

УДК 621.315.592

PACS: 81.65.Cf, 81.40.Pq.

## Особенности подготовки подложек кадмий-цинк-теллур для выращивания эпитаксиальных слоев соединения кадмий-ртуть-теллур методом молекулярно-лучевой эпитаксии

А. А. Трофимов, И. А. Денисов, Н. А. Смирнова, А. Д. Шабрин, А. Е. Гончаров, А. А. Новикова, М. О. Можяева, К. А. Гладышева, А. М. Косякова, В. А. Малыгин, С. А. Кузнецова, Д. В. Ильинов, А. С. Суханова

*Твердый раствор кадмий-ртуть-теллур является в мире одним из основных материалов ИК-фотоэлектроники. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии обладает рядом преимуществ перед другими методами получения соединения кадмий-ртуть-теллур. Вместе с тем он достаточно требователен к подготовке подложек, предназначенных для ростовых процессов. Настоящая работа посвящена первичной отработке процессов полирования в освоении производства подложек кадмий-ртуть-теллур ориентации (211). Достигнутая шероховатость составила  $\approx 1$  нм.*

*Ключевые слова:* кадмий-цинк-теллур, шлифование и полирование, шероховатость поверхности, молекулярно-лучевая эпитаксия.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-3-289-300

### Введение

Ключевым элементом всех оптико-электронных систем являются фотоприемные устройства (ФПУ), которые регистрируют световые потоки различных диапазонов длин волн и преобразовывают их в электрические сигналы. В последние годы темпы развития тепловизионной техники и смена поколений матричных фотоприемных устройств (МФПУ) на все спектральные диапазоны оптического излучения, в первую очередь инфракрасного (ИК), заметно ускорились [1]. Основой МФПУ являются полупроводниковые фоточувстви-

тельные материалы, роль которых в достижении их конечных характеристик все более возрастает.

В последнее время круг этих исходных материалов для инфракрасной фотоэлектроники обозначился достаточно ясно. Доминирующими для охлаждаемых МФПУ остаются кадмий-ртуть-теллур (HgCdTe, КРТ) на спектральные диапазоны 1–2,5 мкм; 3–5 мкм; 8–14 мкм и антимонид индия (InSb) на диапазон 3–5 мкм (рис. 1). Значительное расширение областей применения МФПУ коротковолнового ИК диапазона спектра (0,9–1,7 мкм) привело к развитию тройного соединения индий-

Трофимов Александр Александрович<sup>1</sup>, зам. нач. производства.

E-mail: aa-trofimov@yandex.ru

Денисов Игорь Андреевич<sup>2</sup>, зав. лаб.

Смирнова Наталья Анатольевна<sup>2</sup>, в.н.с.

Шабрин Алексей Дмитриевич<sup>1</sup>, нач. участка.

Гончаров Андрей Евгеньевич<sup>1</sup>, инженер 1-й кат.

Новикова Анастасия Андреевна<sup>1</sup>, инженер-химик.

Можяева Мария Олеговна<sup>1</sup>, инженер 2-й кат.

Гладышева Кристина Анатольевна<sup>1</sup>, инженер.

Косякова Анастасия Михайловна<sup>1,3</sup>, инженер.

Малыгин Владислав Анатольевич<sup>1</sup>, инженер.

Кузнецова Светлана Александровна<sup>1</sup>, инженер 2-й кат.

Ильинов Денис Владимирович<sup>1</sup>, инженер 2-й кат.

Суханова Анна Сергеевна<sup>1</sup>, инженер.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

<sup>2</sup> АО «Гиредмет».

Россия, 119017, Москва, Б. Толмачевский пер., 5, стр. 1.

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 09 июня 2022 г.

© Трофимов А. А., Денисов И. А., Смирнова Н. А., Шабрин А. Д., Гончаров А. Е., Новикова А. А., Можяева М. О., Гладышева К. А., Косякова А. М., Малыгин В. А., Кузнецова С. А., Ильинов Д. В., Суханова А. С., 2022

галлий-мышьяк (InGaAs), появлению охлаждаемых МФПУ на основе сверхрешеток (InAs/GaSb Type II SL) и квантовых ям (QW, QD) [2, 3].

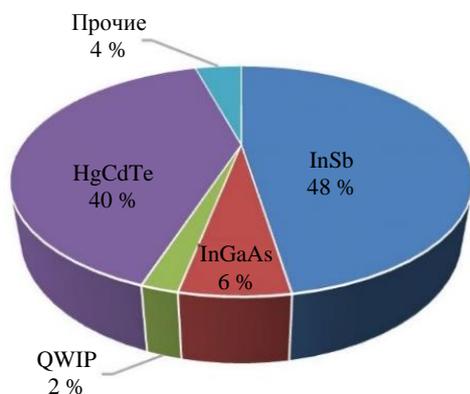


Рис. 1. Доли различных материалов в продажах ИК-систем

ИК-детектор на основе КРТ – один из наиболее часто используемых детекторов на международном рынке. Он имеет высокую квантовую эффективность, высокий световой отклик и высокую скорость отклика, а также, меняя состав  $x$  твердого раствора  $Cd_xHg_{1-x}Te$  в пределах 0,2–0,5, можно получить материал, пригодный для детектирования ИК-излучения во всех трех «окнах» прозрачности земной атмосферы – 1,5–2,5; 3–5 и 8–14 мкм и таким образом полностью покрывать короткие, средние и длинные волны.

Несмотря на изобилие новых идей и методов регистрации ИК-излучения в диапазоне 8–14 и 3–5 мкм (квантовые ямы, сверхрешетки на основе широкозонных полупроводников и другие структуры), приборы на основе КРТ (вместе с фотоприемниками на основе InSb) вероятнее всего будут доминировать в оптико-электронном приборостроении [1].

Технология получения КРТ носит сложный многоступенчатый характер. Для выращивания слоев КРТ большой площади и, соответственно, для создания матричных фотоприемников наиболее часто используются эпитаксиальные методы, основные из которых – жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ) и молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) [4].

Эпитаксиальные слои КРТ на подложках большого диаметра необходимы для создания матричных ИК ФПУ с большим числом элементов для повышения производительности

производства и снижения стоимости изделий. В соответствии с этим к эпитаксиальным технологиям получения такого материала КРТ предъявляются жесткие требования – высокое структурное совершенство и однородность фотоэлектрических свойств по площади. Успехом эпитаксиальных методов являются как прогресс в увеличении размеров и структурного совершенства подложек соединения кадмий-цинк-теллур (CdZnTe, КЦТ), согласованных по параметру решетки с выращиваемой пленкой КРТ, так и возможность выращивания гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) на альтернативных подложках (буферные слои из CdTe и CdZnTe на подложках из GaAs, Si и других) [5].

В настоящее время в России наиболее отработанным методом промышленного получения эпитаксиальных слоев (ЭС) КРТ остается ЖФЭ. В АО «Гиредмет» для выращивания ЭС КРТ был выбран метод ЖФЭ на подложке КЦТ, который в настоящее время является основным промышленным методом изготовления эпитаксиальных слоев в ведущих мировых фирмах, производящих многоэлементные и матричные фотодиоды [6].

Основные преимущества этого метода: относительно низкая стоимость и высокая производительность оборудования, автоматическая доочистка поверхности на начальном этапе роста, дополнительная очистка от примесей в процессе роста и однородность состава по площади.

Молекулярно-лучевая эпитаксия имеет преимущество перед другими эпитаксиальными методами выращивания слоев КРТ благодаря в первую очередь низким температурам роста ( $\sim 180^\circ\text{C}$ ), что предотвращает диффузию примесей из подложки и снижает фоновое легирование примесями. Метод МЛЭ дает возможность получения многослойных объектов, что в свою очередь позволяет создавать ГЭС КРТ для многоцветных ИК ФП. При помощи метода МЛЭ получают структуры с эпитаксиальными слоями точно до единиц ангстрем ( $10^{-10}$  м) с заданным химическим составом и концентрацией примесей в пределах долей процента мольного состава, а также с хорошей морфологией и плоскостностью поверхности, максимально пригодной для дальнейших технологических операций. Кроме

того, другими преимуществами этого метода являются возможность создания  $p$ - $n$ -переходов непосредственно в процессе роста.

Однако, подложки большой площади из КЦТ остаются дорогим изделием с плохо воспроизводимыми характеристиками. В связи с этим повсеместно разрабатываются технологии создания ГЭС КРТ на альтернативных подложках, таких как Si, GaAs, Ge. Технология МЛЭ ЭС КРТ в России реализована на подложках GaAs и Si в ИФП СО РАН. Использование альтернативных подложек позволяет резко снизить стоимость эпитаксиального материала КРТ, особенно при массовом производстве ИК ФП [5].

Однако, большое различие параметров кристаллических решеток, химическая и структурная несогласованность КРТ на Si делает задачу разработки и изготовления МФПУ на основе структур КРТ/Si, с подходящими параметрами, чрезвычайно сложной. При гетероэпитаксии КРТ методом МЛЭ на альтернативных подложках возникает необходимость решения сложных физических и технических проблем.

Физические проблемы при гетероэпитаксии КРТ на подложках из GaAs и Si обусловлены большими различиями в параметрах решеток сопрягаемых материалов, различной природой химической связи, низкой скоростью диссоциации и реиспарения молекул двухатомного теллура. Это приводит к ухудшению структурного совершенства и увеличению плотности дислокаций в ГЭС КРТ примерно на один-два порядка по сравнению с объемными кристаллами. Интенсивное образование дефектов, приводящее к большой плотности микродвойников и V-дефектов, может значительно ухудшить электрофизические свойства слоев КРТ и ИК ФП на их основе.

Высокое качество ЭС КРТ на подложках КЦТ и низкая плотность ростовых дефектов достигается за счет возможности согласования кристаллических решеток подложки и выращенного слоя КРТ. Это позволяет обеспечить однородность фотоэлектрических характеристик по площади матрицы (менее 0,5 % дефектных элементов). В настоящее время наиболее качественные эпитаксиальные слои получены на подложках КЦТ с концентрацией ZnTe 3,9–4,5 %, обеспечивающей номинальное совпадение кристаллических решеток [7],

что позволяет выращивать эпитаксиальные слои с параметрами, соответствующими качеству объемных кристаллов [8].

Морфология поверхности выращенных эпитаксиальных слоев КРТ определяется, помимо ростовых условий, в том числе и подготовкой поверхности подложки КЦТ. Для получения хорошего изображения прибором на КРТ ключевыми факторами являются:

- качество кристаллической структуры;
- доля цинка в составе твердого раствора КЦТ;
- плоскостность и рельеф поверхности;
- минимальной высоты шероховатость;
- чистота поверхности.

Помимо проблем, связанных с ростом монокристаллических заготовок больших размеров (блочность, дислокации и прочие структурные несовершенства), сложность обработки КЦТ заключается в высокой хрупкости материала. Так, отбраковка на этапе обработки может превышать 70 %, что с учетом высокой стоимости замедляет внедрение материала в практические приложения [9]. Получение минимальной высоты шероховатости представляет собой трудную научно-техническую задачу ввиду малой твердости этого материала (по шкале Мооса 3,5 балла). Достижение среднеквадратичной высоты шероховатости менее 1 нм при линейных размерах обрабатываемых пластин на уровне нескольких сантиметров соответствует результатам мирового уровня [10].

В АО «НПО «Орион» в настоящее время ведутся работы по разработке технологии и освоению производства подложек соединения кадмий-цинк-теллур, предназначенных для выращивания ЭС КРТ методом МЛЭ.

### Методики и результаты исследования

В настоящей работе первичная отработка процессов полирования в освоении производства подложек соединения кадмий-цинк-теллур проводилась на пластинах КЦТ диаметром 50,8 мм, ориентированных в направлениях (111) и (211) и изготовленных из слитков, выращенных методом Бриджмена в АО «Гиредмет», а также на фрагментах таких пластин [11–13]. В целом структурные свойства подложек КЦТ, используемые в данной рабо-

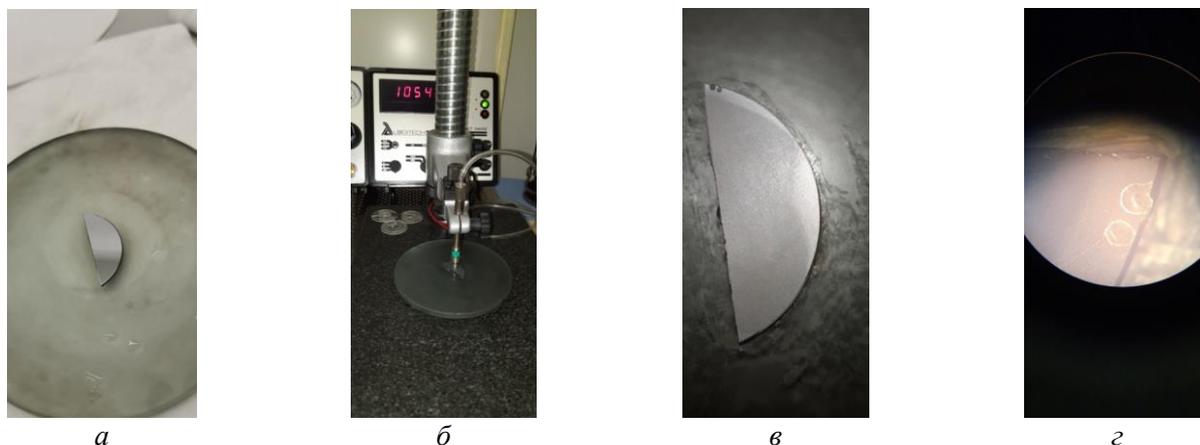
те, соответствовали таковым в работе [14]. В ходе обработки фрагментов пластин КЦТ определены режимы шлифования, требуемая нагрузка на пластину в пересчете на единицу площади поверхности, обеспечивающие одновременно как отсутствие механических повреждений и/или разрушения пластины, так и оптимальное соотношение производительности-качества, с целью избежать перерасхода абразивной суспензии и чрезмерного износа оснастки. После отработки процесса шлифования проводилась серия процессов механического полирования с применением различных полировальных суспензий.

Обрабатывались пластины КЦТ диаметром 50,8 мм кристаллографической ориентации (111) (тестовые) и кристаллографической ориентации (211) (опытные). Использовалась установка РМ5 с применением стандартной оснастки: джиг РР6 и стеклянный диск-носитель диаметром 112 мм. Профиль поверхности шлифовальной плиты задан выпуклой линзой (+3 мкм для малых фрагментов и +9 мкм для пластин диаметром 50,8 мм) с целью компенсации разницы съема материала в центральной части образца и по краям, обусловленной разницей угловых скоростей в ходе шлифования при вращении оснастки, в которой вакуумированием закреплен диск-носитель с наклеенным образцом. Фрагмент КЦТ кристаллографической ориентации (111) приклеенный на стеклянный диск-носитель, а также процесс межоперационного контроля толщины после операции шлифования показан на рис. 2.

В ходе обработки образцы подвергались одностороннему шлифованию свободным абразивом на стеклянной шлифовальной плите с использованием абразивной суспензии на основе мелкодисперсного  $Al_2O_3$  с зерном абразива 3 мкм, разведенного в деионизованной воде. Шлифование – необходимая операция, предназначенная для удаления нарушенного слоя образцов (около 40–50 мкм) после резки слитка на пластины и первичной постобработки, которая, как правило, производится более крупнозернистыми абразивами.

После шлифования проводились процессы полирования образцов различными типами суспензий. На рис. 3 показан фрагмент КЦТ кристаллографической ориентации (111) после операции полирования, а также результаты оценки шероховатости поверхности на различной базовой длине.

Шероховатость образцов в ходе отработки режимов и исследования различных типов полировальных суспензий предварительно оценивалась на контактном профилометре DektakXT и окончательно измерялась на атомно-силовом микроскопе Ntegra Maximus (Россия). Плоскостность оценивалась на бесконтактном измерителе толщины NCG-2. Оценка с помощью контактного профилометра шероховатости поверхности  $R_a$  представленного фрагмента после полирования суспензией Chemlox на основе гипохлорита натрия и субмикронного  $Al_2O_3$  на длине 1 мм составила 4,2 нм, оценка на длине 100 мкм – 4,0 нм.



**Рис. 2.** Фрагмент КЦТ ориентации (111) на диске-носителе (а); измерение толщины фрагмента (б); фрагмент после операции шлифования (в); визуальная оценка состояния поверхности при помощи инструментального микроскопа (г)

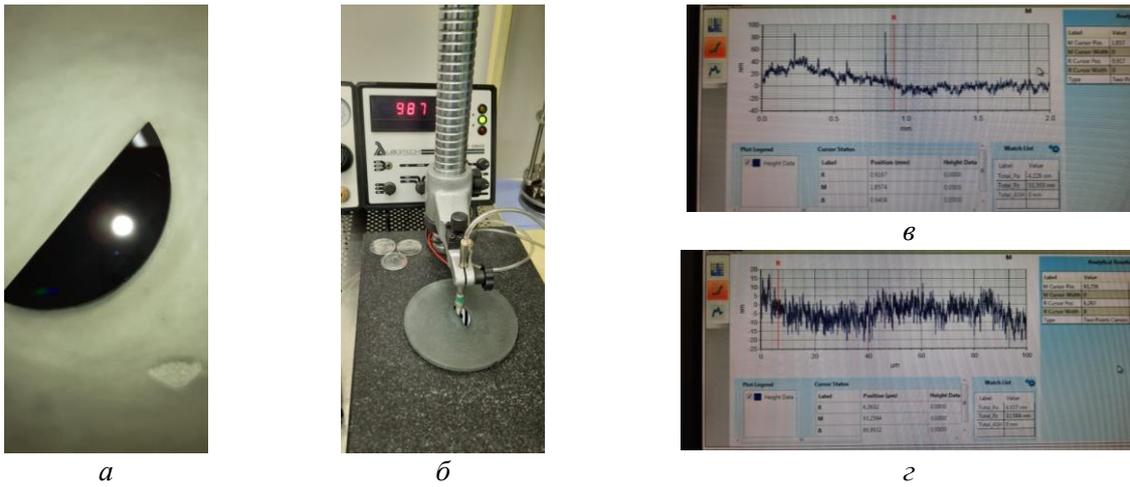


Рис. 3. Фрагмент КЦТ ориентации (111) после полирования (а); измерение толщины фрагмента бесконтактным методом (б); оценка шероховатости поверхности на длине 1 мм (в); и на длине 100 мкм (г)

После отклеивания фрагмента с диска-носителя и его предварительной отмывки проведенные исследования шероховатости поверхности при помощи атомно-силового микроскопа представлены на рис. 4 и 5.

Приведенные иллюстрации дают наглядное представление о характере поверхности фрагмента КЦТ после механического полирования. Присутствуют множественные хаотичные царапины глубиной до 4 нм, что согласуется с оценкой шероховатости, проведенной на контактном профилометре.

Ряд последующих экспериментов, выполненный на аналогичных фрагментах КЦТ (рис. 6) с применением различных полировальных суспензий, таких как: субмикронный  $Al_2O_3$  0,05 мкм с деионизованной водой, гипохлорит натрия, алмаз монокристаллический синтетический 0,3/0 с этиленгликолем – привел к подобным результатам (рис. 7). Существенный вклад в величину измеренной шероховатости вносят глубокие царапины, которые своим присутствием искажают общую картину. Как видно на рис. 7 при исключении из рассмотрения глубоких царапин шероховатость  $R_a$  не превышает 2 нм.

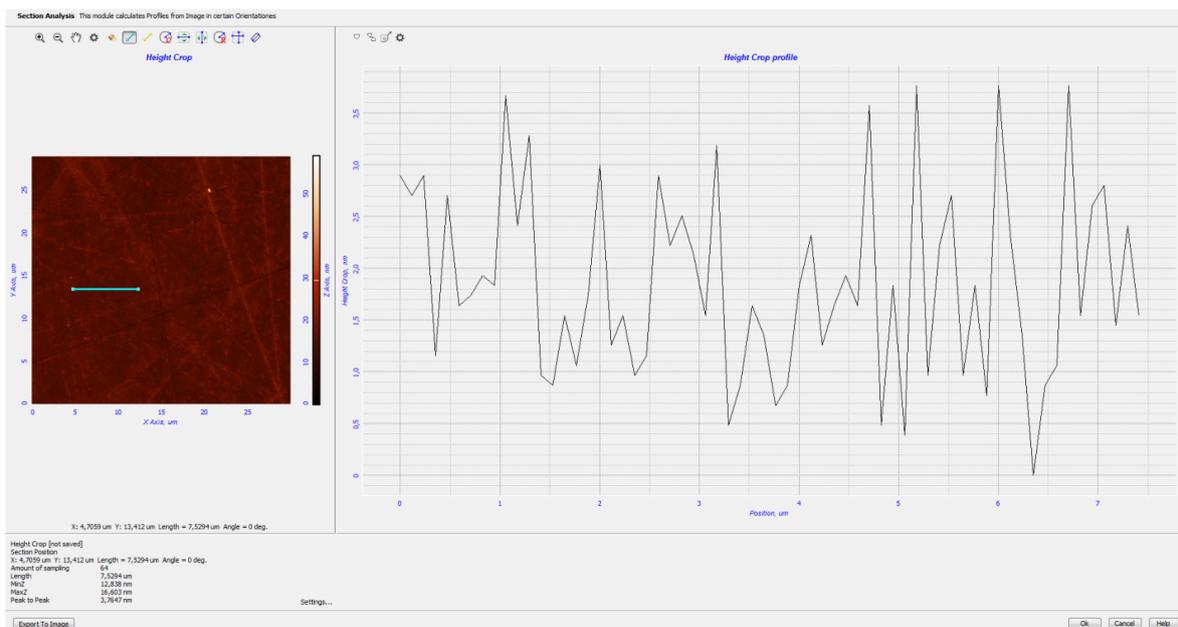


Рис. 4. Исследование шероховатости поверхности фрагмента КЦТ ориентации (111) при помощи атомно-силового микроскопа на длине 7,5 мкм. Разница по пикам между максимумом и минимумом составила 3,7 нм

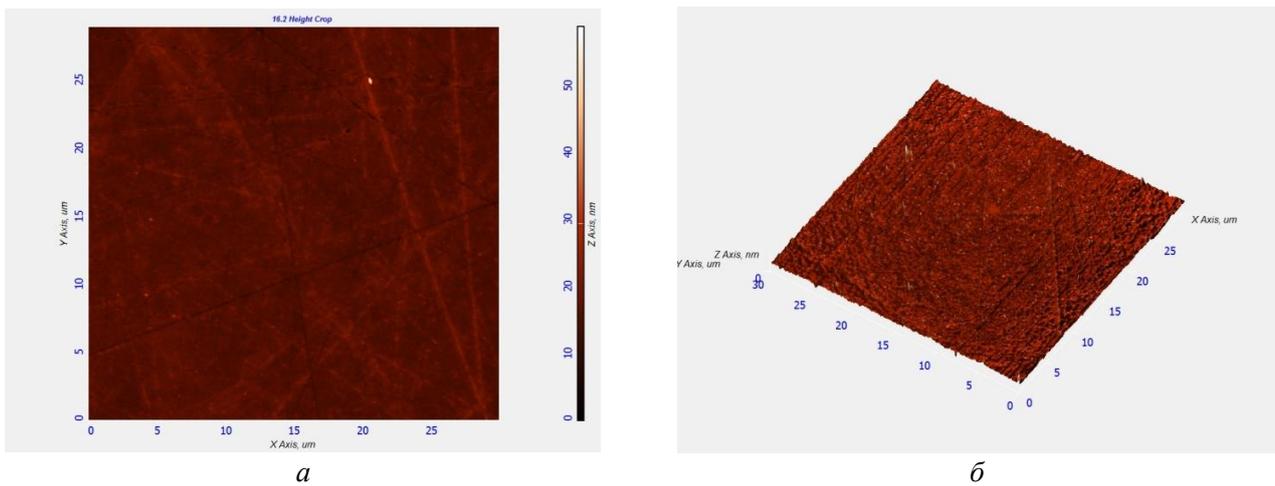


Рис. 5. Исследование шероховатости поверхности фрагмента КЦТ ориентации (111) при помощи атомно-силового микроскопа в двумерном (а) и трехмерном представлении (б)



Рис. 6. Фрагменты КЦТ ориентации (111) после операций шлифования и полирования различными полировальными суспензиями. После шлифования (а), после полирования (б, в)

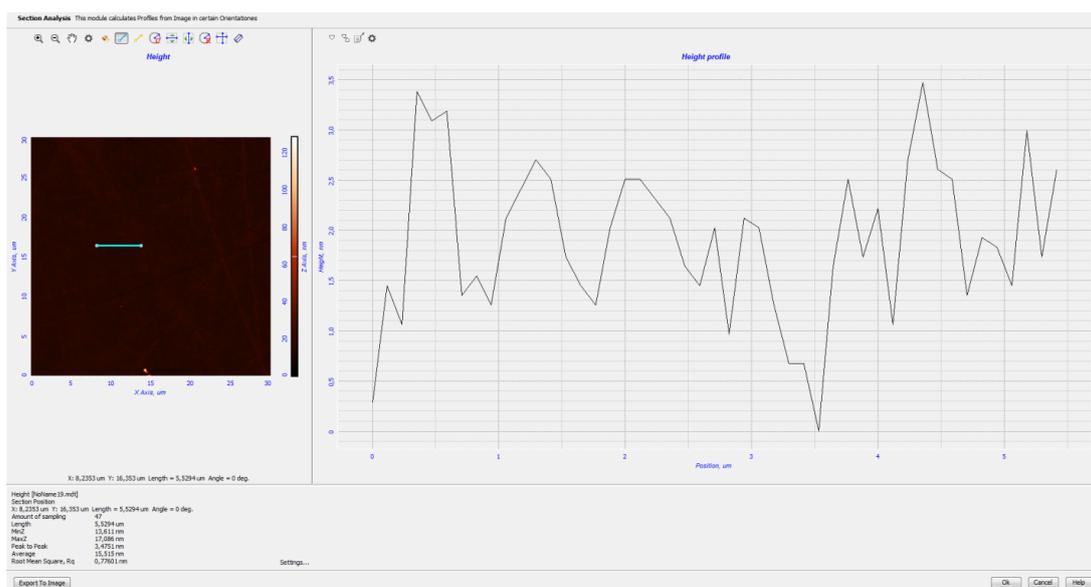


Рис. 7. Исследование шероховатости поверхности фрагмента КЦТ ориентации (111) при помощи атомно-силового микроскопа на длине 5,5 мкм. Разница по пикам между максимумом и минимумом составила 3,4 нм

В рамках настоящей работы также произведена обработка двух тестовых пластин КЦТ диаметром 50,8 мм кристаллографической ориентации (111) и одной опытной пластины КЦТ диаметром 50,8 мм кристаллографической

ориентации (211), представленных на рис. 8. Результаты межоперационного контроля толщины опытной пластины КЦТ бесконтактным измерителем приведены в таблице.

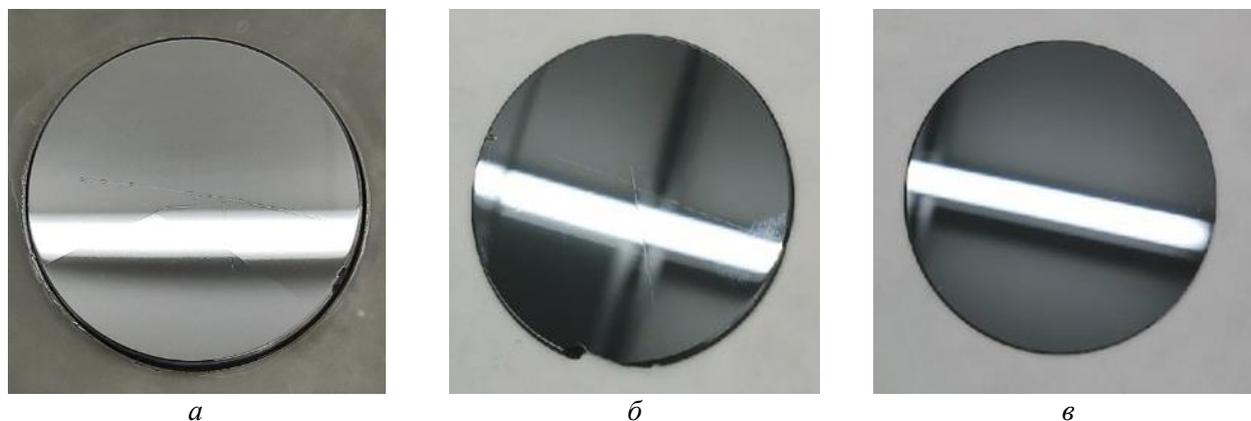


Рис. 8. Тестовые пластины КЦТ диаметром 50,8 мм кристаллографической ориентации (111) (а, б) и опытная пластина КЦТ диаметром 50,8 мм кристаллографической ориентации (211) (в) после полирования

Таблица

Результаты измерений толщины опытной пластины КЦТ ориентации (211) (мкм)

Точка измерений Этап	Точка измерений					Расположение точек измерения на пластине
	А	В	С	Д	Е	
Приклеивание	1113	1114	1111	1112	1114	
Шлифование 1	1097	1097	1097	1097	1098	
Шлифование 2	1078	1078	1078	1078	1079	
Полирование	1070	1070	1070	1070	1071	

Режимы обработки опытной и тестовых пластин, выбранные после отработки на фрагментах, идентичны, а именно:

- шлифование – нагрузка 37 гр/см<sup>2</sup>, суспензия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + DI water, скорость вращения шлифовальной плиты 20 об/мин, профиль шлифовальной плиты выпуклая линза +9 мкм, размах «лапы»-держателя оснастки отсутствует, время обработки 5 мин;

- полирование – нагрузка 37 гр/см<sup>2</sup>, суспензия Chemlox, скорость вращения полировальной плиты 30 об/мин, материал шлифовального покрытия Alupol, размах «лапы»-держателя оснастки полный, время обработки 5 мин + 1 мин DI water.

Видно, что обе тестовые пластины КЦТ диаметром 50,8 мм кристаллографической

ориентации (111) имеют дефекты кристаллической структуры, которые не видны на шлифованной пластине, но отчетливо проявились после полирования. Опытная пластина КЦТ диаметром 50,8 мм кристаллографической ориентации (211) визуально подобных дефектов не содержит.

Для подтверждения визуальной картины были проведены исследования одной тестовой пластины КЦТ ориентации (111) и опытной пластины ориентации (211) на рентгеновском дифрактометре высокого разрешения D8 Discover. Схема дифрактометра может комплектоваться различными элементами, для данных исследований был использован прибор, состоящий из источника рентгеновского излучения (рентгеновская трубка с длиной

волны  $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$ ), первичной оптики (зеркало Гёбеля, переменный поглотитель, 4-х кристалльный монохроматор), предметного столика с образцом, вторичной оптики (изменяемая щель или кристалл-анализатор) и детектора излучения (сцинтилляционный счетчик).

На тестовой пластине КЦТ диаметром 50,8-мм после полирования появились дефекты – предположительно малоугловые границы. Для определения кристаллографической ориентации была записана кривая качания в центре образца (см. рис. 9), угловое положение максимума кривой соответствует кристаллографической ориентации (111).

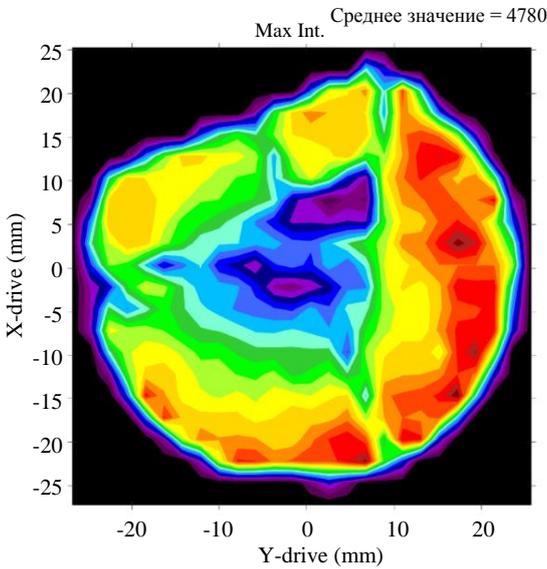


Рис. 9. Карта распределения максимумов интенсивности кривых качания (111) по поверхности тестовой пластины КЦТ

На рис. 9 видны низкие значения максимумов отражений (значение максимума интенсивности экспериментальной кривой качания может доходить до 30000 импульсов в секунду (имп/с) для данного материала при такой схеме эксперимента, что подтверждалось на других образцах) и неравномерное распределение значений максимумов интенсивности по площади поверхности тестовой пластины. На границах разориентированных областей максимумы интенсивности имеют меньшие значения. В верхней части тестовой пластины видна граница, проходящая по прямой линии. По всей видимости, она является границей двойника, ориентация которого сильно отличается от остального кристалла.

Значения FWHM (см. рис. 10) (FWHM – полная ширина на половине высоты) лежат в широком диапазоне, однако на большей части площади поверхности кривые имеют значения, соответствующие характерным значениям для данного материала в такой схеме измерений, полученным экспериментально на других образцах (0,0040–0,0060°).

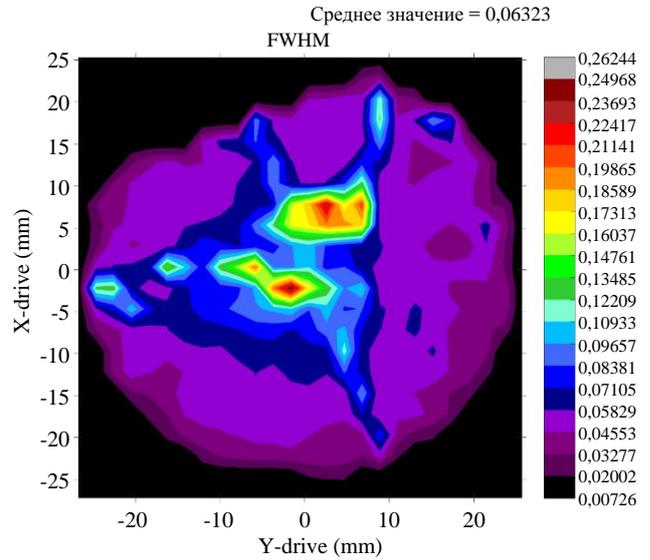


Рис. 10. Карта распределения FWHM кривых качания (111) по поверхности тестовой пластины КЦТ

Высокие значения FWHM вдоль границ разориентированных областей говорят о наличии нескольких пиков на экспериментальной кривой качания. На рис. 11 видно очень широкий диапазон угловых положений максимумов кривых: от 11,7432° до 12,0067°.

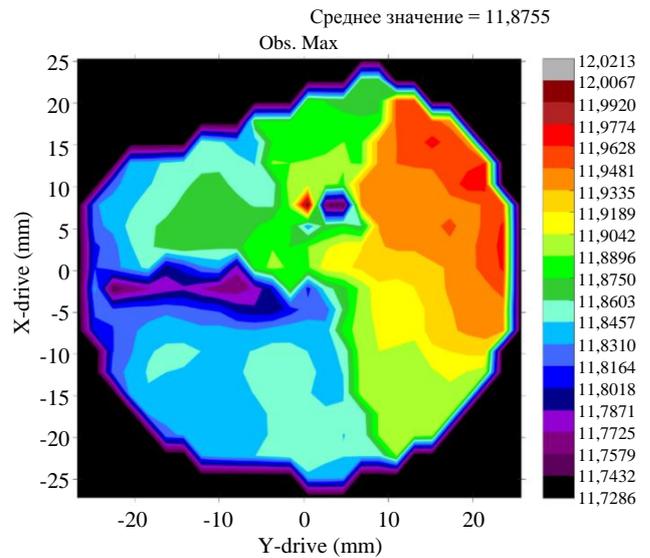


Рис. 11. Карта распределения угловых положений максимумов кривых качания (111) по поверхности тестовой пластины

Такой диапазон шире характерных значений для данного материала в такой схеме измерений, полученных экспериментально на других образцах (менее  $0,1^\circ$  по площади поверхности).

Для сравнения были исследованы аналогичные параметры опытной пластины КЦТ ориентации (211). Для определения кристаллографической ориентации была записана кривая качания в центре опытной пластины (рис. 12), угловое положение углового положения максимума кривой соответствует кристаллографической ориентации (211). Видны низкие значения максимумов отражений, но относительно равномерное распределение значений максимумов интенсивности по площади поверхности образца. Значения FWHM (см. рис. 13) несколько увеличены по сравнению с характерными значениями для данного материала в такой схеме измерений, полученными экспериментально на других образцах ( $0,0040-0,0060^\circ$ ). Большинство кривых имеет сильное уширение (это может говорить о низком уровне кристаллического совершенства или наличии нарушенного слоя).

В нижней части присутствует область с большими значениями FWHM, на части кривых можно увидеть несколько пиков, которые не полностью разделены из-за уширения.

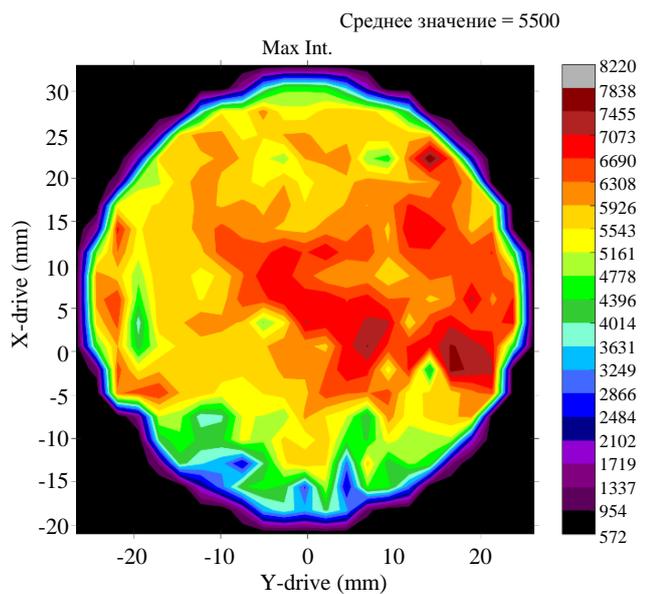


Рис. 12. Карта распределения максимумов интенсивности кривых качания (422) по поверхности опытной пластины

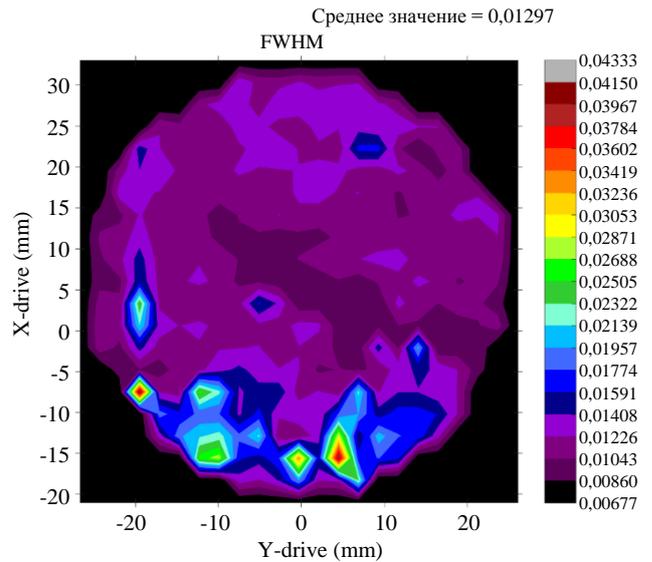


Рис. 13. Карта распределения FWHM кривых качания (422) по поверхности опытной пластины

На рис. 14 видно неширокий диапазон угловых положений максимумов кривых: от  $35,7422^\circ$  до  $35,8489^\circ$ . Такой диапазон близок к характерным значениям для данного материала в такой схеме измерений, полученным экспериментально на других образцах (менее  $0,1^\circ$  по площади поверхности образца).

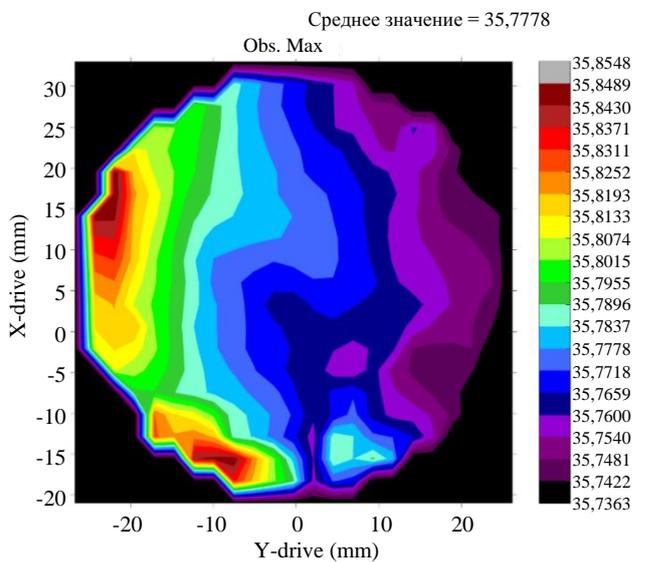


Рис. 14. Карта распределения угловых положений максимумов кривых качания (422) по поверхности опытной пластины

В рамках проводимых работ также было произведено химико-механическое полирование с применением полирующего травителя на основе брома-бромистоводородной кислоты. Обработка производилась вручную в специальной оснастке, изготовленной из фторопла-

ста. Состав полирующего травителя Вг : НВг : этиленгликоль в соотношении 0,025 : 1,0 : 1,45.

Фотографии поверхности образца КЦТ после химико-механического полирования

представлены на рис. 15. Исследование шероховатости поверхности после применения химико-механического полирования с полирующим травителем представлено на рис. 16.

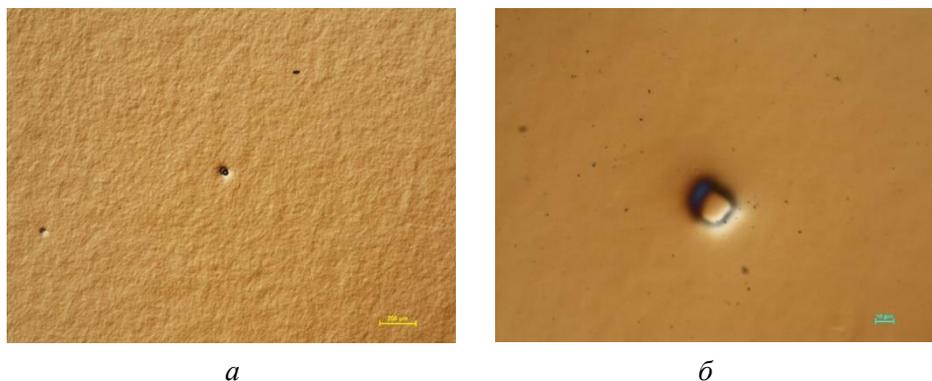


Рис. 15. Исследование морфологии поверхности образца КЦТ ориентации (111) при помощи микроскопа Nikon: общий вид (а) и крупный план дефекта (б)

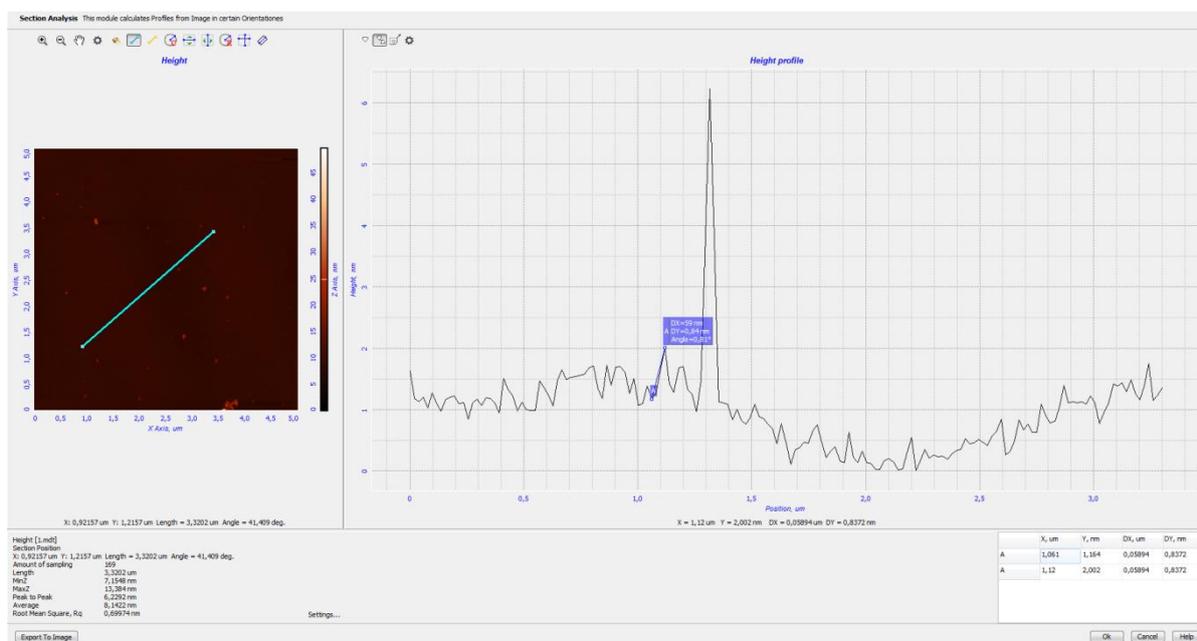


Рис. 16. Исследование шероховатости поверхности образца КЦТ ориентации (111) при помощи атомно-силового микроскопа на длине 3,2 мкм. Разница по пикам между максимумом и минимумом составила 0,84 нм

## Выводы

Проведена серия процессов полирования на фрагментах и подложках КЦТ ориентации (111) и (211). При механическом полировании достигнутая шероховатость  $R_a$  находится в пределах 2–3 нм. При химико-механическом полировании с применением полирующего травителя на основе Вг:НВг шероховатость поверхности  $R_a \leq 1$  нм.

Вместе с тем в ходе проведения экспериментов установлено, что царапины на поверх-

ности фрагментов и пластин, возникающие при механическом полировании, обусловлены в том числе малой твердостью материала КЦТ. Кроме того, фрагменты и пластины КЦТ ориентации (111) не обладают структурным совершенством и предназначены для проведения тренировочных процессов. Операция полирования выявляет блочность, границы двойников и прочие дефекты кристаллической структуры, которые в том числе вносят искажения при измерении шероховатости поверхности и не позволяют сделать однозначное

заклучение об эффективности выбранных режимов полирования и/или типов полировальных суспензий/покрытий. Отсутствие обработки механическим способом краев фрагментов КЦТ может являться причиной скалывания материала, что влечет за собой повышенные риски образования глубоких царапин на поверхности в ходе шлифования/полирования.

Для окончательного выбора полировальной суспензии, обеспечивающей наилучшее качество поверхности после механического полирования при одновременных приемлемых экономических показателях применения на текущий момент недостаточно данных. Требуется проведение дополнительных исследований в том числе с применением новых типов полировальных суспензий, к примеру, на основе ультрадисперсных наноалмазов, полученных методом детонационного синтеза.

Отмывка образцов после проведения процессов не до конца отработана и требует дополнительных исследований. Остаточные загрязнения поверхности подложек КЦТ вносят искажения при измерениях шероховатости методом атомно-силовой микроскопии, а также совершенно неприемлемы при последующем выращивании эпитаксиальных структур методом МЛЭ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. Infrared Detectors. – USA, CRC Press, 2019.
2. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Кузнецов С. А., Пономаренко В. П. / Мат. XXVI Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: НПО Орион, 2022. С. 18.
3. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Терентьев Д. С., Власов П. В., Седнев М. В. / Мат. XXVI Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: НПО Орион, 2022. С. 31.
4. Гиндин П., Карпов В., Кузнецов Н., Петренко В., Семенов В., Чишко В. // Фотоника. 2013. № 6. С. 62.
5. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Варавин В. С. и др. // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 9. С. 1092.
6. Андрусов Ю. Б., Белов А. Г., Коновалов А. А., Смирнова Н. А. // Цветные металлы. 2016. № 12. С. 56.
7. Кульчицкий Н. А., Наумов А., Старцев В. // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2020. № 6. С. 114.
8. Сенченков А. С. // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 5. С. 402.
9. Кульчицкий Н. А., Мельников А. А. // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 6. С. 9.
10. Павлюк М. Д. / Дисс. канд. физ.-мат. наук. – Москва: ФГУ «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», 2020. – 153 с.
11. Гришечкин М. Б., Денисов И. А., Смирнова Н. А., Шматов Н. И., Силина А. А. // Прикладная физика. 2014. № 5. С. 510.
12. Grishechkin M. B., Denisov I. A., Silina A. A., Shmatov N. I. // Non-Ferrous Metals. 2016. № 2. P. 23.
13. Гришечкин М. Б., Денисов И. А., Силина А. А., Шматов Н. И. // Цветные металлы. 2016. № 12. С. 50.
14. Пряникова Е. В., Мирофянченко А. Е., Смирнова Н. А., Силина А. А., Бурлаков И. Д., Гришечкин М. Б., Денисов И. А., Шматов Н. И. // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 82.
15. Babu S. V. Advanced in chemical mechanical planarization (CMP). – Woodhead Publishing, 2016.

## Processing aspects of CdZnTe fragments and 2" wafers for epitaxial growing CdHgTe by molecular beam epitaxy

A. A. Trofimov<sup>1</sup>, I. A. Denisov<sup>2</sup>, N. A. Smirnova<sup>2</sup>, A. D. Shabrin<sup>1</sup>, A. E. Goncharov<sup>1</sup>,  
A. A. Novikova<sup>1</sup>, M. O. Mozhaeva<sup>1</sup>, K. A. Gladysheva<sup>1</sup>, A. M. Kosyakova<sup>1,3</sup>, V. A. Malygin<sup>1</sup>,  
S. A. Kuznetsova<sup>1</sup>, D. V. Ilyin<sup>1</sup>, and A. S. Sukhanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: aa-trofimov@yandex.ru

<sup>2</sup> GIREDMET  
5/1 Tolmachevsky al., Moscow, 119017, Russia

<sup>3</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received June 09, 2022

***The studies carried out in this work are aimed at fine-tuning processes the lapping and polishing technology in the serial production of CdZnTe wafers for molecular beam epitaxy.***

**Keywords:** cadmium zinc telluride, lapping and polishing, surface roughness, molecular beam epitaxy.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-3-289-300

### REFERENCES

1. A. Rogalski, *Infrared Detectors*. (CRC Press, USA, 2019).
2. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, S. A. Kuznetsov, and V. P. Ponomarenko, in *Proc. Materialy XXVI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii po fotoelektronike i priboram nochnogo videniya* (Moscow, NPO Orion, 2022), p. 18.
3. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, D. S. Terent'ev, P. V. Vlasov, and M. V. Sednev, in *Proc. Materialy XXVI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii po fotoelektronike i priboram nochnogo videniya* (Moscow, NPO Orion, 2022), p. 31.
4. P. Gindin, V. Karpov, N. Kuznetsov, V. Petrenko, V. Semenov, and V. Chishko, *Photonics*, No. 6, 62 (2013).
5. Yu. G. Sidorov, S. A. Dvoretzky, V. S. Varavin et al., *Physics and technology of semiconductors* **35** (9), 1092 (2001).
6. Yu. B. Andrusov, A. G. Belov, A. A. Konovalov, and N. A. Smirnova, *Cvetnye metally*, No. 12, 56 (2016).
7. N. A. Kulchitsky, A. V. Naumov, and V. V. Startsev, *Elektronika: Nauka. Tekhnologiya. Biznes*, No. 6, 114 (2020).
8. A. S. Senchenkov, *Usp. Prikl. Fiz.* **9** (5), 402 (2021).
9. N. A. Kulchitsky and A. A. Mel'nikov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, No. 6, 9 (2011).
10. M. D. Pavlyuk, Diss. kand. fiz.-mat. nauk, FGU «Federal'nyj nauchno-issledovatel'skij centr «Kristallografiya i fotonika» Rossijskoj akademii nauk», 2020, 153 s.
11. M. B. Grischechkin, I. A. Denisov, N. A. Smirnova, N. I. Shmatov, and A. A. Silina, *Applied Physics*, No. 5, 510 (2014) [in Russian].
12. M. B. Grischechkin, I. A. Denisov, A. A. Silina, N. I. Shmatov, *Non-Ferrous Metals*, No. 2, 23 (2016).
13. M. B. Grischechkin, I. A. Denisov, A. A. Silina, and N. I. Shmatov, *Cvetnye metally*, No. 12 (2016).
14. E. V. Pryanikova, A. E. Miroshnichenko, N. A. Smirnova, A. A. Silina, I. D. Burlakov, M. B. Grischechkin, I. A. Denisov, and N. I. Shmatov, *Applied Physics*, No. 2, 82 (2016) [in Russian].
15. S. V. Babu, *Advanced in chemical mechanical planarization (CMP)*. (Woodhead Publishing, 2016).