cornus and Laurent Rubaldo, Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVIII **12107**, 121070U (2022).

3. Antoni Rogalski, Piotr Martyniuk, Malgorzata Kopytko, Pawel Madejczyk and Sanjay Krishna, *Sensors*, № 20, 7047 (2020).
4. Evirgen A., Abautret J., Perez J. P., et al., *Electron. Lett.* **50**, 1472–73 (2014).
5. Soibel A., Ting D. Z., Rafol S. B., et al., *Appl. Phys. Lett.* **114**, 161103 (2019).
6. Akhavan N. D., Umana-Membreno G. A., Gu R., et al., *IEEE Trans. Electron Dev.* **63** (12), 4811–4818 (2016).
7. Kopytko M., Wróbel J., Józwickowski K., et al., *J. Electron. Mater.* **44** (1), 158–166 (2015).
8. Martyniuk P., Kopytko M. and Rogalski A., *Opto-Electron. Rev.* **22** (2), 127–146 (2014).
9. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., et al., *Mater. Res. Expr.* **6** (11), 116411 (2019).
10. Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., et al., *Izv. vuzov. Physics* **62** (5), 77–85 (2019).
11. Belogorokhov A. I., Belogorokhova L. I., Denisov I. A., Smirnova N. A., Kobeleva S. P. and Florentsev A. A., *Materials of electronic technique*, № 2, 43–49 (2003).
12. Pavlov L. P., *Measuring methods of semiconductor materials*, Moscow, Higher School, 1987, pp. 222–225.
13. Boltar K. O. and Fedirko V. A. *Abstracts of the V Industry Conference. Analytical research methods of materials and microelectronics products*. Moscow, Central Research Institute «Electronics», 1989, pp. 169–170.
14. Boltar K. O., Yakovleva N. I., Kashuba A. S. and Udalova A. G., *Applied Physics*, № 1, 26–31 (2008) [in Russian].
15. Hansen G. L., Schmit J. L. and Casselman T. N., *J. Appl. Phys.* **53**, 7099–7101 (1982).
16. Melnikov A. A., *Proceedings of SPIE* **325**, 4340 (2000).
17. Nikonov A. V., Boltar K. O. and Yakovleva N. I., *Applied Physics*, № 5, 100–106 (2011) [in Russian].
18. Born M. and Wolf E., *Fundamentals of optics*. Translated from English, ed. Motulevich G. P., Moscow, Nauka, 1970, pp. 77–96.
19. Boltar K. O. and Yakovleva N. I., *Proceedings of SPIE* **6636** (1), 663606-1–663606-7 (2007).
20. Lubzens D., Rosenfeld D. and Nemirovsky Y., *Infrared Phys.* **28** (6), 417–423 (1988).
21. Laurenti J. P., Camassel J., Bouhemadou A., Toulouse B., Legros R. and Lussion A., *J. Appl. Phys.* **67** (10), 6454 (1990).
22. Finkman E. and Nemirovsky Y., *J. Appl. Phys.* **50** (6), 4356–4361 (1979).
23. Varavin V. S., Vasiliev V. V., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Ovsyuk V. N., Sidorov Yu. G., Suslyakov A. O., Yakushev M. V. and Aseev A. L., *Optoelectronics Review*, № 11 (2), 99–111 (2003).
24. Voitsekhovskiy A. V., Nesmelov S. N., Dzyadukh S. M., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N., Sidorov G. Yu. and Yakushev M. V., *Letters in J. Physics and Technics of Semiconductors* **47** (12), 34–37 (2021).