

07

Планаризация эпитаксиальных слоев HgCdTe, выращенных на подложках CdZnTe методом жидкофазной эпитаксии

© А.А. Трофимов,¹ И.А. Денисов,² Ю.Б. Андрусов,² М.Б. Гришечкин,² Д.О. Царегородцев,¹ А.М. Косякова,¹ С.А. Курепин,³ А.С. Смирнов,^{3,4} В.Ю. Долматов⁵

¹Государственный научный центр РФ Научно-производственное объединение „Орион“, 111538 Москва, Россия

²Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности „Гиредмет“ им. Н.П. Сажина, 111524 Москва, Россия

³Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В.В. Бахирева, 606002 Дзержинск, Нижегородская обл., Россия

⁴Самарский государственный технический университет, 443100 Самара, Россия

⁵Специальное конструкторско-технологическое бюро „Технолог“, 192076 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: aa-trofimov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 11 октября 2024 г.

В окончательной редакции 11 октября 2024 г.

Принято к публикации 11 октября 2024 г.

На образцах гетероэпитаксиальных структур HgCdTe, выращенных на изотипных подложках CdZnTe методом жидкофазной эпитаксии в АО „Гиредмет“, исследована возможность обработки поверхности эпитаксиального слоя HgCdTe с применением субмикронных алмазов детонационного синтеза отечественного производства для прецизионного удаления террасного микрорельефа и получения зеркально гладкой поверхности с субнаношероховатым рельефом, пригодной для создания инфракрасных приборов.

Ключевые слова: HgCdTe, инфракрасные приборы, жидкофазная эпитаксия, химико-механическое полирование.

DOI: 10.61011/JTF.2025.03.59861.315-24

Введение

Псевдобинарное соединение теллурид кадмия-ртути (HgCdTe) является одним из основных материалов для производства матричных фотоприемных устройств (МФПУ) длинноволнового инфракрасного диапазона 8–12 μm (LWIR), которые в свою очередь крайне востребованы для широкого спектра преимущественно специальных применений и в детектирующих устройствах космического базирования [1,2]. Благодаря фундаментальным свойствам HgCdTe: кристаллической структуре, прямым оптическим переходам зонной диаграммы, изменению рабочей длины волны в зависимости от состава тройного твердого раствора, большому коэффициенту оптического поглощения — обеспечиваются высокая квантовая эффективность, высокая обнаружительная способность и чувствительность при производстве фотоприемных устройств среднего и дальнего ИК диапазона спектра, что повышает пространственное разрешение тепловизионного канала, тем самым обеспечивая повышение дальности обнаружения и распознавания [2]. Матрицы на основе такого материала для снижения скорости тепловой генерации носителей заряда не требуют настолько глубокого охлаждения, как, к примеру, МФПУ на основе антимонида индия (InSb),

что ведет к снижению массогабаритных характеристик приборов на основе HgCdTe. Перспективы повышения эффективности современных систем наблюдения связаны с обеспечением их работоспособности с учетом требований всепогодности, помехозащищенности, независимости от условий естественного освещения и других факторов. При прохождении через земную атмосферу электромагнитное излучение ослабляется. Наиболее существенными являются процессы поглощения и рассеяния излучения молекулами газов, парами воды, аэрозолями и осадками. Главная причина ослабления ИК излучения при прохождении приземных и вертикальных трасс заключается в его поглощении молекулами газов. Именно молекулярное поглощение определяет характерный вид спектрального коэффициента пропускания атмосферы. Даже в самых плохих погодных условиях при малой метеорологической дальности видимости атмосферная трасса в ИК диапазоне более прозрачна, чем для видимого света из-за того, что длина волны излучения λ в „окне прозрачности“ 8–12 μm в 20 раз больше, чем в видимом диапазоне $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ [3]. К примеру, при пропускании атмосферой только 1% видимого света, количество пропускаемого ИК излучения в диапазоне 8–12 μm составляет 22% (табл. 1) [4]. Матрицы на основе HgCdTe дают лучшее изображение в темное

Таблица 1. Типичные значения коэффициентов пропускания некоторых типов излучения

Видимый свет $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$	ИК излучение	
	$\lambda = 3-5 \mu\text{m}$	$\lambda = 8-12 \mu\text{m}$
1.0 (без тумана)	1.0	1.0
0.5 (в тумане)	0.67	0.97
0.1	0.36	0.56
0.01	0.01	0.22

время суток и в условиях задымления и пыли. Это расширяет обзор наземного и воздушного пространства, обеспечивает безопасное пилотируемое в сложных метеоусловиях.

Преимущества длинноволнового ИК диапазона заключаются в возможности детектирования быстро движущихся объектов в условиях низкоконтрастной фоноцелевой обстановки. В этом диапазоне примерно в 10 раз меньше помехи от излучения неоднородностей небосвода, переотраженного от взволнованной морской поверхности, что особенно важно при захвате и сопровождении низколетящих целей. В ИК диапазоне 8–12 μm расположен максимум спектральной излучательной способности замаскированной техники и теплового излучения тела человека [5]. Вышеперечисленные преимущества LWIR МФПУ на основе HgCdTe обуславливают их использование в производстве объектов вооружения, военной и специальной техники, и соответственно, гетероэпитаксиальные структуры тройного соединения HgCdTe ставят в ряд материалов стратегического значения, являющихся важным фактором развития экономики, обеспечения безопасности государства и входящих в перечень национальных проектов развития технологического суверенитета [6,7]. Этим объясняется тот факт, что сведения, имеющие отношение к современной передовой технологии создания таких ИК приборов, начиная от изготовления согласованных подложек, пригодных для эпитаксиального роста HgCdTe, получением слоев HgCdTe, и заканчивая корпусированием МФПУ на их основе, в открытой зарубежной научно-технической литературе практически не представлены и строго охраняются.

Эпитаксиальные структуры HgCdTe получают различными методами.

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) обеспечивает такие преимущества как: относительно малая ростовая температура ($\sim 180^\circ\text{C}$), что приводит к снижению диффузии примесей из подложки, а также наиболее чистые условия роста и соответственно низкий уровень фонового легирования [8]. Кроме того, с помощью метода МЛЭ возможно выращивать эпитаксиальные структуры с высокой точностью, хорошей морфологией и плоскостностью поверхности, максимально пригодной для дальнейших технологических операций. Однако МЛЭ

предъявляет самые высокие требования подложке, качество обработки которой в части морфологии поверхности, субнаношероховатого рельефа и геометрических параметров оказывает прямое влияние на получение высокосовременных эпитаксиальных структур.

В России разработка и опытное производство гетероэпитаксиальных структур HgCdTe методом МЛЭ проводилась только на подложках Si и GaAs [9–13]. Технология получения и обработки этих подложечных материалов хорошо отработана и обеспечивает высокое качество поверхности, удовлетворяющее требованиям метода МЛЭ, при относительно невысокой стоимости таких подложек, что позволяет снизить конечную стоимость приборов на основе слоев HgCdTe, выращенных на подложках Si и GaAs, а также способствует ускорению внедрения МФПУ HgCdTe в различные сферы применения. Вместе с тем эти подложечные материалы имеют высокое рассогласование кристаллических решеток с HgCdTe (табл. 2) [14], химическую и температурную несогласованность, что обуславливает сложность технологии эпитаксиального роста HgCdTe на таких подложках и затрудняет масштабирование производства.

Выращенные при помощи метода химического осаждения из паров металлоорганических соединений (МОСVD) слои HgCdTe по своим характеристикам не уступают слоям, полученным по другим технологиям. К достоинствам этого метода относят его гибкость и относительно высокую производительность, а также возможность получения сложных многослойных структур высокого качества с умеренной стоимостью [15]. Перечисленные преимущества позволяют некоторым зарубежным фирмам использовать этот метод для серийного производства МФПУ на основе HgCdTe. Отечественными научными группами методом МОСVD проводилось выращивание слоев HgCdTe преимущественно на подложках GaAs [16] и, несмотря на ряд публикаций в отечественной литературе [17,18], систематического исследования свойств эпитаксиальных слоев HgCdTe, полученных на подложках CdZnTe МОСVD-методом, не проводилось. В настоящее время в России возрос интерес к эпитаксиальному росту HgCdTe на подложках CdZnTe и ведутся работы по получению методом МОСVD на изотипных подложках CdZnTe (211)В неле-

Таблица 2. Рассогласование параметров HgCdTe и возможных подложек для его выращивания

Подложки	Рассогласование кристаллической решетки с $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.2, T = 300 \text{ K}$), %	Температурное рассогласование с $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.2, T = 300 \text{ K}$), %
$\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ($y = 0.04$)	< 0.1	3.53
GaAs	13.6	27.04
Si	19.47	51.85

гированных эпитаксиальных слоев HgCdTe, исследованию влияния режимов предэпитаксиальной подготовки подложек и условий осаждения на морфологию поверхности, определению кристаллического совершенства и электрофизических свойств слоев [19].

Получение эпитаксиальных слоев HgCdTe высокого качества, которое необходимо для изготовления высокоэффективных LWIR МФПУ, является сложной и наукоемкой задачей, вследствие образования различных структурных дефектов, а также неоднородности состава в ходе эпитаксиального роста. Высокие эксплуатационные характеристики приборов длинноволнового ИК диапазона напрямую определяются качеством поверхности эпитаксиального слоя HgCdTe вне зависимости от применяемого эпитаксиального метода, так как количество дефектных пикселей в матрице обусловлено плотностью дефектов на поверхности выращенного слоя HgCdTe независимо от природы их происхождения или метода выращивания слоя [20–22]. Влияние поверхностных дефектов на характеристики фотодиодов возрастает при уменьшении размера пикселя в „смотрящих“ матрицах. Прежде всего такие дефекты являются основным источником поверхностной составляющей высокого тока утечки, что в свою очередь повышает шум и ослабляет сигнал, тем самым снижая чувствительность ИК прибора, так как ток поверхностной генерации обусловлен генерацией носителей в месте выхода области объемного заряда p – n -перехода на границу раздела полупроводник–диэлектрик, которая тем значительнее, чем более развитый рельеф имеет поверхность. Планарный вариант изготовления фоточувствительных приборов при наличии на поверхности качественного диэлектрика (обеспечивающего скорость поверхностной рекомбинации на границе раздела диэлектрик–полупроводник меньше 1 см/с) позволяет получать минимальные значения токов утечки, определяемые только объемными свойствами материала [23]. Кроме того, крупные ростовые дефекты, развитая морфология и искажения формы поверхности (отклонения от плоскостности), проявляющиеся в разнотолщинности эпитаксиального слоя, усиливают шумы [24], являются причиной высокого темпа поверхностной рекомбинации, разрывов или низкого качества напыляемых диэлектрических покрытий, приводят к сложностям при стыковке матрицы фотодиодов со схемой считывания сигналов. Вопросы управления качеством поверхности получаемых слоев HgCdTe занимают значительное место в разработках эпитаксиальных технологий выращивания.

Для полной реализации возможностей HgCdTe необходима высококачественная, бездефектная и по возможности атомарно-гладкая поверхность этого материала [25]. Применение для эпитаксиального выращивания HgCdTe согласованных по параметру кристаллической решетки подложек позволяет снизить плотность дислокаций в слое HgCdTe до 10^4 см^{-2} , обеспечить высокое структурное совершенство эпитаксиальных слоев, а также однородность фотоэлектрических характеристик

по площади матрицы (менее 0.5% дефектных элементов) [26]. Таким изотипным подложечным материалом для HgCdTe является теллурид кадмия-цинка (CdZnTe) с мольной долей ZnTe = 3–5% [14], и зарубежные производители лучших матриц на основе HgCdTe получают этот материал выращиванием преимущественно на подложках CdZnTe.

В России долгое время технология эпитаксиального роста HgCdTe методами МЛЭ и МOCVD на согласованных подложках CdZnTe не разрабатывалась, поскольку такие коммерчески доступные подложки зарубежного производства являются малоразмерными (до $20 \times 20 \text{ мм}$) и дорогостоящими, а последние 10 лет их приобретение крайне затруднено в связи с санкционным давлением. В настоящее время в рамках опытно-конструкторских работ по заказу Минпромторга РФ решена задача получения полированных подложек $\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ($y = 0.04 \pm 0.005$) диаметром 50.8 мм и кристаллографической ориентации $(211)\text{В} \pm 0.5^\circ$, пригодных для эпитаксиальных процессов HgCdTe методом МЛЭ [27–31]. Достигнутые в АО „НПО „Орион“ показатели качества подготовки поверхности подложек не уступают лучшим мировым аналогам [32–34] и характеризуются следующими значениями: разнотолщинность (TTV) составляет $\leq 1.5 \mu\text{м}$; шероховатость поверхности, измеренная методом атомно-силовой микроскопии, составляет $Ra = 0.40 \text{ нм}$ ($rms = 0.51 \text{ нм}$) на базовой длине $7 \mu\text{м}$. Плотность дислокаций в подложках определяется структурным совершенством слитков CdZnTe, выращенных методом Бриджмена в АО „Гиредмет“ [35,36] из особоочищенных исходных компонентов отечественного производства [37], и подтверждена на уровне менее 10^4 см^{-2} .

В АО „Гиредмет“ разработана технология выращивания эпитаксиальных слоев HgCdTe для ИК приемников [38] и осуществляется рост методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на согласованных подложках CdZnTe диаметром 30–45 мм и кристаллографической ориентации $(111)\text{В} \pm 0.5^\circ$, производимых по оригинальной разработанной технологии подготовки таких подложек с шероховатостью поверхности на уровне $Ra = 2\text{--}4 \text{ нм}$ [39]. Повышенный наношероховатый рельеф поверхности подложек, в отличие от тех требований, которые предъявляются к подложкам при использовании методов МЛЭ и МOCVD, объясняется тем, что при выращивании эпитаксиальных слоев HgCdTe методом ЖФЭ применяется предварительное растворение поверхностного слоя подложки в перегретом растворе в связи с чем допускается применение подложек с шероховатостью поверхности $Ra \approx 2 \text{ нм}$. Экспериментально установлено, что при перегреве раствора на основе теллура $< 2^\circ\text{C}$ и скорости охлаждения системы $> 0.2^\circ\text{C}/\text{мин}$ растворение подложки и последующий рост слоя HgCdTe протекают в диффузионном режиме, нарушений планарности на начальных стадиях эпитаксии не происходит (рис. 1, а) [40]. При этом сначала скорость роста отрицательная, что соответствует собствен-

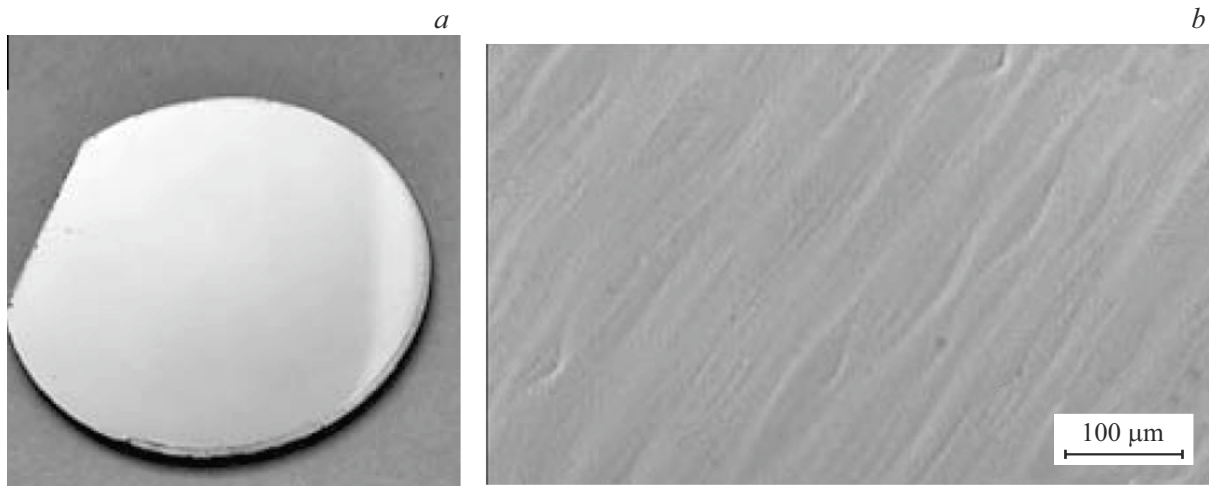


Рис. 1. Эпитаксиальный слой HgCdTe, выращенный в АО „Гиредмет“ на согласованной подложке CdZnTe методом ЖФЭ с предварительным растворением поверхностного слоя подложки и при перегреве раствора на основе теллура 1°C и скорости охлаждения системы 0.5 grad/min : *a* — форма поверхности; *b* — характерный для метода ЖФЭ микрорельеф на поверхности.

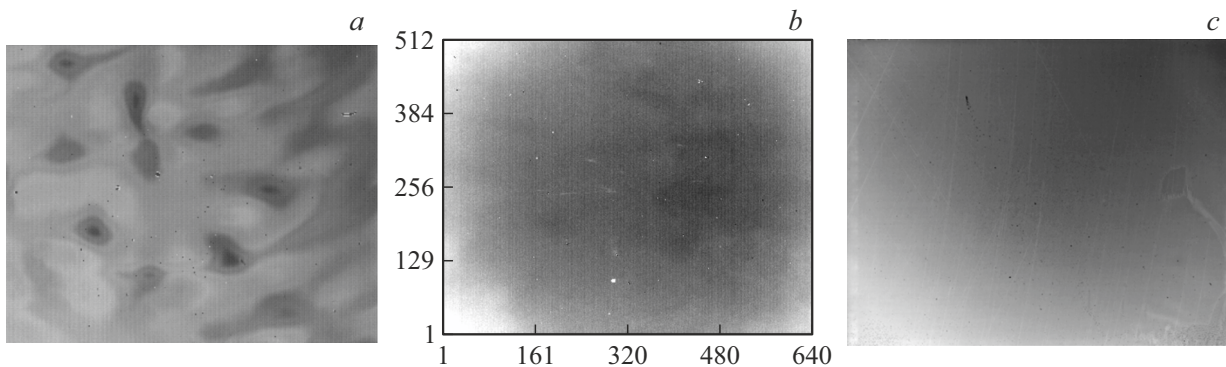


Рис. 2. Поверхность эпитаксиального слоя HgCdTe на подложке CdZnTe: *a* — полученная методом ЖФЭ; *b* — обработанная после ЖФЭ; *c* — полученная методом МЛЭ.

но растворению подложки в растворе, затем, по мере охлаждения системы, жидкая фаза пересыщается и начинается рост эпитаксиального слоя HgCdTe. При этом скорость роста проходит через нулевое значение, а это означает, что система проходит через состояние равновесия. Таким образом, начальные стадии роста эпитаксиального слоя протекают в условиях, близких к равновесию, что благоприятно сказывается на формирующемся микрорельефе. Он приобретает регулярный волнообразный характер, гребни террас становятся округлыми, а их высота уменьшается до нескольких десятков нанометров (рис. 1, *b*) [40]. Наличие террасного микрорельефа является характерной особенностью выращивания эпитаксиальных слоев HgCdTe методом ЖФЭ из растворов на основе теллура на разориентированную относительно кристаллографической плоскости (111) подложку CdZnTe [33,41,42]. Метод ЖФЭ обеспечивает наилучшие результаты с точки зрения кристаллического качества и по-прежнему является распространенной технологией для промышленного производства HgCdTe.

За рубежом существует технология доведения поверхности эпитаксиальных слоев HgCdTe, полученных методом ЖФЭ [43,44], ключевые результаты которой были представлены в 2006 г. на Международной конференции в Москве техническим директором французской компании SOFRADIR. В ходе доклада было убедительно продемонстрировано влияние качества поверхности на изображение, получаемое ИК МФПУ, а также возможности обработки поверхности эпитаксиального слоя HgCdTe с исходным террасным микрорельефом после ЖФЭ с конечным результатом, не уступающим по качеству поверхности, полученной методом МЛЭ (рис. 2) [43].

С использованием эпитаксиальных слоев, полученных методом ЖФЭ и впоследствии обработанных, компанией SOFRADIR были изготовлены МФПУ длинноволнового ИК диапазона VENUS с рабочей длиной волны $9.6\text{ }\mu\text{m}$, размером матрицы 384×288 , шагом пикселя $25\text{ }\mu\text{m}$, рабочей температурой 80 K и с количеством дефектных элементов в матрице менее 0.5% , внешний

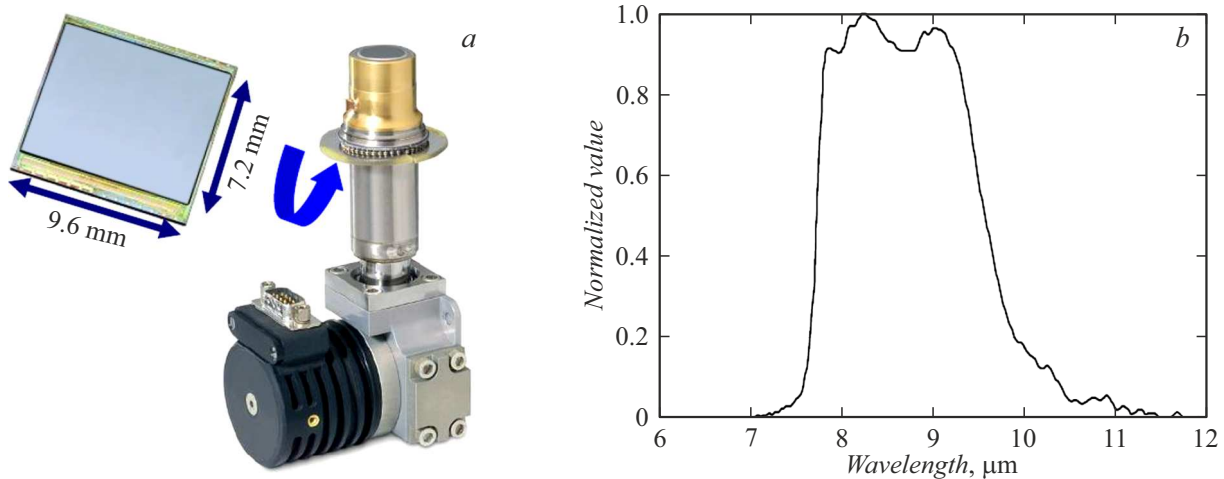


Рис. 3. МФПУ длинноволнового ИК диапазона VENUS на основе HgCdTe, изготовленное компанией SOFRADIR с применением технологии высококачественной обработки эпитаксиальных слоев HgCdTe, выращенных методом ЖФЭ: *a* — внешний вид; *b* — спектральная характеристика устройства.

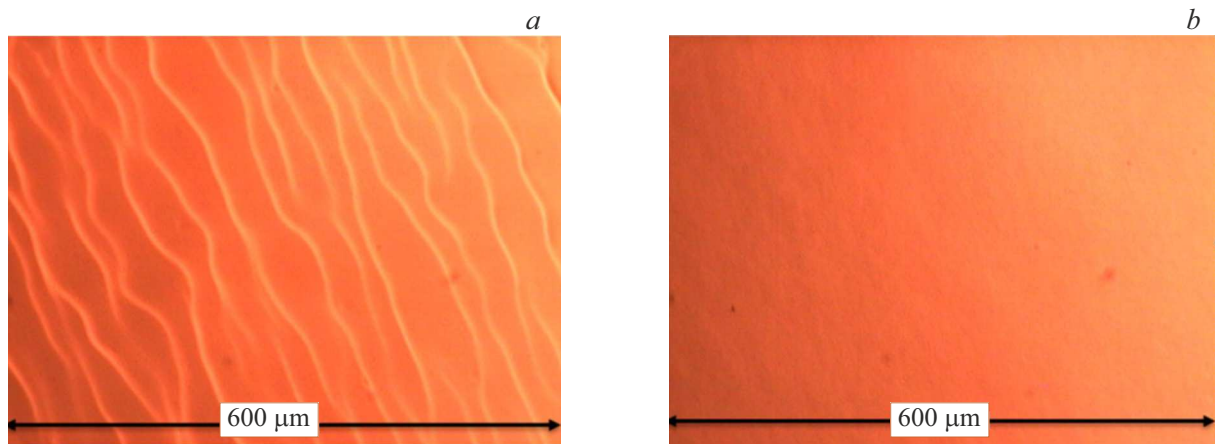


Рис. 4. Морфология поверхности эпитаксиального слоя HgCdTe на подложке CdZnTe, выращенного методом ЖФЭ (*a*), и морфология поверхности этого эпитаксиального слоя после химиико-механического полирования (*b*).

вид и спектральный диапазон которого представлены на рис. 3 [43].

Успехи компании SOFRADIR не единственные в мире. Аналогичные результаты в части обработки поверхности и сглаживания террасного микрорельефа эпитаксиальных слоев HgCdTe, выращенных методом ЖФЭ, достигнуты и другими зарубежными научными группами (рис. 4) [45].

Таким образом, создание МФПУ длинноволнового ИК диапазона на основе материала HgCdTe является актуальной задачей, направленной на укрепление технологического суверенитета государства. Высококачественные эпитаксиальные слои HgCdTe, пригодные для изготовления LWIR МФПУ, возможно вырастить различными эпитаксиальными методами с применением изотипных подложек CdZnTe, производство которых с требованиями, удовлетворяющими методу МЛЭ, в нашей стране реализовано в послед-

ние годы. Однако технология эпитаксиального роста HgCdTe на таких согласованных подложках методами МЛЭ и МOCVD, позволяющая получать структуры с морфологией поверхности высокого качества, в России в настоящее время не разработана. Выращивание эпитаксиальных слоев HgCdTe методом ЖФЭ на изотипных подложках CdZnTe в нашей стране осуществляется с применением специально сконструированного и изготовленного отечественного оборудования по оригинальной технологии, разработанной в 1980–1990 гг. под руководством В.М. Лакеенкова в АО „Гиредмет“. Тем не менее террасный микрорельеф эпитаксиальных слоев HgCdTe на уровне $Ra \geq 10 \text{ nm}$, который является характерной особенностью выращивания методом ЖФЭ, существенно ограничивает возможность изготовления на таких структурах МФПУ длинноволнового ИК диапазона без доработки поверхности.

Задача настоящего исследования, являющегося составной частью исследований и разработок, направленных на создание в Российской Федерации матричных фотоприемных устройств длинноволнового ИК диапазона спектра на основе эпитаксиальных слоев фоточувствительного материала HgCdTe, выращенных на изотипных согласованных подложках CdZnTe, заключалась в проведении поисковых работ, направленных на установление технологической возможности применения метода химико-механического полирования поверхности эпитаксиальных слоев HgCdTe, выращенных методом ЖФЭ на изотипных подложках CdZnTe, и определение в ходе исследований состава полировальных суспензий в комплексе с технологическими условиями процесса, обеспечивающими прецизионную изотропность обработки, для достижения показателей качества подготовки поверхности эпитаксиальных слоев HgCdTe, не уступающих мировым аналогам.

1. Экспериментальная часть

Объекты для исследований представлены двумя различными гетероструктурами HgCdTe, выращенными на согласованных подложках CdZnTe методом ЖФЭ в АО „Гиредмет“. Различия заключались в диаметре используемых подложек, их кристаллографической ориентации, а также в толщине выращенного эпитаксиального слоя.

Выбор объектов исследований обусловлен необходимостью получения максимальной достоверной информации в различных условиях обработки и исследованием влияния технологических условий на различия в исходных обрабатываемых материалах.

Для эпитаксиального роста HgCdTe методом ЖФЭ оптимально применение подложек CdZnTe с кристаллографической ориентацией $(111)B \pm 0.5^\circ$, а для методов МЛЭ и МOCVD наилучшей кристаллографической ориентацией является $(211)B \pm 0.5^\circ$. Применение подложки CdZnTe $(211)B \pm 0.5^\circ$ для выращивания эпитаксиальных слоев HgCdTe методом ЖФЭ приводит к сильному рельефу поверхности выращенного слоя. Проведение исследований на таком образце, специально выращенном на подложке с неоптимальной для метода ЖФЭ ориентацией, имело целью повысить достоверность разработанной технологической схемы обработки и примененных технических решений путем получения согласующихся результатов при обработке поверхности с различным рельефом.

Диаметр выбранных гетероструктур составлял 37 mm для ориентации подложки $(211)B \pm 0.5^\circ$ и 45 mm для ориентации $(111)B \pm 0.5^\circ$ соответственно. Различия в диаметре требуют разного подхода к обработке вследствие хрупкости материала и вероятности механического повреждения гетероструктуры, которая повышается с увеличением диаметра. Кроме того, увеличение диаметра требует внесения корректив на этапе химико-механического полирования, что вызвано необходимо-

стью обеспечения преимущественно изотропного характера обработки, что достигается не только максимально равномерной доставкой реагентов к поверхности и адсорбцией их поверхностью слоя HgCdTe, но также и максимально равномерной десорбцией продуктов реакции и отвод их от поверхности обрабатываемого материала.

Сложность обработки эпитаксиального слоя $Hg_{1-x}Cd_xTe$ обусловлена свойствами этого материала, который представляет собой химическое соединение теллурида кадмия (CdTe) и теллурида ртути (HgTe) с настраиваемой шириной запрещенной зоны, охватывающей ИК область от коротковолновой до длинноволновой, и изменяемой посредством выбора количества кадмия (Cd) в сплаве, чем и настраивается оптическое поглощение материала на желаемую длину волны ИК излучения. С уменьшением количества кадмия (и соответственно увеличением количества ртути) рабочая длина волны HgCdTe смещается в сторону ИК диапазона 8–12 μm (при $x = 0.2$). Из-за слабых связей, которые образует ртуть (Hg) с теллуридом (Te), материал HgCdTe является более мягким, чем любой обычный полупроводник A_3B_5 . Твердость по шкале Мооса HgTe составляет 1.9, а твердость CdTe — 2.9. С повышением содержания ртути в тройном твердом растворе HgCdTe его твердость понижается. Вследствие этого механическое воздействие на этот материал может привести к необратимым последствиям и полной потере эксплуатационных свойств. Кроме того, HgCdTe обладает низкой теплопроводностью, которая снижается при уменьшении концентрации кадмия в составе. Это обстоятельство следует учитывать при механическом и химико-механическом полировании, чтобы избежать чрезмерного термического воздействия на обрабатываемую гетероструктуру.

Обработка эпитаксиальных слоев HgCdTe производилась на установке PM5 Logitech (Великобритания) с применением специально модифицированной оснастки для работы в условиях агрессивных химических полирующих травителей. В ходе обработки гетероструктуры подвергались предварительному полированию суспензиями отечественного производства на основе мелкодисперсных субмикронных алмазов детонационного синтеза. Одним из типичных применений данного абразивного материала является использование в высокопрецизионных процессах с получением морфологии поверхности с шероховатостью на уровне 1 nm [46–48].

Традиционно в полировании различных материалов используются порошки оксида алюминия (Al_2O_3) или алмазы синтетические монокристаллические. Частицы алмаза синтетического монокристаллического производятся методом высокого давления и высокой температуры и имеют ориентированную кристаллическую структуру с параллельными плоскостями расщепления, что затрудняет разрушение таких частиц, кроме того, в случае разрушения образуются пластинки с острыми углами, которые способны наносить глубокие царапины при обработке мягких материалов. Порошок оксида

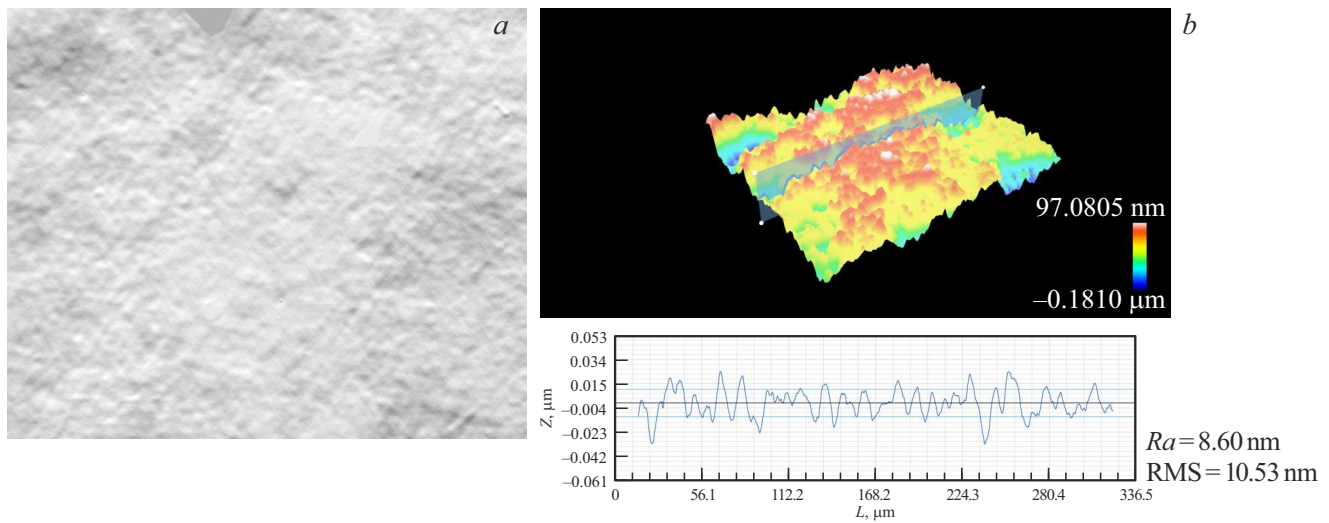


Рис. 5. Морфология поверхности эпитаксиального слоя HgCdTe на подложке CdZnTe (111)B диаметром 45 mm, выращенного методом ЖФЭ (a), и результаты измерения шероховатости поверхности эпитаксиального слоя (b).

алюминия (Al_2O_3) состоит из пластинчатых кристаллов, обработка которыми дает картину, сопоставимую с обработкой синтетическими монокристаллическими алмазами [49].

Преимущества предфинишного механического полирования с применением суспензий на основе мелкодисперсных субмикронных алмазов детонационного синтеза заключается в том, что этот материал имеет поликристаллическую структуру, каждая частица состоит из большого количества наноразмерных монокристаллических блоков с высокой плотностью дислокаций и обладает множеством режущих кромок. В процессе применения при разрушении частиц режущие кромки воспроизводятся, что обеспечивает сочетание высокой абразивной способности и чистоты обрабатываемой поверхности [47]. Частицы поликристаллического алмаза детонационного синтеза имеют псевдосферическую форму, а также вследствие поликристалличности могут легко разрушаться в ходе обработки, образуя более мелкодисперсные частицы, оказывающие благоприятное влияние на морфологию поверхности, полученную в результате механического полирования.

На заключительном этапе полирование эпитаксиальных слоев HgCdTe осуществлялось химико-механическим методом с применением полировальной ткани Chemcloth Logitech (Великобритания) и разработанного химического полирующего травителя следующего состава — $Vr : C_2H_6O_2 : CH_3OH$, где концентрация брома составляла 0.1 %.

После химико-механического полирования морфология и шероховатость поверхности обработанных гетероструктур исследовалась и измерялась на бесконтактном оптическом профилометре Sensofar S Neox (Испания) с размером кадра $330 \times 290 \mu m$. Толщина эпитаксиального

слоя HgCdTe оценивалась по спектрам пропускания с помощью ИК-фурье спектрометра Bruker Vertex 70.

Экспериментальный образец № 1 представлен гетероструктурой HgCdTe, выращенной на подложке CdZnTe кристаллографической ориентации $(111)B \pm 0.5^\circ$ диаметром 45 mm. Результаты исследования исходной морфологии поверхности и измерения шероховатости представлены на рис. 5. Наблюдается развитый рельеф, характерный для метода ЖФЭ, с шероховатостью поверхности на уровне $Ra = 8.6 \text{ nm}$ ($rms = 10.53 \text{ nm}$). Толщина эпитаксиального слоя HgCdTe составляла около $15 \mu m$.

После проведения полировальных процессов последовательно суспензией на основе субмикронных алмазов детонационного синтеза для планаризации поверхности и химико-механического полирования с применением разработанного химического полирующего травителя на основе брома для удаления нарушенного слоя, образовавшегося в ходе предыдущего процесса, а также устранения микроцарапин, поверхность структуры стала визуально зеркальной с шероховатостью поверхности на уровне $Ra = 0.73 \text{ nm}$ ($rms = 0.89 \text{ nm}$) (рис. 6). В ходе двухстадийной обработки удалено $5 \mu m$ эпитаксиального слоя.

Экспериментальный образец № 2 представлен гетероструктурой HgCdTe, выращенной на подложке CdZnTe кристаллографической ориентации $(211)B \pm 0.5^\circ$ диаметром 37 mm. Произведена также двухстадийная обработка. Внешний вид структуры до и после обработки представлен на рис. 7.

Для образца № 2 были произведены замеры толщины выращенного эпитаксиального слоя HgCdTe по спектрам пропускания, а также толщины эпитаксиального слоя после обработки. Исходная толщина эпитаксиального слоя HgCdTe образца № 2 составляла $21.0\text{--}23.4 \mu m$

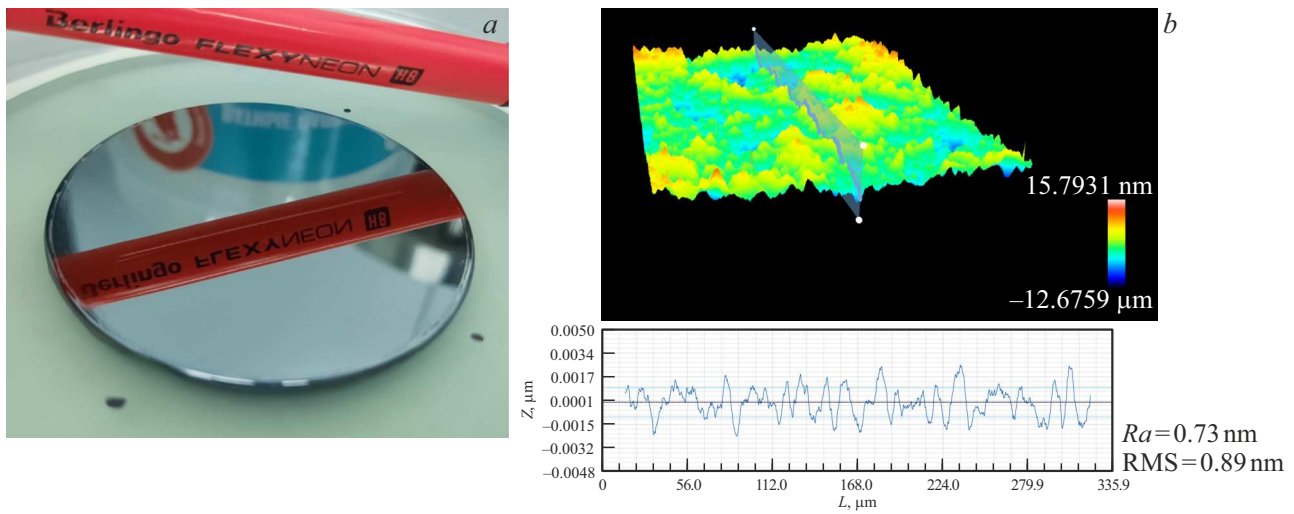


Рис. 6. Поверхность эпитаксиального слоя HgCdTe на подложке CdZnTe (111)В диаметром 45 mm, выращенного методом ЖФЭ, после обработки: *a* — внешний вид; *b* — и результаты измерения шероховатости поверхности.

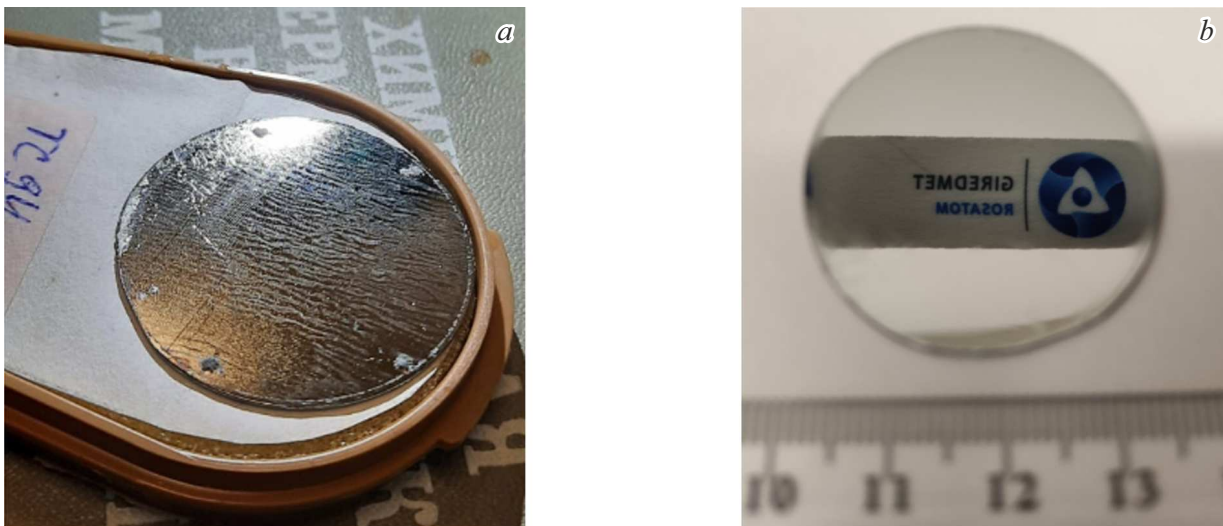


Рис. 7. Поверхность эпитаксиального слоя HgCdTe на подложке CdZnTe (211)В диаметром 37 mm, выращенного методом ЖФЭ: *a* — исходный внешний вид; *b* — внешний вид после обработки.

по различным точкам. В некоторых участках измерить спектры пропускания не удалось вследствие развитого рельефа поверхности. После двухстадийной обработки спектры пропускания уверенно измерены в пяти точках по всей поверхности образца, толщина эпитаксиального слоя составила 13.4–14.7 μm, что при общем удалении материала на уровне 8 μm свидетельствует о достаточно высокой прецизионности как предварительного механического полирования суспензией на основе субмикронных алмазов детонационного синтеза, так и химико-механического полирования с применением химического полирующего травителя. Результаты измерения шероховатости поверхности эпитаксиального слоя HgCdTe образца № 2 представлены на рис. 8.

Как видно на рис. 8, шероховатость поверхности эпитаксиального слоя HgCdTe образца № 2 после двухстадийной обработки составила $Ra = 0.63 \text{ nm}$ ($rms = 0.74 \text{ nm}$). Следует отметить, что разработанный подход позволяет устранить с поверхности эпитаксиального слоя даже весьма грубый микрорельеф, который характерен для выращивания HgCdTe методом ЖФЭ на подложках с кристаллографической ориентацией (211)В, представленный на рис. 7, *a*.

Для оценки возможных внесенных в ходе обработки искажений в эпитаксиальный слой HgCdTe было проведено измерение времени жизни неравновесных носителей заряда как одного из основных фотоэлектрических параметров структуры. Подтверждено, что время жизни неравновесных носителей заряда после произведенной

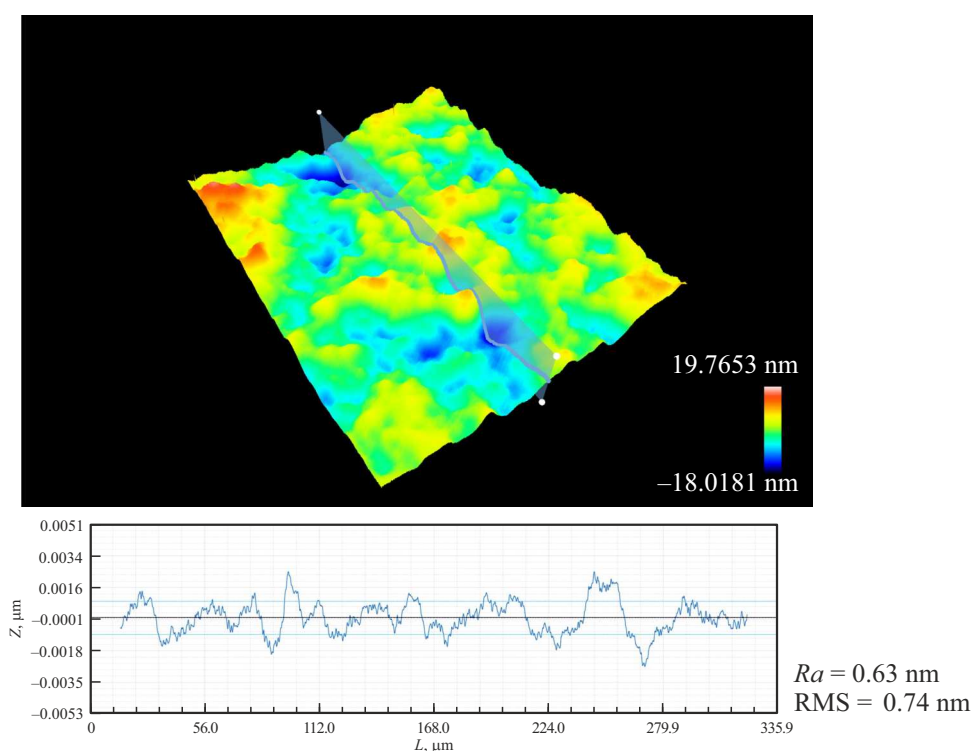


Рис. 8. Морфология и шероховатость поверхности эпитаксиального слоя HgCdTe, выращенного на подложке CdZnTe (211)В диаметром 37 mm методом ЖФЭ, после проведения двухстадийной обработки.

двухстадийной обработки не изменилось и сохранилось на уровне 40 ns.

Выводы

В ходе настоящих исследований проведена модификация имеющегося оборудования для возможности работы в условиях агрессивных химических полирующих травителей в ходе процессов химико-механического полирования и подтверждена высокая точность модифицированного узла.

Разработаны составы полировальных суспензий в комплексе с технологическими условиями процесса, обеспечивающими прецизионную изотропность обработки, для достижения высокого качества подготовки поверхности эпитаксиальных слоев HgCdTe, выращенных методом ЖФЭ.

Определены режимы обработки, позволяющие проводить удаление материала с высокой точностью как на этапе механического полирования суспензиями на основе субмикронных алмазов детонационного синтеза отечественного производства, так и на этапе химико-механического полирования с применением химического полирующего травителя на основе брома.

В результате проведенных поисковых исследовательских работ подтверждена возможность обработки эпитаксиальных слоев HgCdTe, выращенных методом ЖФЭ на изотипных подложках CdZnTe, с получением зеркаль-

но гладкой поверхности с субнаношероховатым рельефом $Ra \leq 1$ nm, высокосовершенной на наноуровне приповерхностной структурой, отклонением толщины эпитаксиального слоя по площади гетероструктуры после обработки менее $1.5 \mu\text{m}$, с отсутствием микроцарапин и привнесенных искажений в структуру эпитаксиального слоя HgCdTe [50].

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.Д. Бурлаков, К.О. Болтарь, С.А. Кузнецов, В.П. Пономаренко. *Матер. XXVI Междунар. научно-технической конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения* (НПО Орион, М., 2022), с. 475.
- [2] A. Rogalski. *Infrared Detectors* (USA, CRC Press, 2019), p. 898.
- [3] Ю.И. Белоусов, Е.С. Постников. *Инфракрасная фотоника. Ч. I. Особенности формирования и распространения ИК излучения*, учеб. пособие (Ун-т ИТМО, СПб., 2019), с. 82.
- [4] С.В. Михеев. *Основы инфракрасной техники* (Ун-т ИТМО, СПб., 2017), с. 127.
- [5] Н. Кульчицкий, А. Наумов, В. Старцев. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 6 (00197), 114 (2020). DOI: 10.22184/1992-4178.2020.197.6.114.121

- [6] Послание Президента РФ Федеральному Собранию (Москва, 2024) Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/73585>
- [7] Распоряжение Правительства РФ от 17.01.2020 № 20-р „Об утверждении Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 20230 года и плана мероприятий по реализации Стратегии“.
- [8] T.J. de Lyon, R.D. Rajavel, J.A. Roth, J.E. Jensen. In book: *Handbook of Infrared Detection Technologies* (Elsevier Science, 2002), Ch. 9, p. 309–352. eBook ISBN: 9780080507910
- [9] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, И.В. Сабинина. ФТП, **35** (9), 1092 (2001).
- [10] М.В. Якушев, Д.В. Брунев, В.С. Варавин, В.В. Васильев, С.А. Дворецкий, И.В. Марчишин, А.В. Предеин, И.В. Сабинина, Ю.Г. Сидоров, А.В. Сорочкин. ФТП, **45** (3), 396 (2011).
- [11] М.В. Якушев. *Гетерозпитаксия ZnTe, CdTe и твердых растворов CdHgTe на подложках GaAs и Si* (Докт. дисс. Новосибирск, 2011), с. 251.
- [12] В.М. Базовкин, В.С. Варавин, В.В. Васильев, А.В. Глухов, Д.В. Горшков, С.А. Дворецкий, А.П. Ковчавцев, Ю.С. Макаров, Д.В. Марин, И.В. Мжельский, В.Г. Половинкин, В.Г. Ремесник, И.В. Сабинина, Ю.Г. Сидоров, Г.Ю. Сидоров, А.С. Строганов, А.В. Царенко, М.В. Якушев, А.В. Латышев. Успехи прикладной физики, **6** (6), 501 (2018).
- [13] С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, В.С. Варавин, В.Г. Ремесник, М.Ф. Ступак, С.Н. Макаров, А.Г. Елесин, А.Г. Верхогляд. Тез. Докл. XXVI Междунар. научно-технической конф. по фотозлектронике и приборам ночного видения (АО „НПО „Орион“, М., 2022), с. 66–68.
- [14] P. Carper, J. Garland. *Mercury cadmium telluride: growth, properties and applications* (Wiley, UK, 2011), p. 54.
- [15] P. Mitra, S.L. Barnes, F.C. Case, M.B. Reine, P. O'Dette, R. Starr, A. Hairston, K. Kühler, M.H. Weiler, V.L. Musicant. J. Electron. Mater., **26** (6), 482 (1997).
- [16] А.В. Чилиясов, А.Н. Моисеев, Б.С. Степанов, К.Е. Савлинов, А.П. Котков, Н.Д. Гришнова. Успехи прикладной физики, **1** (2), 209 (2013).
- [17] А.П. Котков, Н.Д. Гришнова, А.Н. Моисеев. Неорганические материалы, **44** (12), 1446 (2008).
- [18] А.П. Котков, Н.Д. Гришнова, А.Н. Моисеев. *Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение*. (Тез. докл. XIII конф. Н. Новгород, 28–31 мая 2007 г., (изд. Ю.А. Николаев), с. 240–241.
- [19] А.В. Чилиясов, А.Н. Моисеев, В.С. Евстигнеев, М.В. Костюнин, А.А. Трофимов, И.А. Денисов. *Материалы XXVII Международной научно-технической конференции по фотозлектронике и приборам ночного видения*, (АО „НПО „Орион“, М., 2024), с. 345–346.
- [20] M. Reddy, J.M. Peterson, T. Vang, J.A. Franklin, M.F. Visela, K. Olsson, E.A. Patten, W.A. Radford, J.W. Bangs, L. Melkonian, E.P. Smith, D.D. Lofgreen, S.M. Johnson. J. Electron. Mater., **40** (8), 1706 (2011).
- [21] F. Sheng, C. Zhou, S. Sun, J. Yang. J. Electron. Mater., **43** (5), 1397 (2014).
- [22] С.А. Billman, L.A. Almeida, P. Smith, J.M. Arias, A. Chen, D. Lee, E.C. Piquette. J. Electron. Mater., **40** (8), 1693 (2011).
- [23] Е.И. Иванов, В.Л. Суханов, В.В. Тучкевич, Л.В. Лопатина, Н.М. Шмидт. Письма ЖТФ, **6** (14), 874 (1980).
- [24] O. Gravrand, G. Destefanis, S. Bisotto, N. Baier, J. Rothman, L. Mollard, D. Brellier, L. Rubaldo, A. Kerlain, V. Destefanis, M. Vuillemermet. J. Electron. Mater., **42** (11), 3349 (2013).
- [25] Mohd Qasim, P. Parthiban, Debangshu Narayan Das. ECS J. Solid State Sci. Technol., **8** (11), 719 (2019).
- [26] I. Madni. *Characterization of MBE-growth HgCdTe and related II-VI materials for next generation infrared detectors* (Thesis Doctor of Philosophy. The University of Western Australia, 2017), p. 270 (p. 122–124).
- [27] А.А. Трофимов, И.А. Денисов, Н.А. Смирнова, А.Д. Шабрин, А.Е. Гончаров, А.А. Новикова, М.О. Можеева, К.А. Гладышева, А.М. Косякова, В.А. Малыгин, С.А. Кузнецова, Д.В. Ильинов, А.С. Суханова. Успехи прикладной физики. **10** (3), 289 (2022). DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-3-289-300
- [28] А.А. Трофимов, И.А. Денисов, М.Б. Гришечкин, А.Н. Моисеев, А.В. Чилиясов, В.С. Евстигнеев, А.Е. Гончаров, К.А. Гладышева, А.С. Суханова, В.А. Малыгин, А.М. Косякова, Е.А. Климов. *ФОТОНИКА 2023: Тезисы докладов Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники (с участием иностранных ученых) (Новосибирск, 4–8 сентября 2023 г.)* (ИФП СО РАН, Изд-во „Перо“, М., 2023), с. 24.
- [29] А.А. Трофимов, И.А. Денисов, Ю.Б. Андрусов, М.Б. Гришечкин, Д.О. Царегородцев, В.Е. Антонова, К.А. Гладышева. *Тезисы докладов 3-ей Международной научно-практической конференции „Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства, применение“* (М., 2024), с. 221.
- [30] А.А. Трофимов, И.А. Денисов, Ю.Б. Андрусов, М.Б. Гришечкин, Д.О. Царегородцев, А.М. Косякова, В.Е. Антонова, К.А. Гладышева. *Материалы XXVII Международной научно-технической конференции по фотозлектронике и приборам ночного видения* (АО „НПО „Орион“, М., 2024), с. 201–203.
- [31] А.А. Trofimov, I.A. Denisov, M.B. Grishechkin, D.O. Tsaregorodtcev, A.E. Goncharov, K.A. Gladysheva, V.A. Malygin, A.M. Kosyakova. Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys., **88** (9), 1496 (2024). DOI: 10.1134/S106287382470775X
- [32] P. Moravec, P. Höschl, J. Franc, E. Belas, R. Fesh, R. Grill, P. Horodyský, P. Praus. J. Electron. Mater., **35** (6), 1206 (2006).
- [33] O. Lauten. *Master of Science in Physics and Mathematics* (Norwegian University of Science and Technology, 2017).
- [34] S. Kakkireni. *Master of Science in Mechanical Engineering* (Washington State University, 2017).
- [35] М.Б. Гришечкин, И.А. Денисов, А.А. Силина, Н.А. Смирнова, Н.И. Шматов. Прикладная физика, **5**, 72 (2014).
- [36] М.В. Grisechkin, I.A. Denisov, A.A. Silina, N.I. Shmatov. Non-Ferrous Metals, **2**, 23 (2016).
- [37] В.Н. Абрютин, Е.В. Давыдова. *Сборник тезисов 3-ей Международной научно-практической конференции „Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение“ (РЕДМЕТ 2024)* (АО „Гиредмет“ им. Н.П. Сажина, М., 2024), с. 334–335.
- [38] И.А. Денисов. *Разработка технологии выращивания эпитаксиальных слоев кадмий-ртуть-теллур методом жидкофазной эпитаксии* (Автореф. канд. дисс., Гиредмет, М., 2007), с. 26

- [39] Н.А. Смирнова. *Разработка технологии изготовления подложек CdZnTe для выращивания гетероструктур CdHgTe/CdZnTe методом жидкофазной эпитаксии* (Автореф. канд. дисс., Гиредмет, М., 2007), с. 145
- [40] Ю.Б. Андрусов, А.Г. Белов, А.А. Коновалов, Н.А. Смирнова. Цветные металлы, **12**, 56 (2016).
- [41] R. Manchanda, R. Nokhwal, V. Sharma, H.C. Sharma, B.L. Sharma, S. Sitharaman. *Crystal*. **21** (1), 33 (2016).
- [42] R. Naakenaasen, O. Lauten, E. Selvig, K.O. Kongshaug, E.J. Røer, R.W. Hansen. *J. Electron. Mater.*, **48** (10), 6124 (2019).
- [43] Ph. Tribolet. *Тезисы докладов 19-ой Международной конференции по фотоэлектронике и системам ночного видения* (М., 2006), с. 10.
- [44] Ф. Триболе, Ж. Дестефанис. *Прикладная физика*, **2**, 54 (2007).
- [45] R. Nokhwal, V. Srivastav, B.L. Sharma, S.A. Hashmi, R.K. Sharma. *J. Electron. Mater.*, **46** (12), 6795 (2017). DOI: 10.1007/s11664-017-5764-6
- [46] Е.В. Мирофянченко, А.Е. Мирофянченко, В.С. Попов. *Прикладная физика*, **2**, 46 (2020).
- [47] А.А. Трофимов, О.А. Ухабин, А.С. Смирнов, С.А. Курепин, И.А. Денисов, А.Д. Шабрин, А.Е. Гончаров, А.А. Новикова, М.О. Можаяева, К.А. Гладышева, А.М. Косякова, В.А. Малыгин, С.А. Кузнецова, Д.В. Ильинов, А.С. Суханова, В.А. Улькаров, И.Д. Размахнин. *Успехи прикладной физики*, **10** (5), 459 (2022).
- [48] В.А. Козлов, С.Е. Беликов. *Отчет АО „Производственный комплекс „ФИД-Техника“* (С-Пб., 2024), с. 4.
- [49] А.А. Трофимов, И.А. Денисов, Н.А. Смирнова, А.Д. Шабрин, А.Е. Гончаров, А.А. Новикова, М.О. Можаяева, К.А. Гладышева, А.М. Косякова, В.А. Малыгин, С.А. Кузнецова, Д.В. Ильинов, А.С. Суханова. *Успехи прикладной физики*, **10** (3), 289 (2022). DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-3-289-300
- [50] А.А. Трофимов, И.А. Денисов, Ю.Б. Андрусов, М.Б. Гришечкин, Д.О. Царегородцев, А.М. Косякова, С.А. Курепин, А.С. Смирнов, В.Ю. Долматов, М.Ю. Андреева. *Сборник тезисов докладов Международной конференции „Нанюглерод и Алмаз“ (НИА-2024)* (Медиапапир, СПб., 2024), с. P5-4-45.