

УДК 538.958  
EDN: WICZPE

PACS: 81.15.Hi

**Обработка подложек InSb с достижением морфологии поверхности, пригодной для молекулярно-лучевой эпитаксии**

*А. А. Трофимов, Р. Ю. Козлов, В. С. Кривобок, В. В. Лопатин, В. А. Улькаров, Е. В. Молодцова, П. В. Павлов, О. С. Павлова, А. М. Косякова, Н. Ю. Комаровский, М. С. Нестюркин, А. В. Клековкин, И. И. Минаев, В. В. Ерошенко, А. С. Атрашков, Я. А. Ковин, И. Н. Мирошникова*

*Рассмотрены физико-технологические методы подготовки поверхности монокристаллического антимонида индия (InSb) для молекулярно-лучевых процессов синтеза фоточувствительных слоев. Исследовано влияние основных параметров процессов шлифования, предфинишного полирования абразивной суспензией и финального химико-механического полирования на качество поверхности и основных параметров плоскопараллельности пластин-подложек InSb. В результате на пластинах InSb диаметром 50,8 мм достигнута морфология поверхности и субнаношероховатый рельеф ( $Ra \leq 0,5$  нм), удовлетворяющие требованиям молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Разработана экспериментальная методика контроля качества и морфологии поверхности, основных параметров плоскопараллельности полупроводниковых подложек InSb в зависимости от изменения основных параметров процесса обработки поверхности.*

*Ключевые слова:* подложки InSb, полирование, шероховатость поверхности, молекулярно-лучевая эпитаксия.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-46-56

**Введение**

В настоящее время активно развивается область тепловидения, широко применяемая в

различных сферах, включая мониторинг окружающей среды, медицину, биологию, астрономию и другие. В связи с интенсивным

**Трофимов Александр Александрович**<sup>1</sup>, зам. нач. производства, к.т.н.

**Козлов Роман Юрьевич**<sup>2</sup>, нач. лаб.

**Кривобок Владимир Святославович**<sup>3</sup>, в.н.с., д.ф.-м.н.

**Лопатин Вадим Владимирович**<sup>4</sup>, рук. проекта, д.т.н.

**Улькаров Вадим Айратович**<sup>1</sup>, инженер 2 кат.

E-mail: ulkarov@yandex.ru

**Молодцова Елена Владимировна**<sup>2</sup>, с.н.с.

**Павлов Павел Витальевич**<sup>2</sup>, рук. направления.

**Павлова Олеся Сергеевна**<sup>2</sup>, н.с.

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

**Комаровский Никита Юрьевич**<sup>2</sup>, рук. направления.

**Нестюркин Михаил Сергеевич**<sup>2</sup>, рук. направления.

**Клековкин Алексей Владимирович**<sup>3</sup>, м.н.с.

**Минаев Илья Иванович**<sup>3</sup>, м.н.с.

**Ерошенко Григорий Николаевич**<sup>1</sup>, м.н.с.

**Атрашков Антон Сергеевич**<sup>1</sup>, инженер.

**Ковин Ярослав Андреевич**<sup>1</sup>, начальник отдела.

**Мирошникова Ирина Николаевна**<sup>5</sup>, д.т.н., профессор.

<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> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.

Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 53.

<sup>4</sup> Фонд перспективных исследований.

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

<sup>5</sup> ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Россия, 111250, Москва, Красноказарменная, 14.

Статья поступила в редакцию 12.09.2024

После доработки 7.10.2024

Принята к публикации 14.10.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Трофимов А. А., Козлов Р. Ю., Кривобок В. С., Лопатин В. В., Улькаров В. А., Молодцова Е. В., Павлов П. В., Павлова О. С., Косякова А. М., Комаровский Н. Ю., Нестюркин М. С., Клековкин А. В., Минаев И. И., Ерошенко Г. Н., Атрашков А. С., Ковин Я. А., Мирошникова И. Н., 2024

развитием этой области требуется улучшение эффективности инфракрасных матричных фотоприемных устройств (ИК МФПУ) – ключевого элемента тепловизионных систем. Один из наиболее широко используемых материалов для создания МФПУ среднего ИК-диапазона – это антимонид индия, узкозонный полупроводник группы  $A_3B_5$  [1–4]. Развитие способов получения полупроводниковых неорганических соединений в начале 1950-х годов привело к появлению детекторов на основе объемных монокристаллов InSb, выращенных методами Чохральского и Бриджмена. В настоящее время становится актуальной задача повышения эксплуатационных характеристик оптико-электронной аппаратуры на основе ИК приборов. Развитие новых методов выращивания InSb, особенно метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), позволило решить несколько технологических проблем и создать крупноформатные матрицы фотодиодов. Эпитаксиальные слои, полученные таким методом, менее дефектные, более однородные, имеют меньшую концентрацию фоновых примесей, в отличие от пластин монокристаллического объемного материала.

Также в качестве альтернативного материала для производства ИК МФПУ являются короткопериодные сверхрешетки II рода (T2SL) на основе InAs/InSb, которые также изготавливаются методом МЛЭ [5, 6].

Применение метода МЛЭ предполагает использование согласованных подложек, подготовленных специальным образом и предназначенных для проведения эпитаксиальных процессов.

В ограничительных условиях санкционной политики в отношении РФ доступ к зарубежным полированным подложкам InSb, удовлетворяющим требованиям МЛЭ, ограничен, а получение таких полированных подложек с высоким качеством поверхности в нашей стране не освоено. Вследствие этого разработка отечественной технологии изготовления полированных подложек InSb с достижением морфологии поверхности, пригодной для молекулярно-лучевой эпитаксии является актуальной задачей, направленной на укрепление технологического суверенитета, создания условий для импортозамещения в области стратегических материалов, а также повышение обороноспособности страны.

## Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились на пластинах InSb, изготовленных из монокристаллов, выращенных в АО «Гиредмет» методом Чохральского [7–11] из особоистых исходных компонентов отечественного производства [12]. Пластины получены после многопроволочной резки калиброванных монокристаллических слитков InSb и имели следующие параметры: толщина  $930 \pm 20$  мкм, диаметр  $50,8 \pm 0,5$  мм, кристаллографическая ориентация  $[100] \pm 0,5^\circ$  [13]. Формирование краевого профиля (кромки) пластин также произведено на мощностях АО «Гиредмет».

Основными требованиями к подложкам InSb для проведения эпитаксиального роста методом молекулярно-лучевой эпитаксии в Физическом Институте имени П. Н. Лебедева РАН являются: толщина  $600 \pm 50$  мкм, односторонне полированные, шероховатость поверхности  $R_a \leq 0,5$  нм.

Разработанная комплексная технологическая схема обработки пластин InSb состоит из последовательных операций, а также включает в себя межоперационный контроль на различных стадиях.

Приклеивание пластины InSb на стеклянный диск-носитель осуществляется с применением оборудования для приклеивания, являющегося традиционным при процессах одностороннего шлифования/полирования. Это придаёт дополнительную жёсткость пластине во время шлифования и полирования [14]. Антимонид индия – мягкий и хрупкий материал, и приклеивание пластины к диску-носителю повышает степень защиты ее от физического разрушения вследствие неосторожного чрезмерного механического воздействия, а также обеспечивает удобство работы во время отмывок пластины для проведения измерений геометрических параметров толщины в ходе контроля удаления материала пластины. Диск-носитель – это, как правило, стеклянная (реже лейкосапфировая) оснастка, которая должным образом предварительно прецизионно подготовлена с обеспечением погрешности разнотолщинности 1 мкм на диаметре диска-носителя 100 мм, тем самым задавая плоскопараллельность при приклеи-

вании. Успех процесса приклеивания обрабатываемой пластины к диску-носителю зависит от навыков оператора и технологических условий, отличающихся для различных материалов и диаметров пластин. В рамках настоящей работы определены условия процесса приклеивания к диску-носителю для пластин InSb диаметром 50,8 мм и произведена прецизионная подготовка диска-носителя для исключения внесения погрешности приклеивания в измерения, полученные после обработки пластин InSb.

Шлифование производилось свободным абразивом односторонним способом с применением прецизионного держателя пластин (джиг PP6) на исследовательском оборудовании с широкими возможностями для научных целей. В отличие от обработки связанным абразивом, это ограничивает скорость, но позволяет более гибко настроить процесс. Для такого хрупкого материала, как антимонид индия, последнее обстоятельство является важным фактором, направленным на повышение выхода годных [14]. Определены технологические условия процесса, обеспечивающие эффективность обработки. Профиль поверхности стеклянной шлифовальной плиты прецизионно задан выпуклой линзой +4 мкм. Этим обеспечивается удержание плоскостности пластины путем уравнивания скоростей съема материала с краев пластины и в центре, вследствие разницы угловых скоростей при вращении пластины в ходе обработки. Операция шлифования свободным абразивом выполнена в несколько этапов с применением шлифовальных суспензий с последовательным уменьшением размера зерна абразива от 9 мкм до 3 мкм. Это снижает нарушенный слой и сокращает длительность последующего полирования [14]. Для снижения механического напряжения обрабатываемых пластин, которое неизбежно возникает в ходе обработки и приводит к искажению геометрических параметров прогиба и коробления (BOW и WARP) [14], в технологической схеме обработки введено шлифование обратной и лицевой сторон пластины InSb последовательно для обеспечения удаления равного количества материала с обеих сторон при уменьшении толщины пластины от ис-

ходных 930 мкм до 650 мкм. Переход с обработки обратной стороны пластины на лицевую осуществляется с отклеиванием пластины от стеклянного диска-носителя, ее отмывкой и последующим приклеиванием другой стороной.

Для контроля плоскостности и равномерного снятия полупроводникового материала по всей площади пластин в процессе шлифования/полирования производились периодические измерения толщины пластин в 5 точках на бесконтактном измерителе толщины для оценки параметра разнотолщинности (TTV – total thickness variation) с точностью 1 мкм, а также измерения профиля по двум взаимно перпендикулярным диаметрам для каждой пластины при помощи зондового контактного профилометра, который имеет воспроизводимость менее 5 Å.

В таблице 1 представлены результаты измерений толщины одной из экспериментальных пластин InSb в процессе шлифования лицевой стороны пластины последовательно суспензиями на основе абразивных порошков размерностью зерна 9 мкм и 3 мкм. По результатам измерений можно заметить, что разница в значениях толщины в процессе шлифования не превышает 2 мкм, а конечный результат измерений показывает равные значения толщины во всех 5 точках. Из всего вышеперечисленного можно сделать вывод о правильно подобранном и подготовленном оборудовании и оснастки для проведения процесса шлифования и модифицированном режиме приклеивания пластин InSb на стеклянный диск-носитель с учетом особенностей обрабатываемого материала. Также периодический контроль толщины пластин позволяет своевременно скорректировать параметры процесса шлифования с целью недопущения нарушения плоскопараллельности пластин InSb.

На рисунке 1 представлен профиль пластины после шлифования абразивной суспензией с размером частиц 3 мкм. Перепад по профилю на длине равной диаметру пластины не превышает 0,5 мкм, что также подтверждает результаты измерений толщины, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Измерения толщины пластины InSb диаметром 50,8 мм в 5 точках A-E в ходе шлифования

шлифование 9 мкм абразивом лицевой стороны						
Время обработки	5 мин	10 мин	15 мин	20 мин	22 мин	
A	767	754	735	712	702	
B	765	754	734	712	702	
C	766	753	735	712	702	
D	766	755	735	712	702	
E	766	754	735	712	703	
шлифование 3 мкм абразивом лицевой стороны						
	5 мин	10 мин	15 мин	20 мин	22 мин	24 мин
A	693	682	672	660	656	652
B	692	683	672	661	656	652
C	691	683	672	661	655	652
D	692	683	672	661	655	652
E	693	683	672	662	656	652

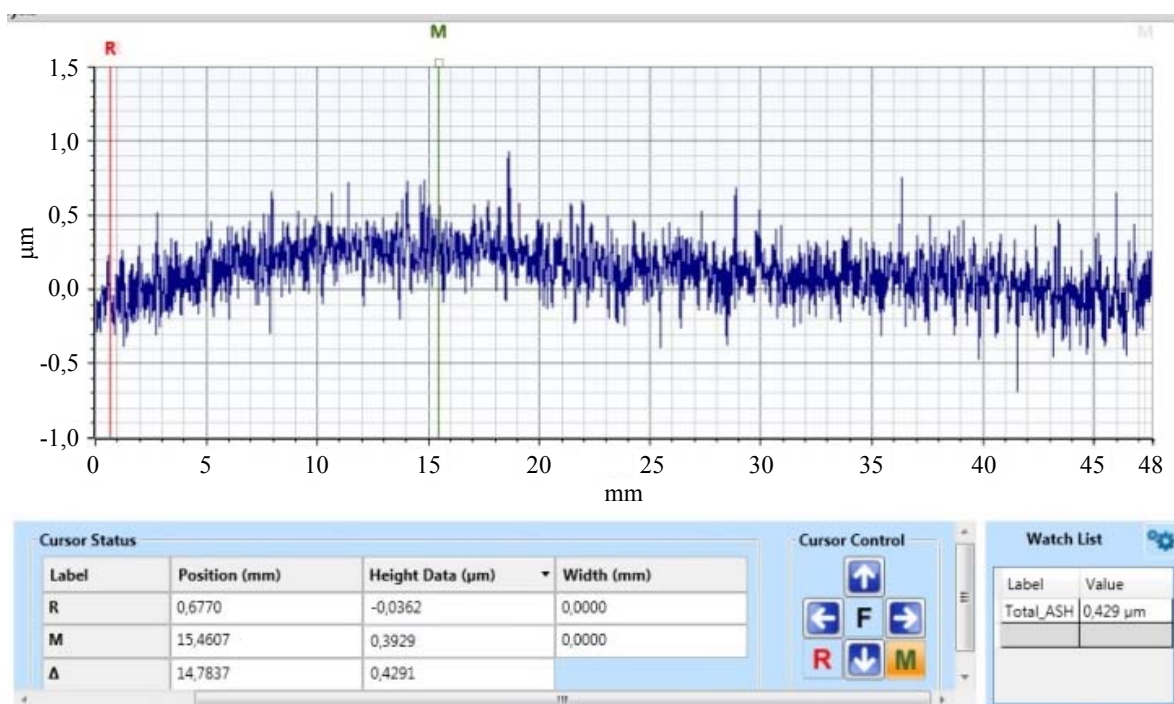


Рис. 1. Профиль пластины InSb после шлифования абразивной суспензией с размером частиц 3 мкм

Процесс полирования аналогичен описанному выше процессу шлифования свободным абразивом, но в качестве полировальных дисков используются жесткие диски, обтянутые мягкой полировальной тканью. При механическом полировании применяются абразивные суспензии с размером зерна абразива менее 1 мкм. Во избежание термического воздействия на обрабатываемую пластину вследствие трения в ходе полирования производится подбор скорости вращения полировального диска, применяемой суспензии и скорости подачи суспензии. В рамках настоящей работы

предфинишное полирование производилось с использованием абразивной суспензии оксида алюминия с размером частиц 0,3 мкм с целью минимизации нарушенного слоя и сохранения плоскопараллельности пластины. На данном этапе добавление химических компонентов не применялось во избежание неконтролируемого растравливания царапин, оставшихся после шлифования, вследствие анизотропии кристаллической структуры.

На этапе химико-механического полирования ввиду применения агрессивных полирующих травителей было проведено модифи-

цирование прецизионного держателя пластин, а именно замена опорного кольца с целью предотвращения его возможной коррозии в процессе финишного полирования и попадания микроскопических продуктов коррозии на полировальную ткань, что неизбежно привело

бы к образованию царапин на финально полированной поверхности пластин. Новое химически нейтральное опорное кольцо было изготовлено по разработанным в рамках настоящей работы чертежам на производственных мощностях АО «Гиредмет» (рис. 2).

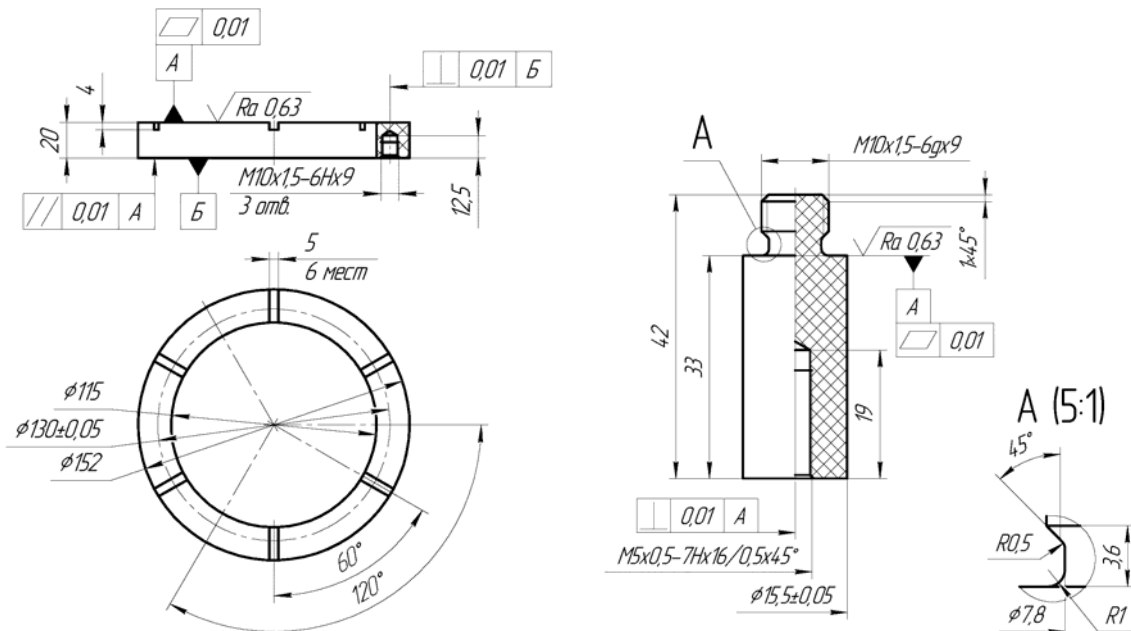


Рис. 2. Чертеж опорного кольца прецизионного держателя пластин

Изготовленное опорное кольцо также дополнительно доведено на установке шлифования/полирования с целью обеспечения высокой точности по плоскостности как самого кольца отдельно, так и в сопряжении с подвижным по вертикальной оси вакуумным держателем, на который крепится стеклянный диск-носитель с обрабатываемой пластиной. Дело в том, что диаметр опорного кольца составляет, как представлено на чертеже, 150 мм. Возможности механического производства обеспечивают плоскопараллельность при изготовлении на уровне перепадов 10 мкм, что неизбежно привело бы к соответствующему клину на пластине при обработке с применением такого кольца. Поэтому для снижения перепада и обеспечения высокой точности, не уступающей зарубежному оригинальному узлу, изготовленное кольцо было дополнительно обработано в лабораторных условиях до минимально возможного перепада менее 2 мкм на диаметре 150 мм, что в результате привело к высокой точности и сохранению геометрических параметров обрабатываемых пластин при финишном химико-

механическом полировании. На рисунке 3 показан модифицированный прецизионный держатель с опорным кольцом из химически инертного материала в процессе химико-механического полирования.

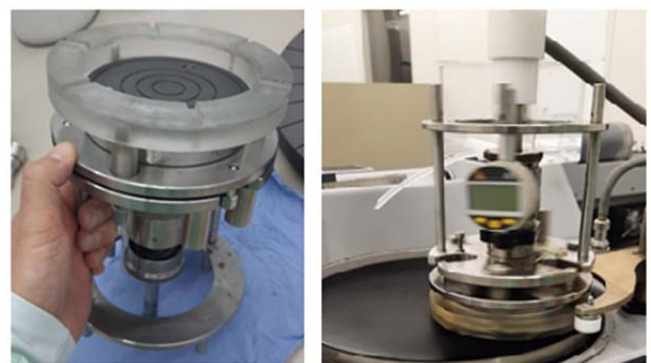


Рис. 3. Модифицированный прецизионный держатель с опорным кольцом из химически нейтрального материала

Финишное химико-механическое полирование проводили с использованием полировальной ткани Chemcloth с применением травителя на основе молочной кислоты, перекиси водорода, этиленгликоля и раствора хлорида натрия [15].

Оценка основных характеристик, полученных экспериментальных полированных подложек InSb осуществлялась измерением геометрических характеристик в АО «Гиредмет» с помощью современной системы оптической метрологии. В таблице 2 представлено сравнение основных параметров одной из экспериментально полученных пластин с зарубежным аналогом [16]. Из полученных результатов можно сделать вывод, что экспериментальная пластина не уступает представленным характеристикам продукции одного из ведущих мировых производителей пластин-подложек InSb для МЛЭ.

На рисунках 4–5 представлена морфология поверхности экспериментальных пластин после финишного химико-механического полирования. Измерения выполнены на современном оптическом профилометре. Размер кадра 285×335 мкм, измерения шероховатости поверхности проведены на базовой длине 330 мкм. Параметры шероховатости первой пластины Ra = 0,26 нм, RMS = 0,32 нм, второй пластины – Ra = 0,32 нм, RMS = 0,40 нм. Полученные характеристики поверхности экспериментальных пластин InSb соответствуют требованиям к подложкам для МЛЭ.

Таблица 2

Сравнительные геометрические параметры пластины InSb до обработки, после проведения процессов по разработанной технологической схеме, а также зарубежной пластины InSb

InSb Ø 50,8 ± 0,5 мм	Исходная пластина	Экспериментальный образец 1008.48	Зарубежный аналог
Толщина, мкм	930 ± 20	605,3	625 ± 25
TTV, мкм	< 15	4,646	< 5
BOW, мкм	< 15	0,844	< 5
WARP, мкм		3,271	< 8

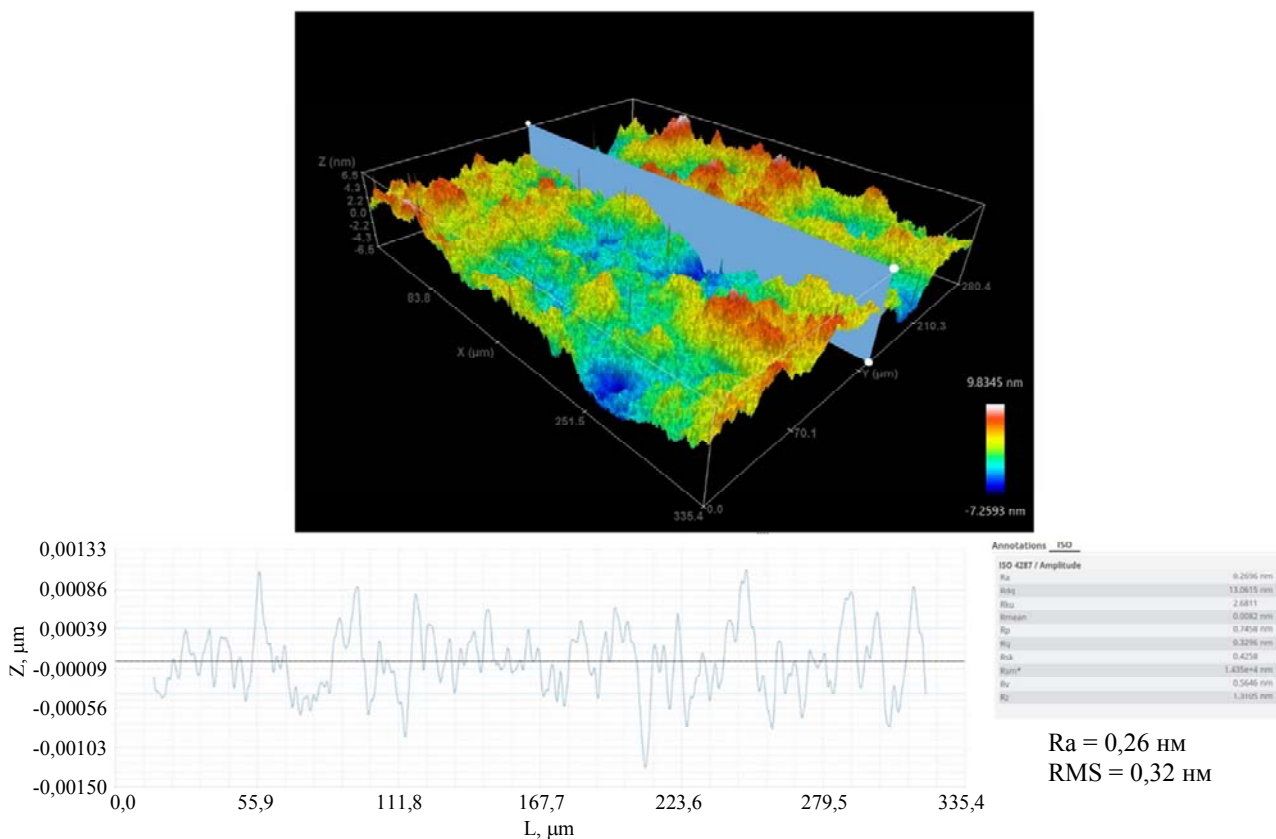


Рис. 4. Морфология, профиль и показатели шероховатости экспериментальной пластины 1008.48

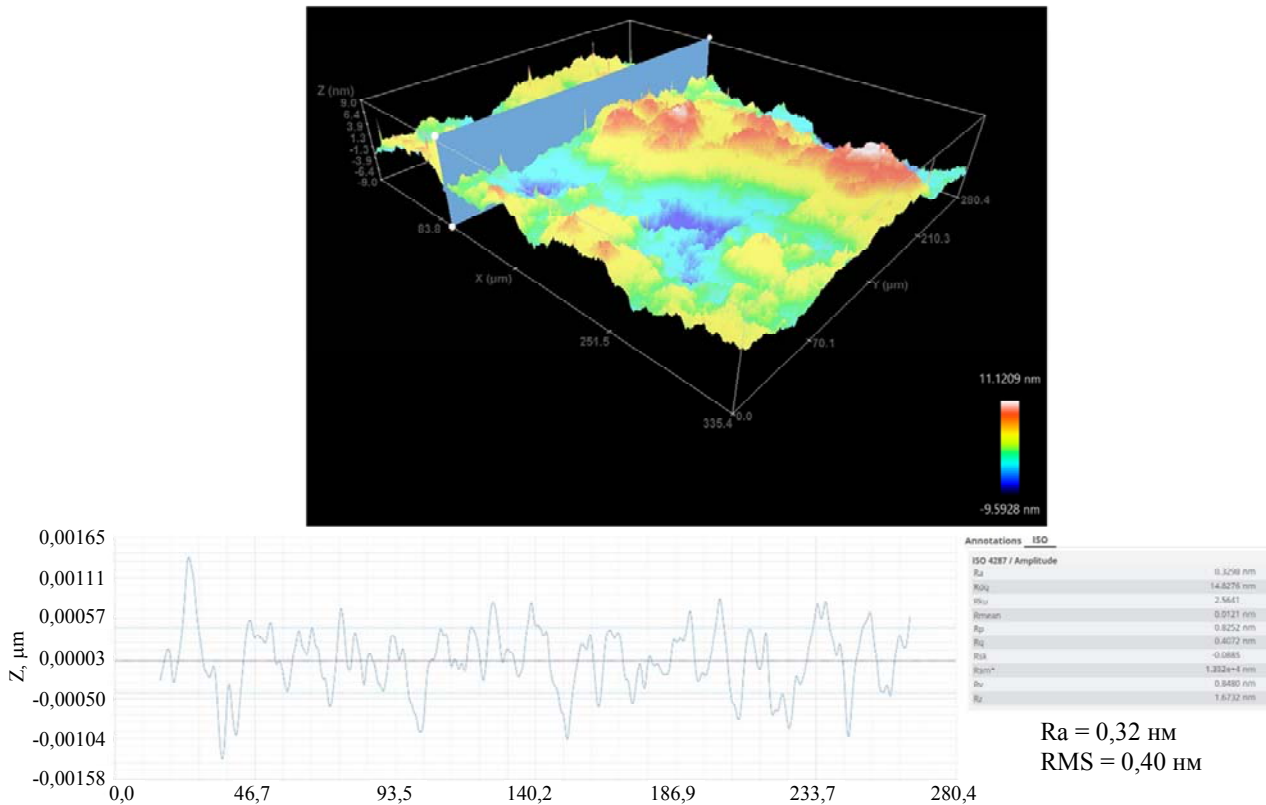


Рис. 5. Морфология, профиль и показатели шероховатости экспериментальной пластины 1008.47

Для обнаружения возможных царапин на экспериментальных пластинах был применён метод исследования в темном поле с помощью оптического микроскопа. На рис. 6 представлены темнопольные изображения поверхности экспериментальных пластин InSb. Поверхность оценивалась в идентичном режиме с экспозицией в 6 секунд. На поверхности экспериментальных пластин InSb, обработанных в рамках настоящей работы, царапины не обнаружены.

Дополнительно проведено измерение шероховатости поверхности подготовленных пластин InSb на атомно-силовом микроскопе на участках  $5 \times 5$  мкм (рис. 7). На базовой длине 3,5 мкм фиксируется перепад пиков профиля на уровне 2,3 нм. Показатели шероховатости на базовой длине 3,5 мкм  $Ra = 0,28$  нм,  $RMS = 0,36$  нм соответствуют измерениям на оптическом профилометре.

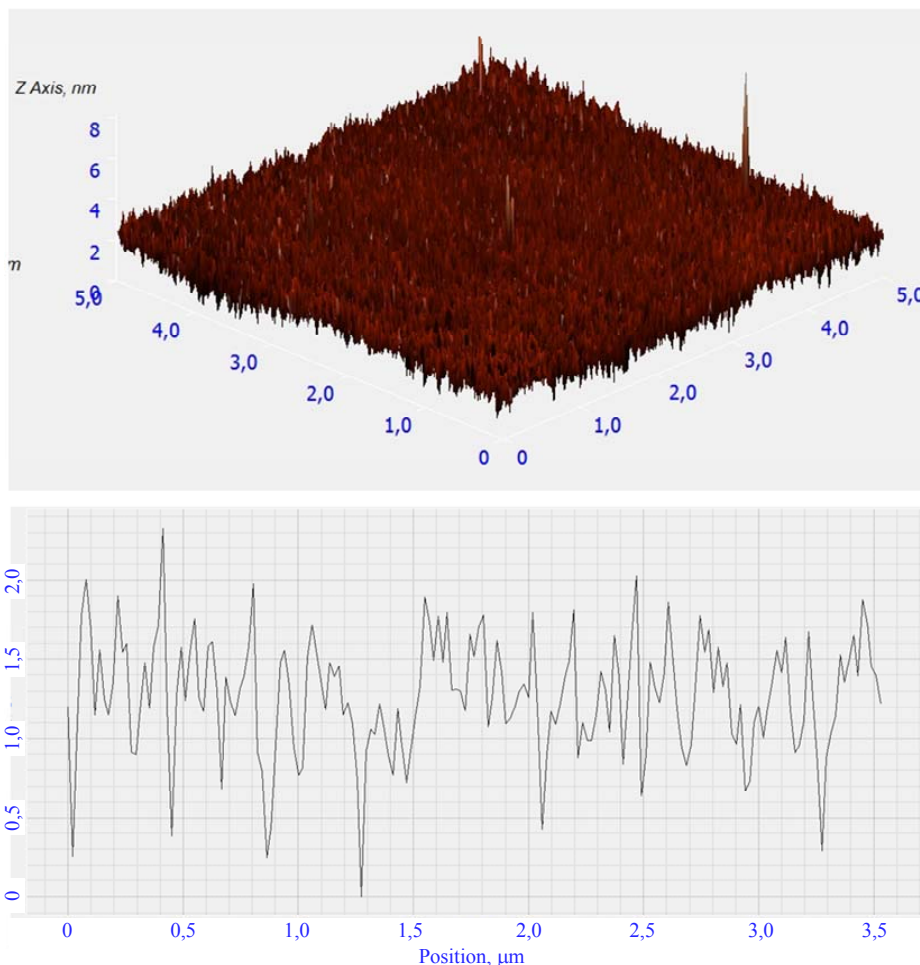


Экспериментальная пластина 1008.47



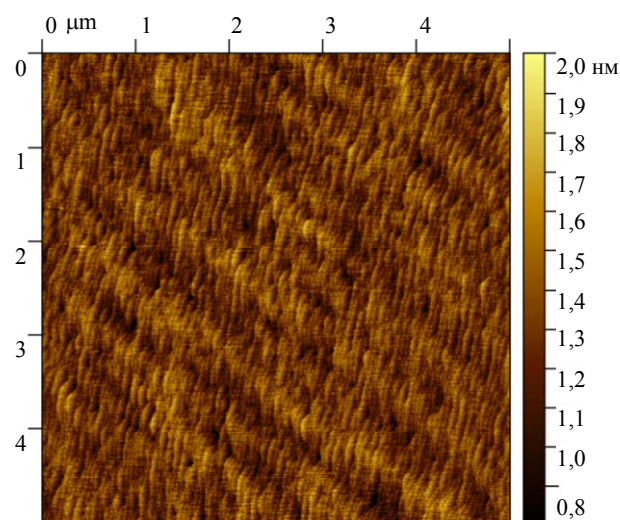
Экспериментальная пластина 1008.48

Рис. 6. Темнопольное изображение поверхности пластин после финишного полирования



**Рис. 7. Морфология и шероховатость экспериментальной пластины, полученные методом атомно-силовой микроскопии. На базовой длине 3,5 мкм шероховатость поверхности составляет  $Ra = 0,28$  нм,  $RMS = 0,36$  нм**

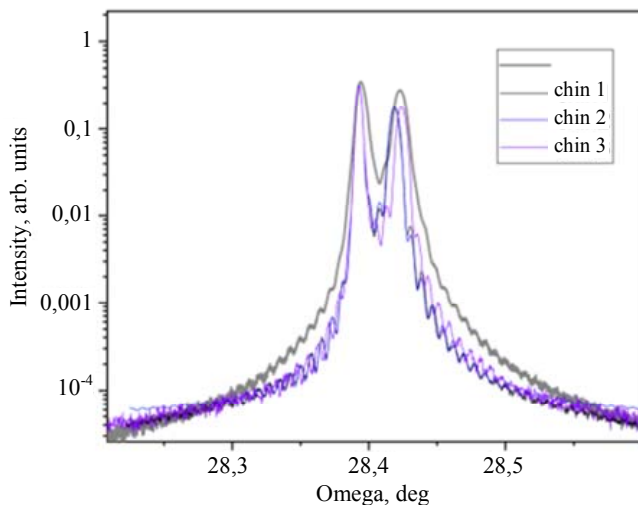
Технологическая апробация полированных подложек InSb диаметром 50,8 мм, подготовленных в рамках настоящего научно-практического исследования, проведена в ходе гетероэпитаксиального роста слоя InAsSb методом молекулярно-лучевой эпитаксии в Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук. На рисунке 8 представлена исследованная методом атомно-силовой микроскопии на участке 5×5 мкм морфология поверхности выращенного гетероэпитаксиального слоя InAsSb толщиной 700 нм с содержанием мышьяка (As) 0,007 %. Наблюдается хорошая морфология поверхности и террасность, перепад до 2 нм на участке 5×5 мкм.



**Рис. 8. Морфология поверхности гетероэпитаксиального слоя InAsSb, выращенного на подготовленных полированных подложках InSb**



На рисунке 9 представлена рентгеновская дифракционная картина полученного гетероэпитаксиального слоя InAsSb толщиной 700 нм с содержанием мышьяка 0,007 % в сравнении с аналогичными гетероэпитаксиальными слоями, выращенными на зарубежных подложках одного из ведущих мировых производителей подложек InSb для МЛЭ. Мышьяк был внесён с целью регистрации второго пика на рентгеновской дифракционной картине и оценки качественного эпитаксиального роста слоя InAsSb.



**Рис. 9.** Рентгеновская кривая качания эпитаксиального слоя In(As)Sb на подложке InSb и аналогичных слоев на зарубежных подложках (chin). Правый пик соответствует эпитаксиальному слою In(As)Sb с содержанием As 0,007 %

Некоторое снижение параметров, характеризующих кристаллическое совершенство материала, в сравнении с зарубежными подложками может свидетельствовать о необходимости дальнейшего совершенствования не только технологии подготовки подложек, но и самого подложечного материала, что обусловлено как чистотой исходных компонентов для выращивания монокристаллических слитков InSb, так и технологией их роста, что в свою очередь показывает необходимость комплексного подхода в развитии технологий и оборудования электронной промышленности РФ.

### Заключение

В результате проведенных работ в рамках импортозамещения и обеспечения техно-

логической независимости РФ в части стратегического материала твердотельной оптоэлектроники исследована возможность получения из отечественного InSb, выращенного методом Чохральского в АО «Гиредмет», полированных пластин-подложек, удовлетворяющих требованиям МЛЭ для проведения эпитаксиальных процессов.

Разработана лабораторная технология подготовки подложек InSb с достижением морфологии поверхности и субнаношероховатого рельефа на уровне  $Ra = 0,28$  нм, которая при необходимости может быть эффективно применена для мелкосерийного выпуска такой продукции.

Проведена успешная модификация одного из важнейших высокопрецизионных узлов установки шлифования/полирования с целью возможности работы в условиях агрессивных химических полирующих травителей и недопущения появления дефектов на поверхности экспериментальных пластин-подложек InSb.

Разработана экспериментальная методика контроля качества и морфологии поверхности полупроводниковых подложек InSb в зависимости от изменения основных параметров процесса обработки поверхности.

Проведена технологическая апробация подготовленных полированных пластин InSb в ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН, в результате чего показана возможность успешного проведения на таких подложках гетероэпитаксиальных процессов методом МЛЭ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. / Progress in Quantum Electronics. 2012. Vol. 36. P. 342.
2. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Мирофанченко А. Е., Власов П. В., Лопухин А. А., Пряникова Е. В., Соловьев В. А., Семенов А. Н., Мельцер Б. Я., Комиссарова Т., Львова Т. В., Иванов С. В. / Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 6. С. 559–565.
3. www.scd.co.il; (SCD Semiconductor Devices. Israel)
4. www.sbfpl.com; (Lockheed Martin Corporation, Santa Barbara Focalplane. USA)
5. Сысоев И. А., Катаев В. Ф., Ермолаева Н. В. / Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2010. № 2 (10). С. 90–96.
6. Ковшов В. С., Никонов А. В., Пашкев Д. А., Лопатина Е. А. / Прикладная физика. 2021. № 2. С. 97–111.

7. Ежлов В. С., Колчина Г. П., Меженный М. В., Мильвидская А. Г., Молодцова Е. В., Резник В. Я. Способ получения крупногабаритных монокристаллов антимонида индия. Патент РФ № 2482228 от 20.05.2013. Бюл. № 14.

8. Комаровский Н. Ю., Молодцова Е. В., Белов А. Г., Гришечкин М. Б., Козлов Р. Ю., Кормилицина С. С., Журавлев Е. О., Нестюркин М. С. / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 8. С. 38–46.

9. Комаровский Н. Ю., Молодцова Е. В., Трофимов А. А., Кормилицина С. С., Улькаров В. А., Нестюркин М. С., Зареченская А. А., Царегородцев Д. О. / Прикладная физика. 2023. № 3. С. 63–72.

10. Козлов Р. Ю., Кормилицина С. С., Молодцова Е. В., Журавлев Е. О. / Известия вузов. Материалы электронной техники. 2021. Т. 24. № 3. С. 190–198.

11. Журавлев Е. О., Молодцова Е. В., Козлов Р. Ю., Князев С. Н., Нестюркин М. С., Комаровский Н. Ю. / Сборник тезисов 3-й Международной научно-практической конференции «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение»

(РЕДМЕТ 2024), Москва, АО «Гиредмет» им. Н. П. Сагина, 2024. С. 302–303.

12. Абрютин В. Н., Марончук И. И., Потолоков Н. А., Санникович Д. Д., Черкашина Н. И. / Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2022. № 25(3). С. 214–226.

13. Сертификат АО «Гиредмет». Пластины по ТУ 1775-330/О-0198396-11, монокристалла по ТУ1775-329/О-0198396-11. Номер слитка 1008. Диаметр пластин  $50,8 \pm 0,5$  мм, толщина –  $930 \pm 20$  мкм кристаллографическая ориентация  $[100] \pm 0,5$ . Дата выпуска 25.11.2022.

14. Трофимов А. А. Технология разделения на кристаллы сверхвысокоочастотных монокристаллических интегральных схем на гетероструктурах AlGaIn/GaN: дисс. канд. техн. наук. – Москва, 2017.

15. Киселева Л. В., Лопухин А. А., Мезин Ю. С., Савостин А. В., Власов П. В., Вяткина О. С. / Прикладная физика. 2015. № 5. С. 84.

16. Wafer Technology Ltd. URL: <http://www.wafertech.co.uk/products/indium-antimonide-insb/>

PACS: 81.15.Hi

## Processing InSb substrates to achieve surface morphology suitable for molecular beam epitaxy

A. A. Trofimov<sup>1</sup>, R. Yu. Kozlov<sup>2</sup>, V. S. Krivobok<sup>3</sup>, V. V. Lopatin<sup>4</sup>, V. A. Ulkarov<sup>1</sup>,  
E. V. Molodtsova<sup>2</sup>, P. V. Pavlov<sup>2</sup>, O. S. Pavlova<sup>2</sup>, A. M. Kosyakova<sup>1</sup>,  
N. Yu. Komarovskiy<sup>2</sup>, M. S. Nestyurkin<sup>2</sup>, A. V. Klekovkin<sup>3</sup>, I. I. Minaev<sup>3</sup>, V. V. Eroshenkov<sup>1</sup>,  
A. S. Atrashkov<sup>1</sup> and Ya. A. Kovin<sup>1</sup> and I. N. Miroshnikova<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup> Giredmet JSC  
Bd. 1, 5 B. Tolmachevsky lane, Moscow, 119017, Russia

<sup>3</sup> P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences  
53 Leninsky Ave., Moscow, 119991, Russia

<sup>4</sup> Foundation for Advanced Research  
Bd. 3, 22 Berezhkovskaya nab., Moscow, 121059, Russia

<sup>5</sup> National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russia

Received 12.09.2024; revised 7.10.2024; accepted 14.10.2024

*The work is devoted to the development of physical and technological methods for preparing the surface of single-crystal indium antimonide (InSb) for molecular beam processes for the synthesis of photosensitive layers. The influence of the main parameters of grinding processes, pre-finish polishing with an abrasive suspension and final chemical-mechanical polishing on*

***the surface quality and the main parameters of plane-parallelism of InSb substrate plates was studied. As a result, on InSb wafers with a diameter of 50.8 mm, a surface morphology and subnano-rough relief ( $Ra \leq 0.5$  nm) were achieved that meet the requirements of molecular beam epitaxy (MBE). An experimental technique has been developed for monitoring the quality and morphology of the surface, the main parameters of plane-parallelism of InSb semiconductor substrates, depending on changes in the main parameters of the surface treatment process.***

**Keywords:** InSb substrates, polishing, surface roughness, molecular beam epitaxy.

## REFERENCES

1. Rogalski A., Progress in Quantum Electronics **36**, 342 (2012).
2. Burlakov I. D., Boltar K. O., Mirofyanchenko A. E., Vlasov P. V., Lopukhin A. A., Pryanikova E. V., Soloviev V. A., Semenov A. N., Meltzer B. Ya., Komissarova T., Lvova T. V. and Ivanov S. V., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **3** (6), 559–565 (2015) [in Russian].
3. www.scd.co.il; (SCD Semiconductor Devices. Israel)
4. www.sbf.com; (Lockheed Martin Corporation, Santa Barbara Focalplane. USA)
5. Sysoev I. A., Kataev V. F. and Ermolaeva N. V., Caspian Journal: Management and High Technologies, № 2 (10), 90–96 (2010) [in Russian].
6. Kovshov V. S., Nikonov A. V., Pashkeev D. A. and Lopatina E. A., Applied Physics, № 2, 97–111 (2021) [in Russian].
7. Ezhlov V. S., Kolchina G. P., Mezheny M. V., Milvidskaya A. G., Molodtsova E. V. and Reznik V. Ya. Russian Federation Patent № 2482228 dated 20.05.2013, Bull. № 14 [in Russian].
8. Komarovskiy N. Yu., Molodtsova E. V., Belov A. G., Grishchkin M. B., Kozlov R. Yu., Kormilitsina S. S., Zhuravlev E. O. and Nestyurkin M. S., Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov **89** (8), 38–46 (2023) [in Russian].
9. Komarovskiy N. Yu., Molodtsova E. V., Trofimov A. A., Kormilitsina S. S., Ulkarov V. A., Nestyurkin M. S., Zarechenskaya A. A. and Tsaregorodtsev D. O., Applied Physics, № 3, 63–72 (2023) [in Russian].
10. Kozlov R. Yu., Kormilitsina S. S., Molodtsova E. V. and Zhuravlev E. O., Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki **24** (3), 190–198 (2021) [in Russian].
11. Zhuravlev E. O., Molodtsova E. V., Kozlov R. Yu., Knyazev S. N., Nestyurkin M. S. and Komarovskiy N. Yu. The 3rd International Conference on Technologies, Properties and Applications of Rare Metals and Related Materials (RAREMET-2024), Book of Abstracts, Moscow, April 3–5, 2024, GIREDMET JSC, pp. 302–303.
12. Abryutin V. N., Maronchuk I. I., Potolokov N. A., Sanikovich D. D. and Cherkashina N. I., Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki, № 25(3), 214–226 (2022).
13. Certificate of Giredmet JSC. Plates according to TU 1775-330/O-0198396-11, single crystal according to TU1775-329/O-0198396-11. Ingot number 1008. Plate diameter  $50.8 \pm 0.5$  mm, thickness -  $930 \pm 20$   $\mu$ m, crystallographic orientation  $[100] \pm 0.5$ . Date of issue 11/25/2022.
14. Trofimov A. A. Technology of separation into crystals of ultra-high-frequency monolithic integrated circuits on AlGaIn/GaN heterostructures: dis. cand. tech. sciences. Moscow, 2017.
15. Kiseleva L. V., Lopukhin A. A., Mezin Yu. S., Savostin A. V., Vlasov P. V. and Vyatkina O. S., Applied Physics, № 5, 84 (2015) [in Russian].
16. Wafer Technology Ltd. URL: <http://www.wafertech.co.uk/products/indium-antimonide-insb/>