

Оптический журнал

Физика полупроводников и элементы оптоэлектроники
Semiconductor physics and optoelectronics elements

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-02-23-33

УДК 551.501.816; 551.510.411

Оптические свойства и разупорядочение плёнок HgCdTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии

Максим Станиславович Ружевич¹, Карим Джагарович Мынбаев²,
Николай Леонидович Баженов³, Максим Владимирович Дорогов⁴,
Василий Семенович Варавин⁵, Николай Николаевич Михайлов⁶,
Иван Николаевич Ужаков⁷, Владимир Григорьевич Ремесник⁸,
Максим Витальевич Якушев⁹

^{1, 4}Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

^{2, 3}Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

^{5, 6, 7, 8, 9}Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

¹max.ruzhevich@nuitmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-4513-6345>

²mynkad@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-9853-8874>

³bazhnil.ivom@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-3019-2280>

⁴mvdorogov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0001-5987-3357>

⁵varavin@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0001-7722-6428>

⁶mikhailov@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>

⁷uzhakov@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0003-4982-2486>

⁸remesnik@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0003-7495-929X>

⁹yakushev@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>

Аннотация

Предмет исследования. Эпитаксиальные плёнки твёрдых растворов $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с мольной долей $CdTe$ x от 0,3 до 0,7, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии и предназначенные для изготовления фотоприёмных и лазерных структур инфракрасного диапазона.

Цель работы. Определение связи оптических и микроскопических свойств твёрдых растворов $Hg_{1-x}Cd_xTe$ при наличии флуктуаций состава твёрдого раствора. **Метод.** Оптическое пропускание, фотолюминесценция, сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией. **Основные результаты.** Путём сопоставления результатов оптических, структурных и микроскопических исследований показано, что для плёнок с $x \approx 0,3$ данные исследований оптических свойств позволяют адекватно оценить ширину запрещённой зоны и определить химический состав материала. Показано высокое совершенство данного материала и подтверждено, что его разупорядочение обусловлено лишь спецификой формирования полупроводниковых твёрдых растворов. Для плёнок с $x \approx 0,7$ установлено, что данные о ширине запрещённой зоны и составе могут быть получены лишь из эллипсометрических исследований и измерений оптического пропускания, в то время как спектры фотолюминесценции при температурах вплоть до комнатной формируются оптическими переходами с участием носителей, локализованных на масштабных флуктуациях состава. В плёнках с $x \approx 0,7$ также обнаружено присутствие неконтролируемым акцепторных состояний, что может быть свидетельством необходимости оптимизации технологии данного материала.

Практическая значимость. Выявлены границы применимости фотолюминесцентных исследований для характеризации свойств твёрдых

растворов $Hg_{1-x}Cd_xTe$. Показана необходимость дальнейшей оптимизации технологии данных материалов больших ($x \approx 0,7$) составов.

Ключевые слова: $HgCdTe$, люминесценция, твёрдые растворы, флуктуации состава

Благодарность: работа, выполненная в ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, проводилась при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ от № 075-15-2020-797(13.1902.21.0024).

Ссылка для цитирования: Ружевич М.С., Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л., Дорогов М.В., Варавин В.С., Михайлов Н.Н., Ужаков И.Н., Ремесник В.Г., Якушев М.В. Оптические свойства и разупорядочение плёнок $HgCdTe$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 23–33. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-23-33>

Коды OCIS: 120.7000, 250.5230, 260.3060.

Optical properties and disorder of $HgCdTe$ films grown by molecular beam epitaxy

**MAXIM S. Ruzhevich¹, KARIM D. Mynbaev², NIKOLAY L. BAZHENOV³,
MAXIM V. DOROGOV⁴, VASILIY S. VARAVIN⁵, NIKOLAY N. MIKHAILOV⁶,
IVAN N. UZHAKOV⁷, VLADIMIR G. REMESNIK⁸, MAXIM V. YAKUSHEV⁹**

^{1, 4}ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

^{2, 3}Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia

^{5, 6, 7, 8, 9}Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

¹max.ruzhevich@niuitmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-4513-6345>

²mynkad@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-9853-8874>

³bazhnil.ivom@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-3019-2280>

⁴mvdorogov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0001-5987-3357>

⁵varavin@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0001-7722-6428>

⁶mikhailov@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>

⁷uzhakov@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0003-4982-2486>

⁸remesnik@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0003-7495-929X>

⁹yakushev@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>

Abstract

The subject of study is epitaxial films of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ solid solutions with a mole fraction of $CdTe$ x varying from 0.3 to 0.7 grown by molecular beam epitaxy and intended for the manufacture of photodetecting and laser structures operating in the infrared range. The **aim of study** is determination of the relationship between the optical and microscopic properties of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ solid solutions at the presence of fluctuations in the composition of the solid solution. The **methods** are optical transmission, photoluminescence, scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy. **Main results.** By comparing the results of optical, structural and microscopic studies, it is shown that for the films with $x \approx 0.3$ the optical properties research data make it possible to adequately estimate the band gap and determine the chemical composition of the material. The high perfection of this material is shown, and it is confirmed that its disorder is caused only by the specifics of the formation of semiconductor solid solutions. For the films with $x \approx 0.7$ it has been established that data on the band gap and composition can only be obtained from ellipsometric studies and measurements of optical transmission, while photoluminescence spectra at temperatures up to room temperature are formed by optical transitions involving carriers localized on large-scale composition fluctuations. In the films with $x \approx 0.7$ the presence of uncontrolled acceptor states was also detected, which may indicate the need to optimize the technology of this material. **Practical significance.** The limits of applicability of photoluminescence studies for characterizing the properties of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ solid solutions have been identified. The need for further optimization of the technology of the materials with large ($x \approx 0.7$) compositions is shown.

Keywords: $HgCdTe$, luminescence, solid solutions, composition fluctuations

Acknowledgment: work performed at Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS was carried out with the financial support of a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).

For citation: Ruzhevich M.S., Mynbaev K.D., Bazhenov N.L., Dorogov M.V., Varavin V.S., Mikhailov N.N., Uzhakov I.N., Remesnik V.G., Yakushev M.V. Optical properties and disorder of HgCdTe films grown by molecular beam epitaxy [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 2. P. 23–33. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-23-33>

OCIS codes: 120.7000, 250.5230, 260.3060.

ВВЕДЕНИЕ

Твёрдые растворы (ТР) $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (кадмий–рутуть–теллур, КРТ) занимают лидирующее место среди материалов для изготовления приборов и устройств фотоэлектроники, работающих в инфракрасном и терагерцовом спектральных диапазонах [1–3]. В силу существенной доли ионных химических связей для КРТ характерно значительное разупорядочение ТР и, в частности, наличие масштабных флюктуаций состава, которое проявляется в оптических свойствах при исследовании оптического поглощения (ОП) (см., например, [4, 5]), фотопроводимости, и, особенно, фотолюминесценции (ФЛ) [6–8]. Подход к исследованию «качества» КРТ оптическими методами часто заключается лишь в исследовании уширения линий «краевой» ФЛ [9, 10] относительно материала известного структурного совершенства или расчётных значений. Прямое экспериментальное сопоставление оптических, структурных и микроскопических свойств КРТ для наиболее полной характеристизации материала до недавнего времени проводилось редко [6, 11], но сейчас используется всё активнее [12, 13].

В настоящей работе мы сообщаем о результатах систематических исследований оптических свойств для оценки их взаимосвязи с микроскопическими свойствами плёнок КРТ, выращенных с использованием наиболее актуальной технологии, метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Для таких плёнок результаты оптических исследований указывают на большой масштаб флюктуаций состава [11]. В то же время структурные и микроскопические свойства такого материала пока что исследованы недостаточно, и сам химический состав плёнок x (мольная доля CdTe) часто определяется только по данным оптических измерений [14, 15]. Поэтому целью работы было определение связи оптических и ми-

кроскопических свойств твёрдых растворов $Hg_{1-x}Cd_xTe$ при наличии флюктуаций состава твёрдого раствора. Исследования были проведены для плёнок составов от $x \approx 0,30$ до $x \approx 0,70$ (состав определялся по данным *in situ* эллипсометрии и *ex situ* ОП) с акцентом на крайние значения x в этом ряду. Материал КРТ с $x \approx 0,30$ актуален для изготовления фотоприёмников, работающих в диапазоне длин волн 3–5 мкм [1, 2]. Более широкозонный материал КРТ востребован при создании барьерных и волноводных слоёв в лазерных структурах, где обычно используется ТР с $x \approx 0,55$ –0,75 [3, 16]. Можно отметить, что с точки зрения масштаба стохастических флюктуаций состава ТР значения $x \approx 0,30$ и $x \approx 0,70$ отстоят по x на равное расстояние от точки $x \approx 0,50$, где должен наблюдаться максимум флюктуаций, и при прочих равных условиях эти масштабы должны быть, в теории, близки. При этом ранее исследованию оптических свойств КРТ данных составов внимания уделялось мало.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемые плёнки были выращены в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (Новосибирск, Россия) на подложках GaAs и Si с буферными слоями ZnTe и CdTe с контролем параметров роста по данным эллипсометрии [14, 15]. Общая толщина плёнок, в которой слой постоянного состава был заключён между более широкозонными «обкладками» толщиной до 400 нм, составляла от 5 до 9 мкм. Спектральные характеристики ОП исследовались с использованием инфракрасного Фурье-спектрометра InfraLum-801. Сигнал ФЛ возбуждался полупроводниковым лазером на основе InGaAs с длиной волны 1,03 мкм и регистрировался охлаждаемыми фотоприёмниками на основе InSb или HgCdTe (для $x \leq 0,50$) и Ge (для $x \geq 0,60$). Спектральные

характеристики ФЛ изучались с использованием решёточного монохроматора МДР-23 в диапазоне температур $T = 4,2\text{--}300$ К. Микроскопические исследования были проведены при комнатной температуре на электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 с приставкой Ultim®Max 100 производства компании Oxford Instruments для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены спектральные характеристики ОП для ряда плёнок составов $x \approx 0,3$ (рис. 1а) и $x \approx 0,7$ (рис. 1б). Для всех плёнок с $x \approx 0,3$ (рис. 1а) был характерен относительно резкий край ОП, ожидаемо смещавшийся с изменением x . При этом длинноволновый край ОП исследованных плёнок (кривые 1, 2 и 3) оказался менее резким, чем таковой для образца объёмного кристалла, выращенного методом вертикально-направленной кристаллизации с подпиткой из твёрдой фазы; данный образец был исследован для сравнения (кривая 4). Это подтверждает значительную степень неупорядоченности ТР КРТ, синтезированных методом МЛЭ [17, 18]. То же относится и к спектральным характеристикам ОП образцов большего состава (рис. 1б). Спектральные

характеристики ОП плёнки с $x = 0,72$ (кривая 1) оказались подобными таковым для многослойной структуры [19], что указывало на неоднородность плёнки по составу; для плёнки с $x = 0,71$, легированной индием до концентрации 10^{18} см^{-3} , в области малых волновых чисел было существенно поглощение на свободных носителях (кривая 2). Для широкозонных плёнок край ОП также смещался с изменением x (кривые 3, 4 и 5 для плёнок с $x = 0,70, 0,60$ и $0,50$ соответственно) и был менее резким, чем таковой для образца объёмного кристалла (кривая 6). Для всех плёнок КРТ в области малых энергий спектральные характеристики ОП содержали полосы интерференции, свидетельствовавшие о хорошей планарности исследованных эпитаксиальных структур. Полученные результаты подтверждают, что метод ОП чувствителен к различным формам разупорядочения в КРТ.

Низкотемпературные ($T = 4,2$ К) спектральные характеристики ФЛ всех исследованных образцов с $x \approx 0,3$ содержали одну полосу с полушириною (шириною линии на половине её высоты) от 6 до 9 мэВ. При $T = 300$ К полуширины спектров ФЛ составляли от 40 до 55 мэВ. Спектр ФЛ образца объёмного кристалла с $x = 0,30$ при $T = 4,2$ К также содержал одну полосу с полушириной 6 мэВ;

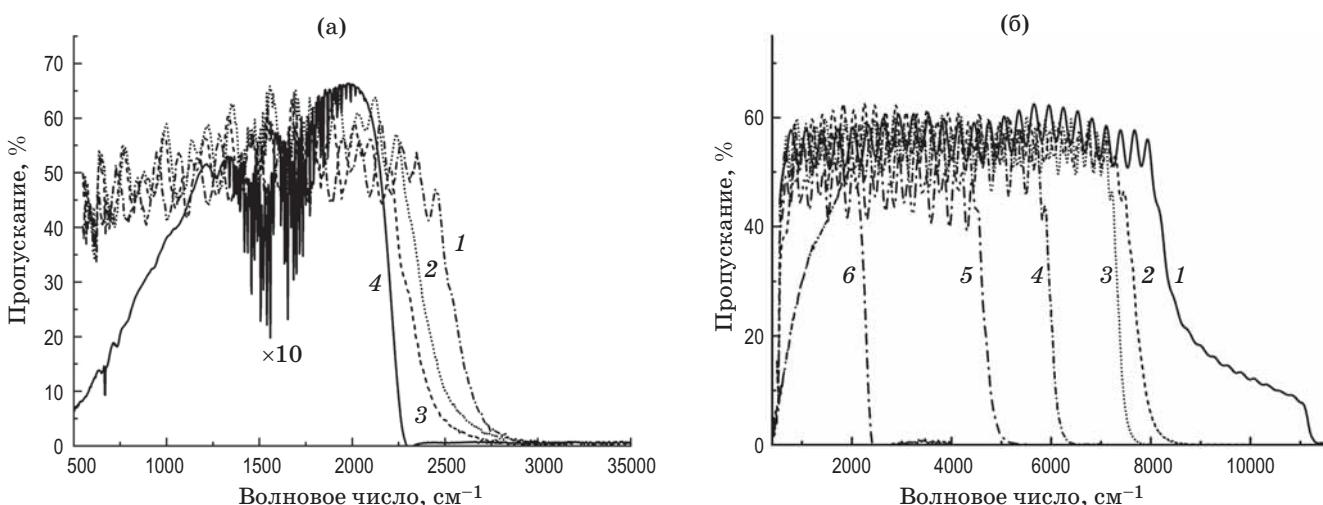


Рис. 1. Спектральные характеристики оптического пропускания при $T = 300$ К плёнок составов КРТ: $x = 0,31$ (кривая 1), $x = 0,30$ (2) и $x = 0,29$ (3) и образца объёмного кристалла с $x = 0,31$ (4) (а), а также плёнок с $x = 0,72$ (кривая 1), $x = 0,71$ (2), $x = 0,70$ (3), $x = 0,60$ (4) и $x = 0,50$ (5) и образца объёмного кристалла с $x = 0,45$ (6) (б)

Fig. 1. Optical transmission spectra at $T = 300$ K of MCT films with composition: $x = 0,31$ (curve 1), $x = 0,30$ (2) and $x = 0,29$ (3) and of a bulk crystal sample with $x = 0,31$ (4) (a), and of films with $x = 0,72$ (curve 1), $x = 0,71$ (2), $x = 0,70$ (3), $x = 0,60$ (4) and $x = 0,50$ (5) and a bulk crystal sample with $x = 0,45$ (6) (б)

при $T = 300$ К полуширина полосы составила 49 мэВ. Аналогичные полуширины полос ФЛ наблюдались для плёнок с $x \approx 0,3$, выращенных методом жидкокристаллической эпитаксии (ЖКЭ), и для ряда плёнок, выращенных методом МЛЭ и изученных ранее [8, 11]. Важно отметить, что в спектрах ФЛ исследованных нелегированных плёнок с $x \approx 0,3$, выращенных на подложках из Si, не содержалось полос, связанных с акцепторными состояниями, типичных для ТР с $x > 0,35$, полученных по данной технологии [8]. В отличие от спектральных характеристик образцов с $x \approx 0,3$, спектры ФЛ некоторых плёнок с $x \approx 0,7$ при $T = 4,2$ К имели выраженную асимметричную форму и хорошо аппроксимировались двумя гауссиями с расстоянием между ними 12–18 мэВ. Полуширины высокоэнергетических полос ФЛ плёнок с $x \approx 0,7$ составляли от 15 до 19 мэВ, низкоэнергетических, — в случаях, когда они наблюдались, — от 30 до 45 мэВ. Последние прослеживались до температуры 50–60 К; их поведение в целом соответствовало переходам на акцепторные состояния в запрещённой зоне. При $T = 300$ К спектры ФЛ образцов с $x \approx 0,7$ представляли собой одиночные полосы с полушириной от 60 до 70 мэВ. Отметим, что полуширины высокоэнергетических полос ФЛ при $T = 4,2$ К в исследованных плёнках с $x \approx 0,7$ оказались на 50% больше, чем в плёнках близких составов, выращенных методом ЖКЭ (9–13 мэВ [11]), что соответствует представлениям о более высоком структурном совершенстве материала, выращенного ЖКЭ, как более равновесным относительно МЛЭ методом.

На рис. 2 приведены примеры спектральных характеристик ФЛ ряда плёнок при $T = 85$ К. Спектры ФЛ всех исследованных образцов при этой температуре состояли из одной полосы. Полуширины полос ФЛ плёнок с $x \approx 0,3$ (не показаны) составляли от 14 до 19 мэВ, полуширина полос ФЛ образца объёмного кристалла с таким же x составила 16 мэВ. Полуширины полос ФЛ плёнок составов $x = 0,50$, $x = 0,60$ и $x = 0,70$, выращенных в одной серии экспериментов, составили 19, 28 и 40 мэВ соответственно (спектры 1, 2 и 3 соответственно). Полуширины полос ФЛ всех исследованных плёнок с $x \approx 0,7$ при $T = 85$ К составляли от 35 до 45 мэВ.

Одним из эффективных методов воздействия на дефектную структуру полупроводни-

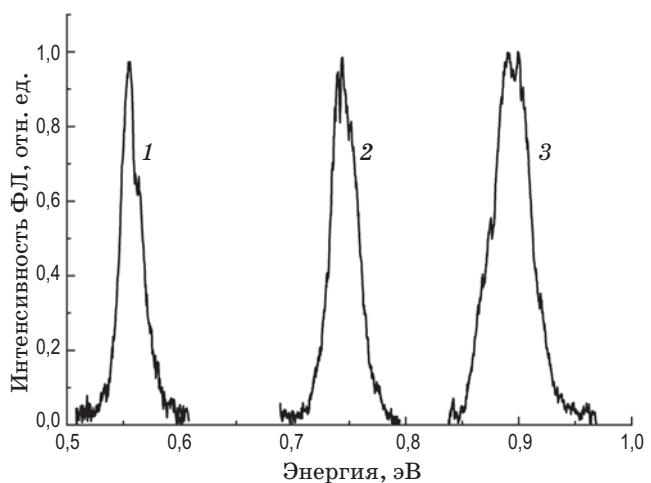


Рис. 2. Спектральные характеристики фотолюминесценции плёнок КРТ с $x = 0,50$ (1), $x = 0,60$ (2) и $x = 0,70$ (3), записанные при $T = 85$ К

Fig. 2. Normalized photoluminescence spectra of MCT films with $x = 0.50$ (1), $x = 0.60$ (2) and $x = 0.70$ (3), recorded at $T = 85$ K

ковых материалов, и, в частности, КРТ, является термический отжиг [8, 11]. По изменению свойств материала после отжига можно судить о стабильности кристаллической структуры и о наличии и поведении дефектов. Как правило, в результате отжига эпитаксиальных плёнок КРТ наблюдается небольшой сдвиг полос ФЛ в сторону высоких энергий, а также уменьшение полуширина полос [10, 11]. Сдвиг частично может быть объяснён некоторым усреднением химического состава в многослойной структуре, где помимо «рабочего» слоя с постоянным составом имеются более широкозонные слои, иногда с градиентом состава (для плёнок, выращенных методом МЛЭ, это подтверждается спектральными характеристиками ОП, исследованными при послойном стравливании материала на неотожжённых и отожжённых образцах). Уменьшение полуширины полос, в свою очередь, связывают с улучшением кристаллической структуры ТР. Рассматриваемая тенденция была характерна и для рассматриваемых плёнок. Так, при исследовании спектральных характеристик ФЛ при $T = 85$ К было установлено, что для плёнки с $x = 0,50$ сдвиг полосы ФЛ после отжига в атмосфере гелия при малом давлении паров ртути при $T \approx 350$ °С составил 10 мэВ, для образца с $x = 0,60$ — 7 мэВ, для образца с $x = 0,70$ — 45 мэВ. Полуширины полос ФЛ

для плёнок с $x = 0,50$, $x = 0,60$ и $x = 0,70$ после отжига уменьшились на 4, 10 и 18 мэВ соответственно. Для плёнок с $x = 0,29$ сдвиг при 85 К составил около 20 мэВ, а полуширины высокоэнергетической полосы ФЛ уменьшились с 10–12 до 8–9 мэВ. Последствия отжига отразились и на положении края ОП. Так, например, для рассматриваемых плёнок с $x = 0,29$ сдвиг этого края (взятого по уровню 50% интенсивности ОП) при 300 К составил 9–14 мэВ.

На рис. 3 приведены температурные зависимости положения пиков высокоэнергетических полос ФЛ для плёнок с $x \approx 0,3$ (рис. 3а) и $x \approx 0,7$ (рис. 3б). Общей особенностью здесь является существенное отличие энергий пиков E_{PL} от рассчитанных согласно работе [20] температурных зависимостей ширины запрещённой зоны $E_g(T)$. При $T < 100$ К $E_{PL} \ll E_g$. Это объясняется тем, что оптические переходы в КРТ при низких температурах определяются рекомбинацией экситонов, локализованных на флуктуациях состава [6–8]. Для плёнок с $x \approx 0,3$ разница между E_{PL} (символы 1, 2, и 3) и E_g (кривые 5 (x = 0,30) и 6 (x = 0,31)) при $T = 4,2$ К составила около 15–30 мэВ. Наклоны зависимостей $E_{PL}(T)$ в диапазоне x 0,29–0,32 были близки и не отличались от такого для образца объёмного кристалла (символы 4) и ранее изученных плёнок подобных

составов, выращенных по данной технологии МЛЭ [11]. При температурах, близких к комнатной, величина E_{PL} несколько превышала E_g , что могло объясняться высоким уровнем возбуждения ФЛ.

На рис. 3б для плёнок с $x \approx 0,7$ видно существенное отличие форм зависимостей $E_{PL}(T)$, полученных в эксперименте (символы 1, 2 и 3), и расчётных кривых $E_g(T)$ для соответствующих составов (схематично показано стрелками). Даже при комнатной температуре разница в энергиях между E_{PL} и E_g составляла около 50 мэВ, при $T = 4,2$ К она достигала 80 мэВ. При этом с увеличением состава от 0,71 до 0,73 энергия E_{PL} , по крайней мере, при $T > 100$ К, увеличивается, отражая увеличение E_g . Наклон кривой $E_{PL}(T)$ начинает приближаться к таковому для $E_g(T)$. При $T \approx 50$ –60 К на кривых $E_{PL}(T)$ наблюдается локальный минимум, отражающий условия максимально эффективной локализации экситонов. Переход от «красного» к «синему» сдвигу пика ФЛ с дальнейшим выходом на наклон $E_g(T)$ по мере увеличения температуры ранее наблюдался как в плёнках с $x \approx 0,7$, выращенных методом ЖФЭ [6], так и в объёмных кристаллах КРТ близких составов [7]. В случаях [6, 7], однако, минимум на кривой $E_{PL}(T)$ соответствовал $T \approx 25$ К. Аналогичная температура, соответствующая минимуму

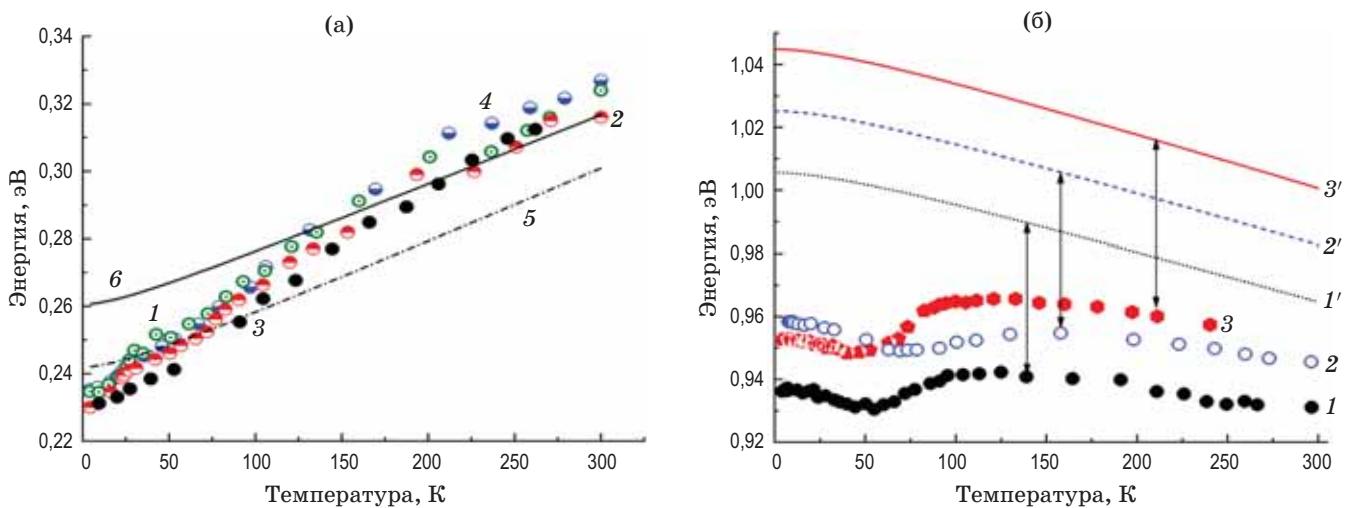


Рис. 3. Температурные зависимости энергии максимумов полос фотолюминесценции (символы) и расчётные (согласно [20]) зависимости ширины запрещённой зоны (кривые) для образцов составов КРТ: $x = 0,30$ (1, 3 и 5) и $x = 0,31$ (2, 4 и 6) (а), а также $x = 0,70$ (1 и 1'), $x = 0,71$ (2 и 2') и $x = 0,72$ (3 и 3') (б)

Fig. 3. Temperature dependences of the energy of PL peaks (symbols) and calculated (according to [20]) dependences of the bandgap (lines) for MCT samples with compositions: $x = 0.30$ (1, 3 and 5) and $x = 0.31$ (2, 4 and 6) (a), and $x = 0.70$ (1 and 1'), $x = 0.71$ (2 and 2') and $x = 0.72$ (3 and 3') (б)

на кривой $E_{PL}(T)$, наблюдалась и для выращенных методом МЛЭ плёнок других составов [8].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

О результатах структурных исследований образцов КРТ, выращенных различными методами, включая рассматриваемую технологию МЛЭ, сообщалось ранее [11]. Исследования проводились путём измерения спектров рентгеновской дифракции при комнатной температуре. Выраженные пики дифракции присутствовали в этих спектрах для всех исследованных образцов, за исключением образцов с «аномальными» оптическими свойствами. Эти аномалии проявлялись в размытом крае ОП, большой полуширине полосы «краевой» ФЛ и большом сдвиге края ОП и полос ФЛ после отжига [11]. Для всех остальных исследованных плёнок, выращенных методом МЛЭ, была характерна кристаллическая структура.

При характеризации КРТ возникает вопрос о связи данных о E_g (и рассчитываемых из неё значений x), полученных оптическими методами, и данных по непосредственному определению химического состава, например, методами рентгеноспектрального микроанализа [6]. Плёнки с $x \approx 0,3$ и $x \approx 0,7$ были исследованы нами методом ЭДРС. Во всех записанных спектрах ЭДРС (анализ проводился по 3 группам из 5 точек каждой на поверхности каждого образца) присутствовали следы посторонних химических элементов (при этом следов лигатуры, например, мышьяка или индия в плёнках, легированных этими примесями, ожидаемо, — с учётом чувствительности метода, — обнаружено не было). В частности, на поверхности всех плёнок с $x \approx 0,3$ и некоторых плёнок с $x \approx 0,7$ были обнаружены следы брома, используемого в процессах химического травления КРТ. Следов мышьяка или галлия, ранее найденных методом масс-спектроскопии вторичных ионов в некоторых образцах с $x \approx 0,2$ – $0,3$, выращенных МЛЭ на подложках как GaAs, так и Si [21], в исследуемых в настоящей работе плёнках с $x \approx 0,3$ выявлено не было. Однако подобные следы были обнаружены во всех исследованных плёнках с $x \approx 0,7$. Поскольку эти плёнки были выращены на подложке GaAs, присутствие данных элементов можно было считать естественным.

С учётом небольшого (менее 0,3 вес. %) содержания посторонних химических элементов в исследованном материале для грубой оценки их химического состава была произведена перенормировка суммы основных элементов (Cd, Hg и Te) на 100% после вычёта процентной весовой доли нежелательных примесей. В результате для плёнок с составом по данным ОП и эллипсометрии $x = 0,29$ методом ЭДРС состав был определён как $x = 0,32$, а для плёнок с составом по данным ОП и эллипсометрии $x = 0,73$, $x = 0,71$, $x = 0,71$ и $x = 0,72$ методом ЭДРС состав был определён как $x = 0,75$, $x = 0,72$, $x = 0,71$ и $x = 0,73$ соответственно. Таким образом, определяемое методом ЭДРС значение x оказалось больше значения, которое было установлено по данным ОП и эллипсометрии. Очевидно, что данное обстоятельство было следствием перенормировки. Тем не менее, в целом результаты ЭДРС подтвердили данные, полученные по результатам измерений эллипсометрии и исследований спектральных характеристик ОП, и состав плёнок можно было считать установленным надёжно. Сопоставление данных по составу с результатами исследования спектральных характеристик ФЛ показывает, таким образом, что для плёнок с $x \approx 0,3$ данные ФЛ, полученные при высокой температуре (около 300 К), вполне адекватно отражают ширину запрещённой зоны и определяемый из неё химический состав материала. Малые полуширины полос низкотемпературной ФЛ, относительно небольшой сдвиг (с учётом большой разницы составов самих плёнок и широкозонных «обкладок») полос ФЛ и слабое уменьшение их полуширин после термического отжига указывают на высокое совершенство материала. Всё это подтверждает факт хорошо отработанной технологии МЛЭ КРТ малых составов, где разупорядочение обусловлено лишь спецификой формирования полупроводниковых твёрдых растворов КРТ. При переходе к большим составам картина, однако, меняется. При увеличении состава от $x = 0,50$ до $x = 0,70$ наблюдается уширение полос низкотемпературной ФЛ, а также увеличение энергетического сдвига полос ФЛ и ослабление уменьшения полуширин в результате отжига. Для плёнок с $x \approx 0,7$ значения энергии максимумов полос ФЛ не соответствуют данным о составе, получаемым по результатам эллипсометрии,

ОП и ЭРДС, при любых температурах вплоть до 300 К. При этом масштаб разупорядочения при увеличении состава от $x = 0,50$ (ожидаемый максимум стохастических флюктуаций) до $x = 0,70$ по данным ФЛ не снижается, а увеличивается. Увеличение температуры (с 25 до 50 К) начала делокализации экситонов в плёнках с $x \approx 0,7$, исследованных в настоящей работе, по сравнению с ранее изученным материалом, также может являться признаком более масштабных флюктуаций состава. Полученный результат, с одной стороны, в определённой степени типичен для ТР КРТ больших составов [6, 7], а с другой, может быть свидетельством необходимости оптимизации технологии МЛЭ для КРТ с большим x .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление данных исследований спектральных характеристик ОП и ФЛ с результатами структурных и микроскопических исследований показало, что по степени разупорядочения твёрдого раствора плёнки с $x \approx 0,3$ идентичны материалу, синтезиро-

ванному жидкофазной эпитаксией и методом объёмного роста кристаллов. При низких температурах разница между положением максимума полосы ФЛ и номинальной шириной запрещённой зоны для этих плёнок достигала приблизительно 30 мэВ. Для плёнок с $x \approx 0,70$ по данным ФЛ оказалось характерным наличие существенных флюктуаций состава и присутствие акцепторных состояний в запрещённой зоне. Таким образом, установлено, что по степени разупорядочения плёнки с $x \approx 0,3$, выращенные методом МЛЭ, не уступают по качеству материалу, синтезированному другими методами, и это качество может быть оценено с помощью всех рассмотренных оптических методов, включая ФЛ. Для плёнок с $x \approx 0,7$ результаты исследования спектральных характеристик ФЛ оказались непригодны для оценки x , что указывало на наличие существенных флюктуаций состава. Также для этих плёнок было выявлено присутствие неконтролируемых акцепторных состояний, что может быть свидетельством необходимости оптимизации технологии данного материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kopytko M., Rogalski A. New insights into the ultimate performance of HgCdTe photodiodes // *Sensor. Actuat. A-Phys.* 2022. V. 339. P. 113511. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113511>
2. Bhan R.K., Dhar V. Recent infrared detector technologies, applications, trends and development of HgCdTe based cooled infrared focal plane arrays and their characterization // *Opto-Electronics Rev.* 2019. V. 27. P. 174–193. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.04.004>
3. Ruffenach S., Kadykov A., Rumyantsev V.V., Torres J., Coquillat D., But D., Krishtopenko S.S., Consejo C., Knap W., Winnerl S., Helm M., Fadeev M.A., Mikhailov N.N., Dvoretskii S.A., Gavrilenko V.I., Morozov S.V., Teppe F. HgCdTe-based heterostructures for terahertz photonics // *APL Mater.* 2017. V. 5. № 3. P. 035503. <https://doi.org/10.1063/1.4977781>
4. Mokdad N., Mami F.Z., Boukli-Hacène N., Zitouni K., Kadri A. Theoretical study of Urbach tail behavior in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ in the $0.21 \leq x \leq 0.6$ medium and far infrared optical ranges // *J. Appl. Phys.* 2022. V. 132. № 17. P. 175702. <https://doi.org/10.1063/5.0101924>
5. Rumyantsev V.V., Razova A.A., Fadeev M.A., Utochkin V.V., Mikhailov N.N., Dvoretsky S.A., Gavrilenko V.I., Morozov S.V. Urbach tail and non-uniformity probe of HgCdTe thin films and quantum well heterostructures grown by molecular beam epitaxy // *Opt. Eng.* 2020. V. 60. № 8. P. 082007. <https://doi.org/10.1117/1.OE.60.8.082007>
6. Gille P., Herrmann K.H., Puhlmann N., Schenk M., Tomm J.W., Werner L. Eg versus x relation from photoluminescence and electron microprobe investiga-

REFERENCES

1. Kopytko M., Rogalski A. New insights into the ultimate performance of HgCdTe photodiodes // *Sensor. Actuat. A-Phys.* 2022. V. 339. P. 113511. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113511>
2. Bhan R.K., Dhar V. Recent infrared detector technologies, applications, trends and development of HgCdTe based cooled infrared focal plane arrays and their characterization // *Opto-Electronics Rev.* 2019. V. 27. P. 174–193. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.04.004>
3. Ruffenach S., Kadykov A., Rumyantsev V.V., Torres J., Coquillat D., But D., Krishtopenko S.S., Consejo C., Knap W., Winnerl S., Helm M., Fadeev M.A., Mikhailov N.N., Dvoretskii S.A., Gavrilenko V.I., Morozov S.V., Teppe F. HgCdTe-based heterostructures for terahertz photonics // *APL Mater.* 2017. V. 5. № 3. P. 035503. <https://doi.org/10.1063/1.4977781>
4. Mokdad N., Mami F.Z., Boukli-Hacène N., Zitouni K., Kadri A. Theoretical study of Urbach tail behavior in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ in the $0.21 \leq x \leq 0.6$ medium and far infrared optical ranges // *J. Appl. Phys.* 2022. V. 132. № 17. P. 175702. <https://doi.org/10.1063/5.0101924>
5. Rumyantsev V.V., Razova A.A., Fadeev M.A., Utochkin V.V., Mikhailov N.N., Dvoretsky S.A., Gavrilenko V.I., Morozov S.V. Urbach tail and non-uniformity probe of HgCdTe thin films and quantum well heterostructures grown by molecular beam epitaxy // *Opt. Eng.* 2020. V. 60. № 8. P. 082007. <https://doi.org/10.1117/1.OE.60.8.082007>
6. Gille P., Herrmann K.H., Puhlmann N., Schenk M., Tomm J.W., Werner L. Eg versus x relation from photoluminescence and electron microprobe investiga-

- tions in *p*-type $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($0.35 \leq x \leq 0.7$) // *J. Cryst. Growth.* 1988. V. 86. № 1–4. P. 593–598. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(90\)90781-F](https://doi.org/10.1016/0022-0248(90)90781-F)
7. Lusson A., Fuchs F., Marfaing Y. Systematic photoluminescence study of $Cd_xHg_{1-x}Te$ alloys in wide composition range // *J. Cryst. Growth.* 1990. V. 101. № 1–4. P. 673–677. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(90\)91056-V](https://doi.org/10.1016/0022-0248(90)91056-V)
8. Mynbaev K.D., Bazhenov N.L., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Varavin V.S., Marin D.V., Yakushev M.V. Photoluminescence of molecular beam epitaxy-grown mercury cadmium telluride: Comparison of $HgCdTe$ / $GaAs$ and $HgCdTe$ / Si technologies // *J. Electron. Mater.* 2018. V. 47. № 8. P. 4731–4736. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6364-9>
9. Shao J., Chen L., Lu W., Lü X., Zhu L., Guo S., He L., Chu J. Backside-illuminated infrared photoluminescence and photoreflectance: Probe of vertical nonuniformity of $HgCdTe$ on $GaAs$ // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. № 12. P. 121915. <https://doi.org/10.1063/1.3373595>
10. Kurtz S.R., Bajaj J., Edwall D.D., Irvine S.J.C. Infrared photoluminescence characterization of long-wavelength $HgCdTe$ detector materials // *Semicond. Sci. Technol.* 1993. V. 8. № 6. P. 941–945. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/8/6s/015>
11. Ruzhevich M.S., Mynbaev K.D. Photoluminescence in Mercury Cadmium Telluride — a historical retrospective. Part II: 2004–2022 // *Reviews on Advanced Materials and Technologies.* 2022. V. 4. № 4. P. 17–38. <https://doi.org/10.17586/2687-0568-2022-4-4-17-38>
12. Chen J., Li L., Lin Y., Liu L., Cui X. Influence of annealing on the surface structure evolution of intrinsic *p*-type $HgCdTe$ films // *Surfaces and Interfaces.* 2023. V. 42. Part B. P. 103451. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103451>
13. Qiu X.-F., Zhang S.-X., Zhang J., Wu Y., Chen P.-P. Microstructure and optical characterization of mid-wave $HgCdTe$ grown by MBE under different conditions // *Crystals.* 2021. V. 11. № 3. P. 296. <https://doi.org/10.3390/cryst11030296>
14. Швец В.А., Марин Д.В., Ремесник В.Г., Азаров И.А., Якушев М.В., Рыхлицкий С.В. Параметрическая модель спектров оптических постоянных $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и определение состава соединения // *Оптика и спектроскопия.* 2019. Т. 128. Вып. 12. С. 1815–1820. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.12.50315.349-20>
15. Швец В.А., Марин Д.В., Якушев М.В., Рыхлицкий С.В. Исследование температурной зависимости спектров оптических постоянных пленок $Hg_{1-x}Cd_xTe$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // *Оптика и спектроскопия.* 2021. Т. 129. Вып. 1. С. 33–40. <https://doi.org/10.21883/OS.2021.01.50436.213-20>
16. Разова А.А., Уточкин В.В., Фадеев М.А., Румянцев В.В., Дубинов А.А., Кудрявцев К.Е., Шенгурев Д.В., Морозова Е.Е., Скороходов Е.В., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Гавриленко В.И., Морозов С.В. Лазерная генерация в гетероструктуре с квантовыми ямами $Cd_xHg_{1-x}Te/Cd_yHg_{1-y}Te$ с микродисковыми резонаторами в диапазоне длин волн 4,1–5,1 μ м // *Журнал прикладной спектроскопии.* 2022. Т. 89. № 5. С. 632–637. <https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-5-632-637>
17. Chang Y. Absorption of narrow-gap $HgCdTe$ near the band edge including nonparabolicity and the Urbach tail // *J. Electron. Mater.* 2007. V. 36. № 8. P. 1000–1006. <https://doi.org/10.1007/s11664-007-0162-0>
- tions in *p*-type $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($0.35 \leq x \leq 0.7$) // *J. Cryst. Growth.* 1988. V. 86. № 1–4. P. 593–598. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(90\)90781-F](https://doi.org/10.1016/0022-0248(90)90781-F)
7. Lusson A., Fuchs F., Marfaing Y. Systematic photoluminescence study of $Cd_xHg_{1-x}Te$ alloys in wide composition range // *J. Cryst. Growth.* 1990. V. 101. № 1–4. P. 673–677. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(90\)91056-V](https://doi.org/10.1016/0022-0248(90)91056-V)
8. Mynbaev K.D., Bazhenov N.L., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Varavin V.S., Marin D.V., Yakushev M.V. Photoluminescence of molecular beam epitaxy-grown mercury cadmium telluride: Comparison of $HgCdTe$ / $GaAs$ and $HgCdTe$ / Si technologies // *J. Electron. Mater.* 2018. V. 47. № 8. P. 4731–4736. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6364-9>
9. Shao J., Chen L., Lu W., Lü X., Zhu L., Guo S., He L., Chu J. Backside-illuminated infrared photoluminescence and photoreflectance: Probe of vertical nonuniformity of $HgCdTe$ on $GaAs$ // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. № 12. P. 121915. <https://doi.org/10.1063/1.3373595>
10. Kurtz S.R., Bajaj J., Edwall D.D., Irvine S.J.C. Infrared photoluminescence characterization of long-wavelength $HgCdTe$ detector materials // *Semicond. Sci. Technol.* 1993. V. 8. № 6. P. 941–945. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/8/6s/015>
11. Ruzhevich M.S., Mynbaev K.D., Photoluminescence in Mercury Cadmium Telluride — a historical retrospective. Part II: 2004–2022 // *Reviews on Advanced Materials and Technologies.* 2022. V. 4. № 4. P. 17–38. <https://doi.org/10.17586/2687-0568-2022-4-4-17-38>
12. Chen J., Li L., Lin Y., Liu L., Cui X. Influence of annealing on the surface structure evolution of intrinsic *p*-type $HgCdTe$ films // *Surfaces and Interfaces.* 2023. V. 42. Part B. P. 103451. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103451>
13. Qiu X.-F., Zhang S.-X., Zhang J., Wu Y., Chen P.-P. Microstructure and optical characterization of mid-wave $HgCdTe$ grown by MBE under different conditions // *Crystals.* 2021. V. 11. № 3. P. 296. <https://doi.org/10.3390/cryst11030296>
14. Shvets V.A., Marin D.V., Remesnik V.G., Azarov I.A., Yakushev M.V., Rykhllitskii S.V. Parametric model of the optical constant spectra of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ and determination of the compound composition // *Optics and Spectroscopy.* 2020. V. 128. № 12. P. 1948–1953. <https://doi.org/10.1134/S0030400X2012042>
15. Shvets V.A., Marin D.V., Yakushev M.V., Rykhllitskii S.V. Investigation of the temperature dependence of the spectra of optical constants of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ films grown using molecular beam epitaxy // *Optics and Spectroscopy.* 2021. V. 129. № 1. P. 29–36. <https://doi.org/10.1134/S0030400X21010173>
16. Razova A.A., Utochkin V.V., Fadeev M.A., Rumyantsev V.V., Dubinov A.A., Kudryavtsev K.E., Shengurov D.V., Morozova E.E., Skorohodov E.V., Mikhailov N.N., Dvoretsky S.A., Gavrilchenko V.I., Morozov S.V. Laser generation at wavelengths 4.1–5.1 μ m of $Cd_xHg_{1-x}Te/Cd_yHg_{1-y}Te$ quantum-well heterostructures with microdisk resonators // *Journal of Applied Spectroscopy.* 2022. V. 89. № 5. P. 844–848. <https://doi.org/10.1007/s10812-022-01435-0>
17. Chang Y. Absorption of narrow-gap $HgCdTe$ near the band edge including nonparabolicity and the Urbach tail // *J. Electron. Mater.* 2007. V. 36. № 8. P. 1000–1006. <https://doi.org/10.1007/s11664-007-0162-0>

18. Moazzami K. Optical absorption properties of HgCdTe epilayers with uniform composition // *J. Electron. Mater.* 2003. V. 32. № 7. P. 646–650. <https://doi.org/10.1007/s11664-003-0046-x>
19. Ружевич М.С., Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л., Дорогов М.В., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Ремесник В.Г., Ужаков И.Н. Характеризация широкозонных слоев в лазерных структурах на основе CdHgTe // *Физика твердого тела.* 2023. Т. 65. Вып. 3. С. 411–414. <https://doi.org/10.21883/FTT.2023.03.54738.552>
20. Becker C.R., Latussek V., Pfeuffer-Jeschke A., Landwehr G., Molenkamp L.W. Band structure and its temperature dependence for type-III HgTe/Hg_{1-x}Cd_xTe superlattices and their semimetal constituent // *Phys. Rev. B.* 2000. V. 62. № 15. P. 10353. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.10353>
21. Izhnin I.I., Voitsekhovsky A.V., Korotaev A.G., Fitsych O.I., Bonchik A.Yu., Savytskyy H.V., Mynbaev K.D., Varavin V.S., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Yakushev M.V., Jakiela R. Optical and electrical studies of arsenic-implanted HgCdTe films grown with molecular beam epitaxy on GaAs and Si substrates // *Infr. Phys. Technol.* 2017. V. 81. P. 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.12.006>
18. Moazzami K. Optical absorption properties of HgCdTe epilayers with uniform composition // *J. Electron. Mater.* 2003. V. 32. № 7. P. 646–650. <https://doi.org/10.1007/s11664-003-0046-x>
19. Ruzhevich M.S., Mynbaev K.D., Bazhenov N.L., Dorogov M.V., Dvoretskii S.A., Mikhailov N.N., Remesnik V.G., Uzhakov I.N. Characterization of wide-bandgap layers in laser structures based on CdHgTe // *Physics of the Solid State.* 2023. V. 65. № 3. P. 402–405. <https://doi.org/10.21883/PSS.2023.03.55580.552>
20. Becker C.R., Latussek V., Pfeuffer-Jeschke A., Landwehr G., Molenkamp L.W. Band structure and its temperature dependence for type-III HgTe/Hg_{1-x}Cd_xTe superlattices and their semimetal constituent // *Phys. Rev. B.* 2000. V. 62. № 15. P. 10353. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.10353>
21. Izhnin I.I., Voitsekhovsky A.V., Korotaev A.G., Fitsych O.I., Bonchik A.Yu., Savytskyy H.V., Mynbaev K.D., Varavin V.S., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Yakushev M.V., Jakiela R. Optical and electrical studies of arsenic-implanted HgCdTe films grown with molecular beam epitaxy on GaAs and Si substrates // *Infr. Phys. Technol.* 2017. V. 81. P. 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.12.006>

АВТОРЫ

Максим Станиславович Ружевич — аспирант, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57427011200, <https://orcid.org/0000-0002-4513-6345>, max.ruzhevich@niuitmo.ru

Карим Джафарович Мынбаев — доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 6602141057, <https://orcid.org/0000-0002-9853-8874>, mynkad@mail.ioffe.ru

Николай Леонидович Баженов — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 6603050470, <https://orcid.org/0000-0002-3019-2280>, bazhnil.ivom@mail.ioffe.ru

Максим Владимирович Дорогов — канд. физ.-мат. наук, доцент, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 56346880000, <https://orcid.org/0000-0001-5987-3357>, mvdorogov@itmo.ru

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

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

Иван Николаевич Ужаков — старший инженер-технолог, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 55975917700, <https://orcid.org/0009-0003-4982-2486>, uzhakov@isp.nsc.ru

Владимир Григорьевич Ремесник — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, 630090, Новосибирск, Россия;

- AUTHORS**
- Maxim S. Ruzhevich** — Graduate Student, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57427011200, <https://orcid.org/0000-0002-4513-6345>, max.ruzhevich@niuitmo.ru
- Karim D. Mynbaev** — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Head of Laboratory, Ioffe Institute, 194021, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 6602141057, <https://orcid.org/0000-0002-9853-8874>, mynkad@mail.ioffe.ru
- Nikolay L. Bazhenov** — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Ioffe Institute, 194021, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 6603050470, <https://orcid.org/0000-0002-3019-2280>, bazhnil.ivom@mail.ioffe.ru
- Maxim V. Dorogov** — PhD in Physics and Mathematics, Assistant Professor, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 56346880000, <https://orcid.org/0000-0001-5987-3357>, mvdorogov@itmo.ru
- Vasiliy S. Varavin** — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 7003347783, <https://orcid.org/0000-0001-7722-6428>, varavin@isp.nsc.ru
- Nikolay N. Mikhailov** — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 7006462618, <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>, mikhailov@isp.nsc.ru
- Ivan N. Uzhakov** — Senior Engineer-Technologist, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 55975917700, <https://orcid.org/0009-0003-4982-2486>, uzhakov@isp.nsc.ru
- Vladimir G. Remesnik** — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID:

Scopus ID: 6602971779, <https://orcid.org/0009-0003-7495-929X>,
remesnik@isp.nsc.ru

Максим Витальевич Якушев — доктор физ.-мат. наук, за-
ведующий лабораторией, Институт физики полупроводни-
ков им. А.В. Ржанова, 630090, Новосибирск, Россия; Sco-
pus ID: 35363240800, <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>,
yakushev@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 30.09.2023
Одобрена после рецензирования 07.12.2023
Принята к печати 29.12.2023

pus ID: 6602971779, <https://orcid.org/0009-0003-7495-929X>,
remesnik@isp.nsc.ru

Maxim V. Yakushev — Dr.Sc. in Physics and Mathemat-
ics, Head of Laboratery, Rzhanov Institute of Semiconduc-
tor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Sco-
pus ID: 35363240800, <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>,
yakushev@isp.nsc.ru

*The article was submitted to the editorial office 30.09.2023
Approved after review 07.12.2023
Accepted for publication 29.12.2023*