

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2021. Т. 24, № 3. С. 190—198.
DOI: 10.17073/1609-3577-2021-3-190-198

УДК 621.315.592

Выращивание монокристаллов антимонида индия диаметром 100 мм модифицированным методом Чохральского

© 2021 г. Р. Ю. Козлов✉, С. С. Кормилицина, Е. В. Молодцова, Е. О. Журавлев

*АО «Государственный научно-исследовательский
и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет»,
Электродная ул., д. 2, Москва, 111524, Россия*

✉ Автор для переписки: RYKozlov@rosatom.ru

Аннотация. Сегодня во всем мире наблюдается тенденция к увеличению диаметров монокристаллов как элементарных полупроводников, так и полупроводниковых соединений. Согласно литературным данным, речь уже идет об использовании монокристаллов соединений $A^{III}B^V$ диаметром от четырех до шести дюймов. До настоящего времени в России были получены монокристаллы антимонида индия диаметром до 75 мм.

Антимонид индия является элементной базой наиболее широкой области твердотельной электроники — оптоэлектроники. На его основе изготавливаются линейные и матричные фотоприемники, работающие в спектральном диапазоне длин волн 3—5 мкм, которые используются в качестве светочувствительный материал в системах тепловидения элемента в системах тепловидения.

Проведен подбор тепловых условий выращивания и получены монокристаллы антимонида индия диаметром 100 мм в кристаллографическом направлении [100]. Монокристаллы диаметром 100 мм выращивали методом Чохральского в двухстадийном процессе. Конструкция графитового теплового узла была увеличена и подобрана под рабочий тигель диаметром 150 мм и загрузку 4,5—5 кг. Решение поставленной задачи позволило существенно образом увеличить выход годных фотоприемных устройств.

Методом Ван-дер-Пау были измерены электрофизические свойства полученных монокристаллов, которые соответствовали стандартным параметрам нелегированного антимонида индия. С помощью оптического микроскопа проводился подсчет ямок травления по методу 9 полей. Плотность дислокаций в кристаллах диаметром 100 мм составляла $\leq 100 \text{ см}^{-2}$ и соответствовала значениям для кристаллов диаметром 50 мм.

Ключевые слова: метод Чохральского, антимонид индия, диаметр 100 мм, монокристалл, технология, тепловой узел, плотность дислокаций, однородность

Для цитирования: Козлов Р.Ю., Кормилицина С.С., Молодцова Е.В., Журавлев Е.О. Выращивание монокристаллов антимонида индия диаметром 100 мм модифицированным методом Чохральского. *Известия вузов. Материалы электрон. техники.* 2021; 24(3): 190—198. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-3-190-198>

Growing indium antimonide single crystals with a diameter of 100 mm by the modified Chochralsky method

R. Yu. Kozlov✉, S. S. Kormilitsina, E. V. Molodtsova, E. O. Zhuravlev

*Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (“Giredmet” JSC),
2 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russia*

✉ Corresponding author: RYKozlov@rosatom.ru

Abstract. At present, all over the world there is a tendency to increase the diameters of single crystals of both elementary semiconductors and semiconductor compounds. There are reports indicating the use of single crystals of III–V semiconductors with a diameter of four to six inches. So far, indium antimonide single crystals up to 75 mm in diameter have been obtained in Russia.

Indium antimonide is the element base of the broadest field of solid-state electronics — optoelectronics. On its basis, linear and matrix photodetectors are manufactured, operating in the spectral wavelength range of 3–5 microns, which are used as a viewing element in thermal imaging systems. In this work, we selected the thermal growth conditions and obtained indium antimonide single crystals 100 mm in diameter in the crystallographic direction [100]. The solution of this problem has made it possible to significantly increase the yield of suitable photodetectors.

Single crystals 100 mm in diameter were grown by the Czochralski method in a two-stage process. The design of the graphite heating unit was enlarged and matched to a working crucible with a diameter of 150 millimeters and a load of 4.5–5 kg.

The Van der Pauw method was used to measure the electrical properties of the obtained single crystals, which corresponded to the standard parameters of undoped indium antimonide. Using an optical microscope, the etching pits were counted using the 9-field method. The dislocation density in crystals with a diameter of 100 mm was $\leq 100 \text{ cm}^{-2}$ and corresponded to the values for crystals of 50 mm.

Keywords: Czochralski method, indium antimonide, diameter 100 mm, single crystal, technology, thermal unit, EPD, homogeneity

For citation: Kozlov R.Yu., Kormilitsina S.S., Molodtsova E.V., Zhuravlev E.O. Growing indium antimonide single crystals with a diameter of 100 mm by the modified Chochralsky method. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2021; 24(3): 190–198. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-3-190-198>

Введение

Антимонид индия (**InSb**) занимает особое место в группе полупроводниковых соединений $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$, так как обладает уникальными свойствами: самой низкой температурой плавления, малой шириной запрещенной зоны, высокой подвижностью носителей заряда, совершенством кристаллической структуры. Благодаря этим свойствам антимонид индия широко используется в качестве элементной базы для создания фотоэлектронных устройств и приемников ИК-излучения, работающих в спектральном диапазоне 3–5 мкм. Матрицы на основе InSb отличаются высокой однородностью свойств по площади, большим количеством работоспособных элементов, более низкой ценой в сравнении

с аналогичными устройствами на основе HgCdTe (**KPT**). Все это делает InSb лидирующим материалом для крупноформатных матриц на средневолновой ИК-диапазон [1–5]. На рис. 1 представлена диаграмма продаж матричных фотоприемных устройств (**МФПУ**), изготовленных из разных материалов.

Как видно из рис. 1, доля продаж МФПУ на основе антимонида индия (48 %) значительно превышает востребованность других фотоприемных устройств (ФПУ) и сравнима только с объемом продаж ФПУ на основе КРТ (40 %), которые по своей стоимости в несколько раз превышают стоимость фотоприемников на основе антимонида индия [6].

Основным структурным элементом высокочувствительных, дальнотействующих теплови-

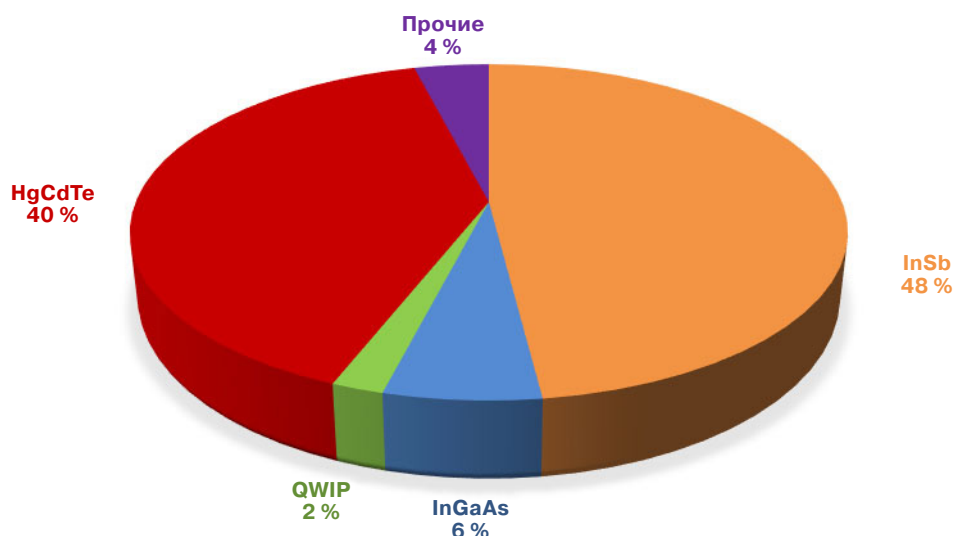


Рис. 1. Относительные доли продаж МФПУ на основе разных материалов (Maxtech International)

Fig. 1. Sales chart of photodetector arrays fabricated on the basis of different materials (Maxtech International)

зионных систем являются МФПУ на подложках из антимонида индия. В основе принципа работы таких систем лежит преобразование теплового излучения объекта в его видимое изображение. Благодаря своему тепловому излучению замаскированные или скрытые объекты становятся видимыми. В последние годы значительно расширились области использования тепловизионной техники, которая все активнее проникает в различные сферы народохозяйственной деятельности (рис. 2).

Основные направления научных и технологических разработок в области антимонида индия, как и для всех остальных соединений $A^{III}B^V$, определяются разработчиками оптоэлектронных приборов на их основе [7—9]. Создание многоэлементных фотоприемников, способных воспринимать полный световой образ и обладающих высокой разрешающей способностью, а также повышение выхода годных выдвигают требования по увеличению диаметра используемых монокристаллов

и сохранению при этом их высокого структурного совершенства и однородности электрофизических свойств [10—12].

В течение последних 30 лет АО «Гиредмет» является единственной организацией в России и ближнем зарубежье, где ведутся новые технологические разработки, в том числе по созданию технологической линии для получения полированных пластин, и выпускаются монокристаллы антимонида индия.

Наиболее применимым в технологии полупроводниковых материалов является метод выращивания монокристаллов по Чохральскому. Этим методом получают подавляющее большинство монокристаллов самых распространенных полупроводников, таких как кремний, арсенид индия, фосфиды индия и галлия, антимониды индия и галлия. Исключение представляет арсенид галлия, у которого большая часть монокристаллов выращивается методами вертикальной направленной

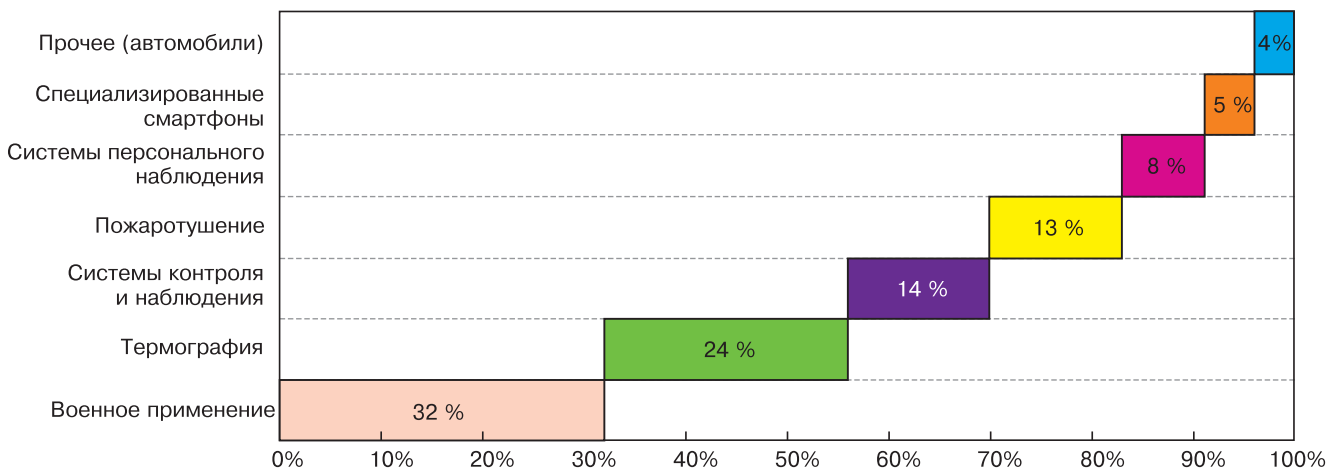


Рис. 2. Области использования тепловидения (Yole Development, 2018)

Fig. 2. Application domains of heat vision systems (Yole Development, 2018)

кристаллизации (**ВНК**) и горизонтальной направленной кристаллизации (**ГНК**). Достоинством этих методов является возможность совмещения процесса синтеза, очистки и выращивания монокристаллов полупроводников в одном технологическом процессе. Однако оба эти метода в экономическом отношении чрезвычайно трудозатратны, малопродуктивны и требуют наличия дорогостоящей аппаратуры. Применительно к антимиониду индия

метод ГНК [13] также использовался для синтеза и очистки при получении поликристаллического материала, из которого на следующей стадии выращивали монокристаллы по методу Чохральского. Такая технология являлась также весьма затратной и энергоемкой, так как предусматривала проведение более 40 проходов зоны на стадиях проведения синтеза и последующей очистки.

Нам представлялось целесообразным, используя преимущества метода Чохральского, существенно менее энергоемкого и более экспрессного, чем методы ВНК и ГНК, разработать принципиально новый ресурсосберегающий метод получения монокристаллов антимионид индия большого диаметра (> 60 мм), совмещающий синтез и выращивание в одном технологическом цикле.

Модифицированный метод Чохральского для выращивания монокристаллов полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$

Сущность разработанного метода состояла в ликвидации трудоемких и энергоемких технологических переделов по синтезу и последующей многократной зонной плавке (до 40 проходов зоны) для получения исходного поликристаллического антимионид индия и замене их на совмещенный процесс синтеза и выращивания. Очевидно, что при такой замене особое значение приобретает чистота исходных материалов, которая не должна быть менее 6N, а также условия проведения синтеза и дополнительная очистка расплава от нежелательных примесей с помощью специальных технологических приемов. Полученный в таком совмещенном процессе поликристаллический антимионид индия служит исходным сырьем для последующего выращивания монокристаллов. Таким образом, разработанный нами метод представляет собой двухстадийный процесс, на первой стадии которого проводят синтез антимионид индия и выращивают на затравку особо чистый поликристалл, а на второй — выращивают на затравку монокристалл с заданными свойствами.

На рис. 3 приведен тепловой узел, который используется в двухстадийном процессе для получения поли- и монокристалла антимионид индия.

Как при синтезе соединения, так и при выращивании монокристалла в конструкцию теплового узла вводится фильтрующий тигель, обеспечивающий не только очистку расплава от механических загрязнений, но также и гомогенизацию образующегося соединения. Данная конструкция зарегистрирована на уровне «ноу-хау».

При сравнении отечественной технологии получения монокристаллов антимионид индия с технологией ведущих мировых производителей, таких как МТИ (США), Wafer Technology Ltd. (Великобри-

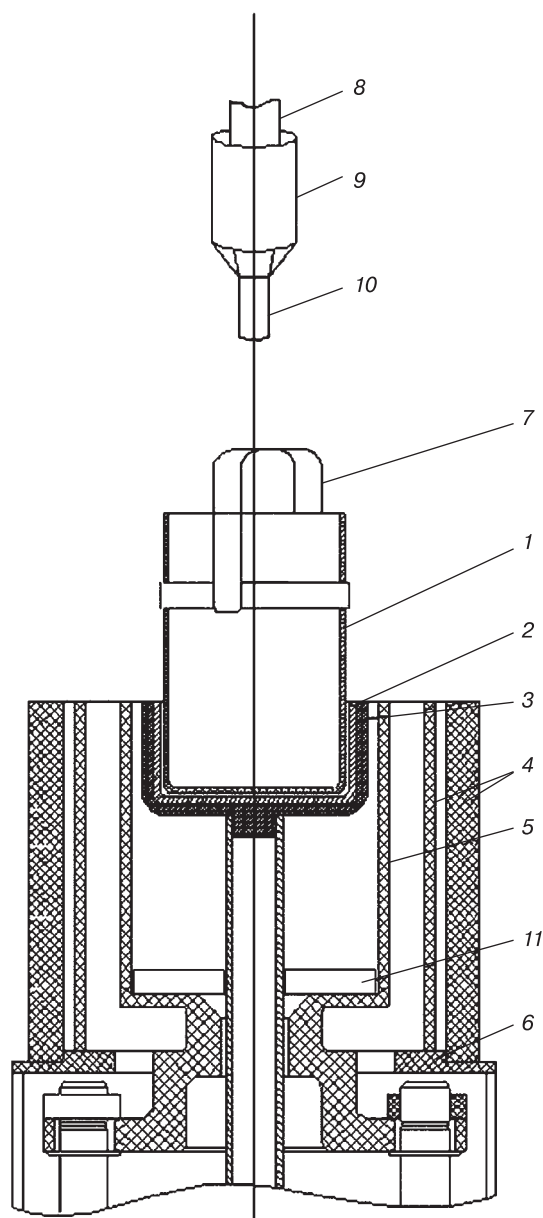


Рис. 3. Схема используемого теплового узла для синтеза и выращивания монокристаллов антимионид индия: 1 — фильтрующий тигель; 2 — рабочий тигель; 3 — графитовая подставка; 4 — вертикальный экран; 5 — нагреватель; 6 — наружный экран; 7 — коромысло; 8 — шток; 9 — графитовый затравкодержатель; 10 — монокристаллическая затравка InSb; 11 — теплоизолирующая прокладка

Fig. 3. Schematic of heating unit for synthesis and growth of single crystal indium antimonide: (1) filtering crucible, (2) working crucible, (3) graphite support, (4) vertical screen, (5) heater, (6) outer screen, (7) crossbeam, (8) rod, (9) graphite seed holder, (10) InSb single crystalline seed, (11) heat-insulating gasket

Таблица 1

Основные различия отечественной и зарубежной технологии выращивания монокристаллов антимонида индия

Key differences between Russian and foreign single crystal indium antimonide technologies

Характеристики процесса	Производители	
	АО «Гиредмет»	MTI, Wafer Technology Ltd., Xiamen Powerway Advanced Material Co., Ltd.
Метод выращивания	Модифицированный метод Чохральского	Метод Чохральского с жидкостной герметизацией расплава (LEC)
Атмосфера	Статический вакуум, без флюса	Аргон, флюс — борный ангидрид
Синтез	Совмещенный синтез и выращивание поликристалла на затравку	Синтез и очистка в отдельных процессах
Термообработка	Посткристаллизационная ступенчатая термообработка в установке выращивания	—
Кристаллографическое направление	<100>	<211>
Диаметр кристалла	>50 мм, >75 мм, >100 мм	>2" >3", >4", >5"

тания) и Xiamen Powerway Advanced Material Co., Ltd. (Китай) [14—16], следует отметить их существенные различия, которые приведены в табл. 1.

В табл. 1 показано, что разработанная в АО «Гиредмет» технология предусматривает синтез и выращивание монокристаллов антимонида индия в атмосфере статического вакуума без использования герметизирующего расплава флюса и избыточного давления аргона. При этом добавка в расплав небольшого количества Sb, сверх стехиометрического состава, компенсирует потери летучего компонента (Sb) и поддерживает стехиометрию выращиваемого кристалла. Как было показано на рис. 3, для очистки расплава используется фильтрующий тигель и исходные компоненты, чистотой не менее 6N. Существенным отличием является также и то, что выращивание монокристаллов антимонида индия проводится на затравочный кристалл, ориентированный в кристаллографическом направлении [100]. Выбор такого направления роста является целесообразным и экономически обоснованным, поскольку разработчики МФПУ используют в качестве рабочей поверхности пластины с ориентацией (100). Значительно сокращаются потери материала по сравнению с использованием монокристаллов с ориентацией оси роста [211] и изготовлением из них пластин с ориентацией (100).

Выращивание монокристаллов антимонида индия в кристаллографическом направлении [100] долгое время не приводило к положительному результату из-за чрезвычайно высокой склонности растущего кристалла к двойникованию. Использование теплового узла с минимальным набором вертикальных экранов и донно-боковым нагревателем (см. рис. 2), а также экспериментальный подбор динамических условий выращивания позволили создать необходимый осевой градиент температур

на фронте кристаллизации для роста кристалла на затравку, ориентированную в кристаллографическом направлении [100]. Согласно данным более ранней работы [17], осевые градиенты температур на фронте кристаллизации существенно различаются при выращивании монокристаллов в кристаллографических направлениях [100] и [211] и составляют 35—40 и 25—30 К/см соответственно. Кроме того, выращивание монокристаллов антимонида индия в таких условиях приводит к снижению в них плотности дислокаций (до $< 100 \text{ см}^{-2}$), однако, сохраняет значительные термические напряжения в кристалле, что является существенным при дальнейшей его обработке и разделении на пластины. Для снятия остаточных напряжений в выращенном монокристалле вторая стадия процесса завершалась посткристаллизационным отжигом, который проводился непосредственно в ростовой камере путем ступенчатого снижения температуры нагревателя по экспериментально подобранному режиму.

Выращивание монокристаллов антимонида индия модифицированным методом Чохральского и их исследование

По разработанной технологии был налажен выпуск монокристаллов антимонида индия диаметром >50 мм с параметрами по техническим заданиям заказчиков. С целью получения монокристаллов антимонида индия диаметром 100 мм в кристаллографическом направлении [100] модифицированным методом Чохральского был оптимизирован тепловой узел, отработаны режимы выращивания и посткристаллизационного отжига. Исследованы основные свойства полученных монокристаллов.

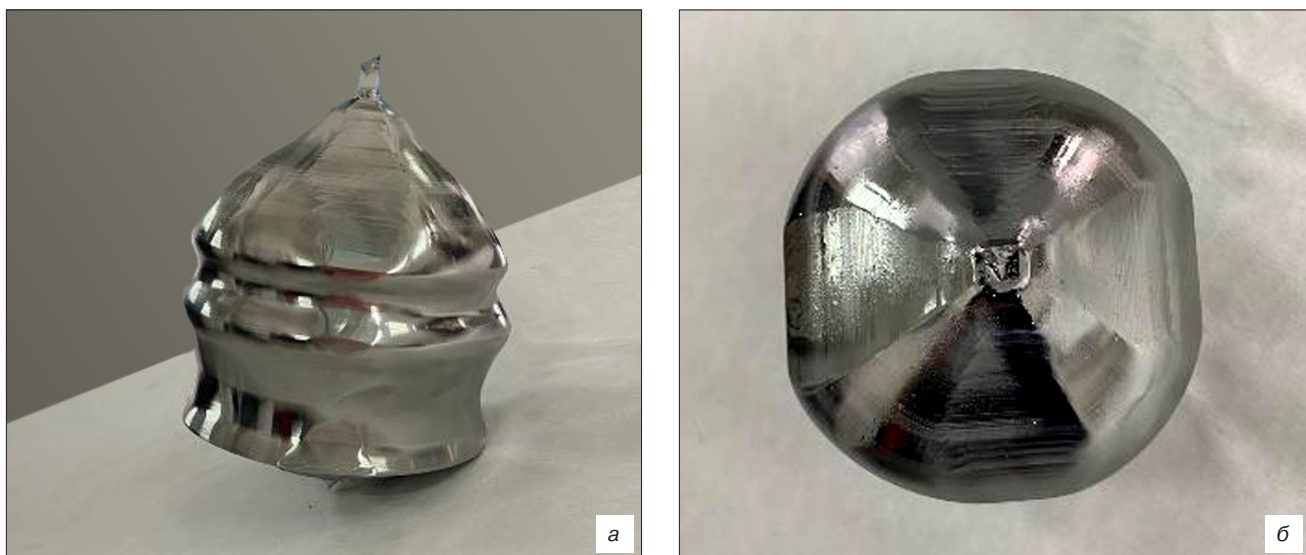


Рис. 4. Внешний вид монокристалла антимонида индия:
а — монокристалл диаметром 105 мм; б — огранка монокристалла, выращенного в кристаллографическом направлении [100]

Fig. 4. Appearance of indium antimonide single crystal:
(a) 105 mm diam. single crystal and (b) facets of [100] single crystal

Практика развития технологии получения соединений $A^{III}B^V$ [18, 19] показала, что переход к созданию больших и сверхбольших интегральных схем требует увеличения диаметра и улучшения структурного совершенства используемых в качестве подложек монокристаллов. При создании матричных фотоприемников нового поколения на основе антимонида индия подобные проблемы возникают и для этого материала. Для решения задачи по увеличению диаметра получаемых монокристаллов до 100 мм и более было увеличено печное пространство установки для выращивания монокристаллов InSb с 60 до 110 л, изготовлен тепловой узел под рабочий тигель диаметром 150 мм, увеличена загрузка исходного поликристалличе-

ского материала до 5 кг, вдвое увеличен размер затравочного кристалла. Отношение диаметра выращиваемого монокристалла к диаметру расплава составляло 0,66 и соответствовало расчетному интервалу 0,5—0,7. Экспериментально были подобраны тепловые и динамические условия роста монокристаллов антимонида индия диаметром более 100 мм и впервые в России были получены такие монокристаллы. На рис. 4 приведен внешний вид монокристалла антимонида индия диаметром более 100 мм, выращенного в кристаллографическом направлении [100].

На пластинах толщиной 1,5 мм, вырезанных из верхней и нижней частей монокристалла перпендикулярно к оси роста, проводили измерения

Таблица 2

Электрофизические параметры (при $T = 77$ K) и плотность дислокаций в образцах антимонида индия
77 K electrophysical parameters and EPD in indium antimonide specimens

Шифр образца	Толщина образца, мм	Тип проводимости	Концентрация основных носителей заряда, 10^{14} см^{-3}	Подвижность основных носителей заряда, $10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Плотность дислокаций N_d , см^{-2}
18-Н1	2,35	<i>n</i>	1,6	5,3	67
18-Н2	2,31	<i>n</i>	1,7	5,3	42
18-Н3	2,27	<i>n</i>	2,0	5,4	56
18-Н4	2,34	<i>n</i>	1,8	5,1	39
18-К1	2,37	<i>n</i>	7,7	3,4	80
18-К2	2,33	<i>n</i>	8,0	3,4	57
18-К3	2,30	<i>n</i>	7,9	3,2	79
18-К4	2,34	<i>n</i>	8,1	3,0	62

основных электрофизических параметров (табл. 2). При этом каждую пластину разделяли на 4 части по двум взаимно перпендикулярным диаметрам из-за ограничений измерительной аппаратуры. Методом Ван-дер-Пау измеряли коэффициент Холла и рассчитывали значения концентрации и подвижности основных носителей заряда в кристалле. Измерения проводили при температуре жидкого азота (77 К).

Полученные значения электрофизических свойств исследованных монокристаллов антимонида индия соответствуют стандартным параметрам нелегированного материала $n = 2 \cdot 10^{14} \pm 1,5 \cdot 10^{15}$ ($T = 77$ К) [20]. Следует отметить, что по своим электрофизическим свойствам пластины достаточно однородны. Содержание остаточных технологических примесей увеличивается к концу слитка, что соответствует коэффициенту их распределения < 1 .

С помощью оптического микроскопа на этих же сегментированных пластинах проводили исследования структурных дефектов и определяли плотность дислокаций путем подсчета ямок травления. На пластинах не обнаружено двойников, ламелей и выделений второй фазы, что свидетельствует о выращивании монокристаллов в оптимальных тепловых и динамических условиях.

В табл. 2 представлены результаты по плотности дислокаций, рассчитанной по ямкам травления. Результаты свидетельствуют, что плотность дислокаций в выращенных монокристаллах не пре-

вышает 100 см^{-2} и не отличается от плотности дислокаций в монокристаллах диаметром > 50 мм [20].

Заключение

По разработанной в АО «Гиредмет» технологии на основе модифицированного метода Чохральского впервые в России были получены монокристаллы антимонида индия диаметром более 100 мм с кристаллографической ориентацией [100].

Измерены электрофизические параметры полученных монокристаллов диаметром 100 мм и показано, что концентрация и подвижность носителей заряда соответствуют стандартным для нелегированного материала. Полученные данные свидетельствуют, что монокристаллы диаметром 100 мм отличаются высокой однородностью электрофизических параметров.

Исследованы структурные характеристики полученных монокристаллов. Установлено, что плотность дислокаций в них составляет менее 100 см^{-2} , что не превышает аналогичных значений в кристаллах диаметром > 50 мм. Распределение плотности дислокаций по сечению кристаллов однородно и незначительно увеличивается к периферии слитка. Двойники, ламели и выделения второй фазы в монокристаллах отсутствуют. В конечной части кристаллы имеют незначительное нарушение стехиометрии за счет длительного времени проведения процесса выращивания монокристаллов.

Библиографический список

1. Weiss E. Thirty years of HgCdTe technology in Israel. *SPIE Proc.: Infrared Technology and Applications XXXV*, 2009; 7298: 72982W. <https://doi.org/10.1117/12.818237>
2. Gershon G., Albo A., Eylon M., Cohen O., Calahorra Z., Brumer M., Nitzani M., Avnon E., Aghion I., Kogan I., Pan E., Tuito A., Ben Ezra M., Shkedy L. Large format InSb infrared detector with 10 μm pixels. *Proc. OPTRO. Paris*; 2014.
3. 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. Исследование структур InSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. *Успехи прикладной физики*. 2015; 3(6): 559—565.
4. Суханов М.А., Бакаров А.К., Протасов Д.Ю., Журавлёв К.С. AlInSb/InSb-гетероструктуры для ИК-фотоприемников, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. *Письма в Журнал технической физики*. 2020; 46(4): 3—6. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.04.49040.18055>
5. Алфимова Д.Л., Лунина М.Л., Лунина Л.С., Пашенко О.С., Пашенко А.С., Яценко А.Н. Влияние висмута на структурное совершенство упруго-напряженных эпитаксиальных слоев AlGaInSbBi, выращенных на подложках InSb. *Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2020; 8: 20—25. <https://doi.org/10.31857/S1028096020080038>
6. Наумов А. В., Попов В. К., Современные охлаждаемые фотоприемные устройства ИК-диапазона. Динамика рынка до и после пандемии. *Системы безопасности*. 2020; 3: 68—70. URL: <https://astrohn.ru/wp-content/uploads/2020/10/68-70.pdf>
7. Пономаренко В.П., Филачев А.М. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений (1946—2006). М.: Физматкнига; 2006. 334 с.
8. Brouk J., Alameh K., Nemirovsky Y. Design and Characterization of CMOS/SOI Image Sensors. *IEEE Transaction on Electron Devices*. 2007; 54(3): 468—475. <https://doi.org/10.1109/TED.2006.890585>
9. Давыгора А.П., Сыров Ю.В. InSbS₃ — новый представитель трубчатых кристаллов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2018; (11): 109—112. <https://doi.org/10.1134/S0207352818110094>
10. Mikhailova M.P., Andreev I.A. High-speed avalanche photodiode for the 2–5 μm spectral range. In: Krier A. (Eds) *Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics. Springer Series in Optical Sciences*, V. 118 London: Springer; 2006: 547—592. https://doi.org/10.1007/1-84628-209-8_17

11. Choi K.K., Monroy C., Swaminathan V., Tamir T., Leung M., Devitt J., Forrai D., Endres D. Optimization of corrugated-QWIPs for large format, high-quantum-efficiency, and multicolor FPAs. *SPIE Proc.:Infrared Technology and Applications XXXII. SPIE*. 2006; 6206: 62060B. <https://doi.org/10.1117/12.663960>
12. Furlong M.J., Dallas G., Meshew G., Flint J. P., Small D., Martinez B., Mowbray A. Growth and characterization of 6" InSb substrates for use in large-area infrared-imaging applications. *SPIE Proc.:Quantum Sensing and Nanophotonic Devices XI*. 2014; 8993: 89931J. <https://doi.org/10.1117/12.2042393>
13. Нашельский А.Я. Технология спецматериалов электронной техники: учеб пособие для вузов. М.: Металлургия; 1993. 368 с.
14. Wafer Technology Ltd. URL: <http://www.wafer-tech.co.uk/>
15. MTI Corporation. URL: <http://www.mtixtl.com/>
16. Xiamen Powerway Advanced Material Co, Ltd. URL: <https://www.powerwaywafer.com/compound-semiconductor.html>

17. Патент 2482228 C1 (RU). Способ получения крупногабаритных монокристаллов антимонида индия. В.С. Ежлов, А.Г. Мильвидская, Е.В. Молодцова, Г.П. Колчина, М.В. Меженный, В.Я. Резник, 2012. https://patents.s3.yandex.net/RU2482228C1_20130520.pdf
18. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. М.: Металлургия; 1984. 256 с.
19. Allen L.P., Flint P.J., Meschew G., Dallas G., Bakken D., Brown G.J., Khoshakhlagh A., Hill C.J. 100 mm diameter GaSb substrates with extended IR wavelength for advanced space-based applications. *SPIE Proc.: Infrared Technology and Applications XXXVII*, 2011; 8012: 801215. <https://doi.org/10.1117/12.882937>
20. Ежлов В.С., Мильвидская А.Г., Молодцова Е.В. Исследование свойств крупногабаритных монокристаллов антимонида индия, выращенных методом Чохральского в кристаллографическом направлении [100]. *Известия вузов. Материалы электронной техники*. 2012; (2): 13—17.

References

1. Weiss E. Thirty years of HgCdTe technology in Israel. *SPIE Proc.: Infrared Technology and Applications XXXV*, 2009; 7298: 72982W. <https://doi.org/10.1117/12.818237>
2. Gershon G., Albo A., Eylon M., Cohen O., Calahorra Z., Brumer M., Nitzani M., Avnon E., Aghion I., Kogan I., Ilan E., Tuito A., Ben Ezra M., Shkedy L. Large format InSb infrared detector with 10 μm pixels. *Proc. OPTRO*. Paris; 2014.
3. Burlakov I.D., Boltar K.O., Mirofyanchenko A.E., Vlasov P.V., Lopukhin A.A., Pryanikova E.V., Solov'ev A.N., Semenov A.N., Mel'tser B.Ya., Komissarova T.A., L'vova T.V., Ivanov S.V. Investigation of InSb structures grown by molecular beam epitaxy. *Uspekhi prikladnoi fiziki*. 2015; 3(6): 559—565. (In Russ.)
4. Sukhanov M.A., Bakarov A.K., Protasov D.Yu., Zhuravlev K. S. AlInSb/InSb heterostructures for IR photodetectors grown by molecular-beam epitaxy. *Tech. Phys. Lett.* 2020; 46: 154—157. <https://doi.org/10.1134/S1063785020020285>
5. Alfimova D.L., Lunina M.L., Lunin L.S., Pashchenko O.S., Pashchenko A.S., Yatsenko A.N. Bismuth effect on structural perfection of AlGaInSbBi elastic-strained epitaxial layers grown on InSb substrates. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, Sinkhrotronnye i Neitronnye Issledovaniya*. 2020; 8: 20—25. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S1028096020080038>
6. Naumov A.V., Popov V.K. Modern cooled photodetectors of the IR range. Market dynamics before and after the pandemic. *Security systems*, 2020; 3: 68—70. (In Russ.). <https://astrohn.ru/wp-content/uploads/2020/10/68-70.pdf>
7. Ponomarenko V.P., Filachev A.M. *Infrakrasnaya tekhnika i elektronnaya optika. Stanovlenie nauchnykh napravlenii (1946—2006)* [Infrared technology and electronic optics. Formation of scientific directions (1946—2006)]. Moscow: Fizmatkniga, 2006, 326 p. (In Russ.)
8. Brouk J., Alameh K., Nemirovsky Y. Design and Characterization of CMOS/SOI Image Sensors. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2007; 54(3): 468—475. <https://doi.org/10.1109/TED.2006.890585>
9. Davygora A.P., Syrov Y.V. InSbS₃: a new representative of tubular crystals. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, Sinkhrotronnye i Neitronnye Issledovaniya*. 2018; (11): 109—112. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0207352818110094>
10. Mikhailova M.P., Andreev I.A. High-speed avalanche photodiode for the 2–5 μm spectral range. In: Krier A. (Eds) *Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics. Springer Series in Optical Sciences*, V. 118 London: Springer; 2006: 547—592. https://doi.org/10.1007/1-84628-209-8_17
11. Choi K.K., Monroy C., Swaminathan V., Tamir T., Leung M., Devitt J., Forrai D., Endres D. Optimization of corrugated-QWIPs for large format, high-quantum-efficiency, and multicolor FPAs. *SPIE Proc.:Infrared Technology and Applications XXXII. SPIE*. 2006; 6206: 62060B. <https://doi.org/10.1117/12.663960>
12. Furlong M.J., Dallas G., Meshew G., Flint J. P., Small D., Martinez B., Mowbray A. Growth and characterization of 6" InSb substrates for use in large-area infrared-imaging applications. *SPIE Proc.:Quantum Sensing and Nanophotonic Devices XI*. 2014; 8993: 89931J. <https://doi.org/10.1117/12.2042393>
13. Nashelsky A.Ya. Technology of special materials of electronic equipment. Moscow: Metallurgiya; 1993. 368 p. (In Russ.)
14. Wafer Technology Ltd. URL: <http://www.wafer-tech.co.uk/>
15. MTI Corporation. URL: <http://www.mtixtl.com/>
16. Xiamen Powerway Advanced Material Co, Ltd. URL: <https://www.powerwaywafer.com/compound-semiconductor.html>
17. Патент 2482228 C1 (RU). Method for production of indium ammonide large-size monocrystals. V.S. Ezhlov, A.G. Milvidskaya, E.V. Molodtsova, G.P. Kolchina, M.V. Mezheny, V.Ya. Reznik, 2012. (In Russ.). https://patents.s3.yandex.net/RU2482228C1_20130520.pdf

18. Milvidsky M.G., Osvensky V.B. Structural defects in semiconductor single crystals. Moscow: Metallurgiya; 1984. 256 p. (In Russ.)

19. Allen L.P., Flint P.J., Meschew G., Dallas G., Bakken D., Brown G.J., Khoshakhlagh A., Hill C.J. 100mm diameter GaSb substrates with extended IR wavelength for advanced space-based applications. *SPIE Proc.: Infrared*

Technology and Applications XXXVII, 2011; 8012: 801215. <https://doi.org/10.1117/12.882937>

20. Ezhlov V.S., Milvidskaya A.G., Molodtsova E.V., Kolchina G.P., Mezhenyi M.V., Resnick V. Ya. Investigation on the properties of large [100]-oriented InSb single crystals grown by Czochralski method. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2012; (2): 13—17. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Козлов Роман Юрьевич — начальник лаборатории; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, Москва, 111524, Россия; e-mail: RYKozlov@rosatom.ru

Кормилицина Светлана Сергеевна — младший научный сотрудник; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, Москва, 111524, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2741-556X>; e-mail: kormilicina_0796@mail.ru

Молодцова Елена Владимировна — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, Москва, 111524, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2699-9524>

Журавлев Евгений Олегович — студент-практикант; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, Москва, 111524, Россия

Roman Yu. Kozlov — Head of the Laboratory; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (“Giredmet” JSC), 2 Elektrodная Str., Moscow 111524, Russia; e-mail: RYKozlov@rosatom.ru

Svetlana S. Kormilitsina — Junior Researcher; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (“Giredmet” JSC), 2 Elektrodная Str., Moscow 111524, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2741-556X>, e-mail: kormilicina_0796@mail.ru

Elena V. Molodtsova — Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (“Giredmet” JSC), 2 Elektrodная Str., Moscow 111524, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2699-9524>

Evgeny O. Zhuravlev — Trainee Student; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (“Giredmet” JSC), 2 Elektrodная Str., Moscow 111524, Russia

Поступила в редакцию 08.06.2021; поступила после доработки 26.06.2021; принята к публикации 28.06.2021

Received 8 June 2021; Revised 26 June 2021; Accepted 28 June 2021