

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ /
PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2024. Т. 27, № 1. С. 85—95.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202312.571

УДК 621.315.592:548.735

**Физические и технологические причины возникновения
канальной неоднородности в монокристаллах InSb,
сильнолегированных Те**

© 2024 г. Н. Ю. Комаровский^{1,2}✉, Ю. Н. Пархоменко², Е. В. Молодцова¹,
Е. О. Журавлев^{1,2}, В. А. Чупраков¹, Р. Ю. Козлов^{1,2}, С. Н. Князев¹, А. Г. Белов¹

¹АО «Государственный научно–исследовательский и проектный институт
редкометаллической промышленности «Гиредмет»,
Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация

✉ Автор для переписки: nickkomarovskiy@mail.ru

Аннотация. Модернизированным методом Чохральского в кристаллографических направлениях [100], [111] и [112] выращены монокристаллы InSb, легированные теллуром. Исследовано развитие канальной неоднородности, обусловленное низкой энергией активации захвата атомов Те плоскостями с высокой ретикулярной плотностью {111} в процессе роста кристалла. На основе метода Холла показано, что электрофизические параметры (концентрация свободных носителей заряда и их подвижность) в области канала и вне ее отличаются друг от друга на 10 и 22 % соответственно. Показано, что помимо кристаллографического направления выращивания на развитие канальной неоднородности большое влияние оказывают подбор технологических условий (скорости вращения затравки, тигля с расплавом, его заглужения и др.), а также конструкция теплового узла ростовой печи. Выявлено, что для получения востребованных на рынке микроэлектроники пластин InSb (111) оптимальным технологическим решением является разработка режима выращивания монокристаллов, позволяющего обеспечить ранний выход канальной неоднородности на периферию. Показано, что путем добавления дополнительных экранов в тепловой узел ростовой печи, понижая таким образом осевой градиент на фронте кристаллизации, удается достичь выхода канала на диаметр монокристалла на 4 см раньше обратного конуса.

Ключевые слова: антимонид индия, метод Чохральского, канальная неоднородность, кристаллографическая ориентация, метод Холла, плотность ямок травления

Для цитирования: Комаровский Н.Ю., Пархоменко Ю.Н., Молодцова Е.В., Журавлев Е.О., Чупраков В.А., Козлов Р.Ю., Князев С.Н., Белов А.Г. Физические и технологические причины возникновения канальной неоднородности в монокристаллах InSb, сильнолегированных Те. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2024; 27(1): 85—95. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202312.571>

Physical and technological causes of channel inhomogeneity in InSb single crystals heavily doped with Te

N. Yu. Komarovskiy^{1,2}✉, Yu. N. Parkhomenko², E. V. Molodtsova¹, E. O. Zhuravlev^{1,2},
V. A. Chuprakov¹, R. Yu. Kozlov¹, S. N. Knyazev¹, A. G. Belov¹

¹ *Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC),
2–1 Elektrodnaya Str., Moscow 111524, Russian Federation*

² *National University of Science and Technology MISIS,
4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation*

✉ Corresponding author: nickkomarovskiy@mail.ru

Abstract. InSb single crystals doped with tellurium have been grown by the modernised Czochralskii method in crystallographic directions [100], [111] and [112]. The development of channel inhomogeneity due to low activation energy of Te atoms capture by planes with high reticular density {111} in the process of crystal growth has been investigated. Based on the Hall method, it was shown that the electrophysical parameters, i.e., the concentration of free charge carriers and their mobility, in and outside the channel region differ from each other by 10 and 22%, respectively. It is shown that in addition to the crystallographic direction of growth, the development of channel inhomogeneity is greatly influenced by the selection of technological conditions (rotation speed of the seed, crucible with melt, its burial, etc.), as well as the design of the thermal unit of the growth furnace. It is revealed that to obtain InSb (111) wafers, which are in demand in the microelectronics market, the optimal technological solution is the development of single crystal growth mode, which allows to ensure early exit of channel inhomogeneity to the periphery. It is shown that by adding additional screens to the thermal unit of the growth furnace, thereby lowering the axial gradient at the crystallisation front, it is possible to achieve the channel exit to the single crystal diameter 4 cm earlier than the reverse cone.

Keywords: indium antimonide, Czochralskii method, facet effect, crystallographic orientation, Hall method, etch pit density

For citation: Komarovskiy N.Yu., Parkhomenko Yu.N., Molodtsova E.V., Zhuravlev E.O., Chuprakov V.A., Kozlov R.Yu., Knyazev S.N., Belov A.G. Physical and technological causes of channel inhomogeneity in InSb single crystals heavily doped with Te. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2024; 27(1): 85—95. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202312.571>

Введение

Антимонид индия по-прежнему остается наиболее востребованным материалом для изготовления на его основе фотоприемников (ФПУ) ИК-диапазона (3—5 мкм) [1—3]. В группе полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ антимонид индия занимает особое место и является модельным, поскольку получение монокристаллов особой чистоты с высоким структурным совершенством и хорошей однородностью свойств обеспечивается относительно простой современной технологией [4]. Монокристаллы антимонида индия выращивают методом Чохральского в трех кристаллографических направлениях [100], [111] и [211], что также выделяет его в группе соединений $A^{III}B^V$.

В приборных разработках чаще всего используются пластины антимонида индия с кри-

сталлографической ориентацией (100) и (111). В АО «Гиредмет» успешно выращиваются монокристаллы в направлении [100] диаметром от 50 до 100 мм, отвечающие требованиям заказчика по однородности электрофизических параметров и структурному совершенству.

В связи с развитием в России эпитаксиальных технологий все большее внимание уделяется использованию пластин с кристаллографической ориентацией (111), которая является наиболее плотноупакованной и полярной в кристаллической структуре типа ZnS . Однако выращивание монокристаллов антимонида индия, легированных Te, непосредственно в направлении [111] осложняется влиянием канальной неоднородности в кристалле при формировании грани (111) на фронте кристаллизации. Причиной ее возникновения является различие тангенциальных скоростей роста кри-

сталлографических плоскостей, что приводит к неравномерному захвату примесей. Необходимо отметить, что канальная неоднородность наблюдается и в кристаллах, выращенных в направлениях [100] и [112].

Один из способов устранения такой неоднородности — это выращивание монокристаллов на затравку с отклонением в несколько градусов, например, с кристаллографической ориентацией [211], но при этом резко снижается выход пластин с ориентацией (111), так как увеличиваются потери материала при их резке и обработке.

Изменение направления выращивания монокристаллов InSb обуславливает необходимость соблюдения кардинально других температурных градиентов на фронте кристаллизации, что неизбежно оказывает влияние и на структурные особенности монокристалла [5].

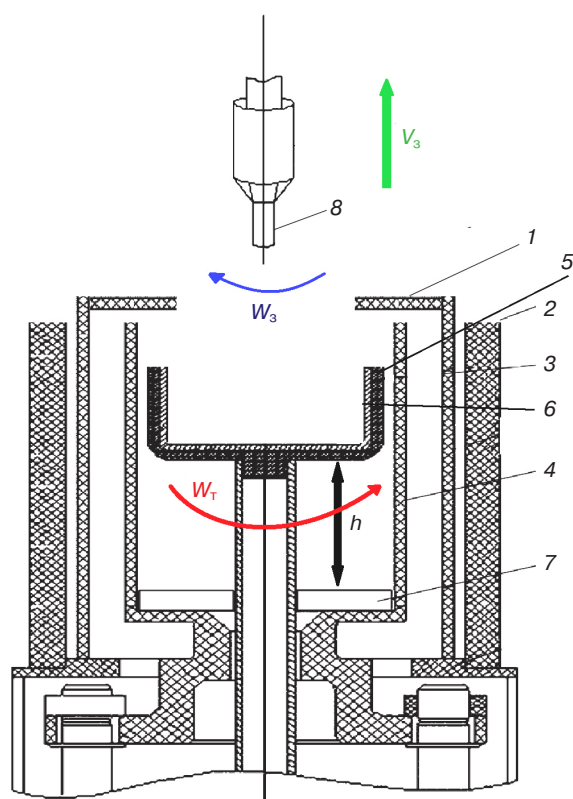


Рис. 1. Принципиальная схема теплового узла ростовой печи:

1 — горизонтальный экран; 2 — внешний вертикальный экран; 3 — внутренний вертикальный экран; 4 — нагреватель; 5 — подставка для тигля; 6 — рабочий тигель; 7 — теплоизолирующая прокладка; 8 — затравочный кристалл; V_3 — скорость перемещения затравочного кристалла; W_3 , W_t — частота вращения затравки и тигля с расплавом соответственно; h — глубина расположения тигля относительно теплового узла

Fig. 1. Schematic diagram of the thermal unit of a growth furnace: (1) horizontal screen, (2) external vertical screen, (3) internal vertical screen, (4) heater, (5) stand for crucible, (6) working crucible, (7) heat-insulating gasket, (8) seed crystal, V_3 is the speed of movement of the seed crystal, W_3 , W_t is rotation frequency of the seed and crucible with the melt, respectively, h is depth of crucible location relative to the thermal unit

Цель работы — исследование явления канальной неоднородности в монокристаллах InSb и поиск технологических решений по ее нивелированию с помощью корреляционного анализа результатов, полученных различными материаловедческими методами.

Образцы и методы исследования

С целью изучения формирования канальной неоднородности в монокристаллах InSb, выращенных в различных кристаллографических направлениях, нами был выбран вариант роста сильнолегированных Te монокристаллов с концентрацией свободных электронов ($n = 7 \cdot 10^{17} \div 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Для получения монокристаллов использовали синтезированную ранее загрузку из исходных компонентов: индия и сурьмы чистотой не менее 6N. Предварительно провели расчет концентрации и, следовательно, количества легирующей добавки. В качестве добавки использовали теллур, так как, согласно справочным данным [6], его фасеточный коэффициент равен 9.

Исходную загрузку помещали в фильтрующей тигель для дополнительной очистки расплава от механических загрязнений, из которого расплав в дальнейшем перетекал в рабочий тигель через отверстие в дне фильтрующего тигля.

Далее методом Чохральского выращивали монокристалл на затравку заданной кристаллографической ориентации. Основными изменяемыми параметрами являлись температура нагревателя, скорость вытягивания, а также частоты вращения затравки и тигля. На рис. 1 представлена принципиальная схема теплового узла ростовой печи.

Для поддержания устойчивого роста кристалла и нивелирования возможности возникновения различного рода дефектов (двойников, ламелей и пр.) необходимо создание строго определенных тепловых условий, которые не являются унифицированными и для проведения процесса в различных кристаллографических направлениях ([111], [100], [112] и др.) существенно отличаются друг от друга. Так, для процесса роста монокристаллов в направлении [111] необходимо создание меньших осевых температурных градиентов на фронте кристаллизации ΔT_0 , чем для [100]. Технологически это можно осуществить путем варьирования глубины расположения тигля с расплавом h и введения в тепловой узел дополнительного внутреннего вертикального экрана 3, а также за счет изменения W_3 и W_t . В случае роста в направлении [112] для обеспечения устойчивого роста кристалла необходимо также установить и горизонтальный экран 1, что приводит к увеличению радиального температурного градиента ΔT_r на фронте кристаллизации (табл. 1) [7].

Таблица 1 / Table 1

Осевые и радиальные температурные градиенты при выращивании монокристаллов InSb в различных кристаллографических направлениях
Axial and radial temperature gradients during the growth of InSb single crystals in various crystallographic directions

$[hkl]$	$\Delta T_o, \text{K/cm}$	$\Delta T_r, \text{K/cm}$
[100]	35—40	1
[112]	25—32	1,5
[111]	20—25	1,3

На основе классической модели, разработанной для элементарных полупроводников, можно утверждать, что [6]:

- $W_3 \downarrow, V_3 \uparrow, \Delta T_o \downarrow, \Delta T_r \uparrow$ приводит к более выпуклому фронту кристаллизации и менее выраженной огранке монокристалла, за счет более высокого вклада поверхностного натяжения расплава (σ);

– $W_3 \uparrow, V_3 \downarrow, \Delta T_o \downarrow, \Delta T_r \uparrow$ обуславливает более плоский фронт кристаллизации и более ярко выраженную огранку монокристалла.

На основе сказанного выше можно сделать вывод, что процесс огранки монокристалла при росте по методу Чохральского лимитируется результирующей силой двух одновременно идущих процессов: скруглением боковой поверхности за счет силы поверхностного натяжения расплава и различием в росте кристаллографических плоскостей с разной ретикулярной плотностью (рис. 2).

Из-за сложного механизма движения конвективных потоков расплава в процессе роста достаточно затруднительно постулировать какое-либо определенное влияние W_r . Можно предположить, что в целом повышение скорости вращения тигля приводит к выравниванию фронта кристаллизации, но механизм влияния этого параметра на огранку монокристаллов InSb на сегодняшний день недостаточно ясен.

Для предотвращения образования канальной неоднородности были использованы следующие приемы: изменение компоновки теплового узла,

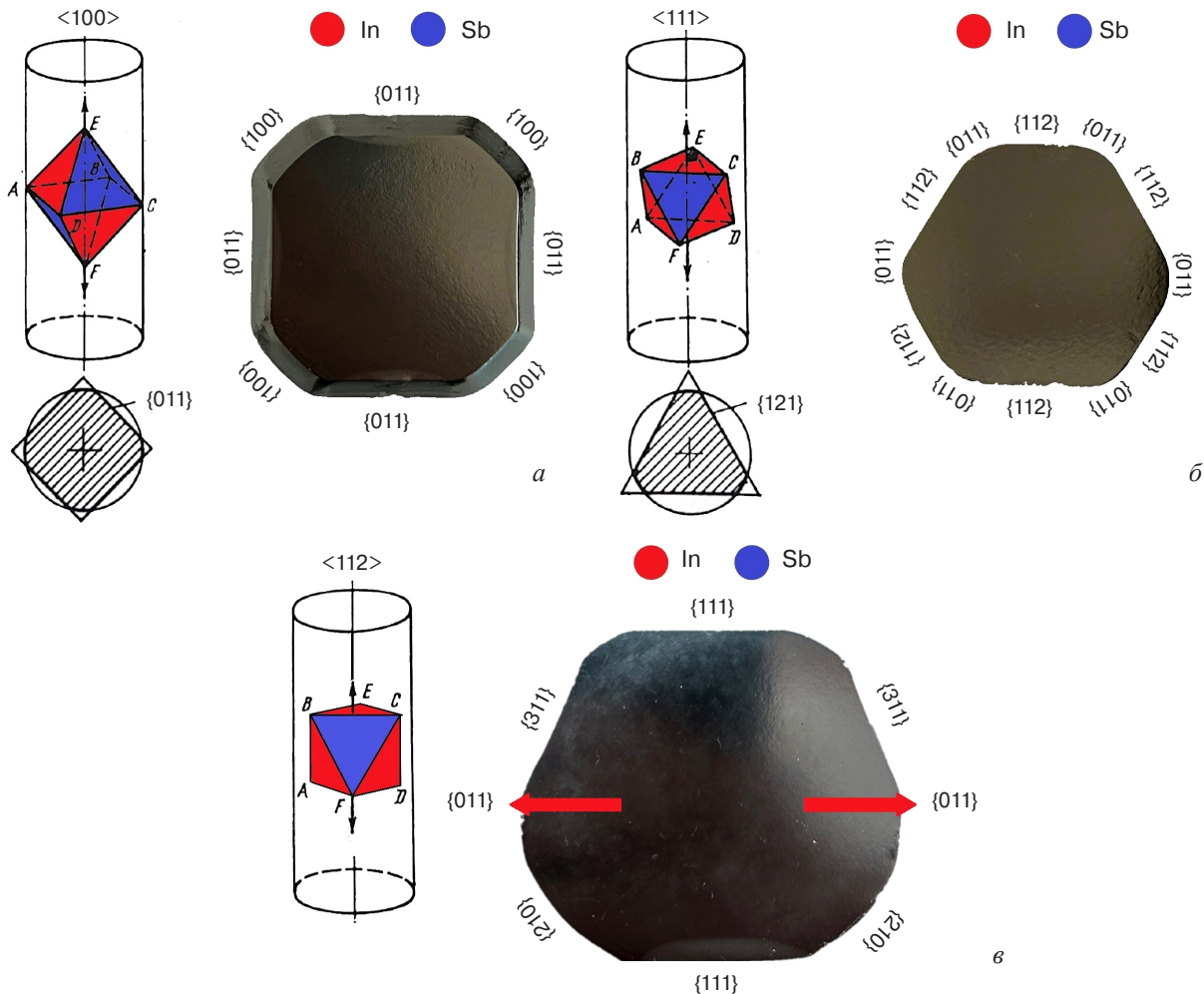


Рис. 2. Расположение плоскостей {111} относительно различных направлений выращивания монокристалла InSb:
а — <100>; б — <111>; в — <112>
Fig. 2. Location of {111} planes relative to different directions of growth of an InSb single crystal: (a) <100>, (б) <111>, (в) <112>

высоты подъема тигля относительно нагревателя, вращения затравочного кристалла и тигля.

Из выращенных монокристаллов вырезали контрольные пластины в различных частях слитка. Для направления $\langle 100 \rangle$ использовали контрольные пластины, вырезанные из цилиндрической части монокристалла, с начала и конца слитка, а также верхний конус, разрезанный вертикально, параллельно плоскости (110)

Из монокристалла, выращенного в направлении $\langle 111 \rangle$, было вырезано несколько контрольных пластин на верхнем конусе диаметром от 20 до 50 мм. Цилиндрическая часть монокристалла была разрезана посередине параллельно плоскости (110) для исследования места расположения канала и геометрии его выхода.

Для выявления дислокаций и канальной неоднородности все пластины и фрагменты монокристалла предварительно шлифовали на порошке М14—М20, далее проводили травление в травителе СР-4 в течение 5—7 с.

Испытания экспериментальных образцов на микротвердость проводили на микротвердомере Tukon 1102 при нагрузке от 100 до 1000 г и 50-кратном увеличении

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены монокристаллы InSb(Te), выращенные в различных кристаллографических направлениях.

Из рис. 3 видно, что в монокристаллах InSb, выращенных в направлениях [100] и [112], канальная неоднородность выражена лишь на периферии, и область ее формирования ограничивается верхним конусом слитка. В свою очередь, в выращенном при наименьшем осевом градиенте на

фронте кристаллизации монокристалле InSb (111) формируется ярко выраженная канальная неоднородность. Ее развитие можно разделить на следующие основные этапы:

- 1—2 — рост канала в условиях выхода кристалла на диаметр ($d/D = \text{const}$);
- 2—3 — рост монокристалла без значительного изменения его диаметра и диаметра канала ($d_2 \approx d_3$, $D_2 \approx D_3$, $d/D = \text{const}$);
- 3—4 — выход канала на диаметр монокристалла ($d_4 = D_4$).

Влияние канальной неоднородности на свойства монокристаллов InSb. Очевидно, что канальная неоднородность, в первую очередь, оказывает негативное влияние на однородность электрофизических параметров пластин InSb. На рис. 4 представлено положение квадратных образцов 1—3 на пластине InSb (100), отрезанной от верхнего конуса кристалла, на которых проводили измерения концентрации носителей заряда n , подвижности μ и удельного электрического сопротивления ρ методом Ван-Дер-Пау (табл. 2).

Разница в концентрации и подвижности носителей заряда на периферии (образцы 1 и 3) и в центре (образец 2) пластины составляет 10 и 22 % соответственно, что является значительной величиной.

В монокристаллах, выращенных в направлении [111], влияние канальной неоднородности на концентрацию свободных носителей заряда сохраняется по всей длине слитка. Так, при сравнении концентрации свободных носителей заряда в начале, середине и в конце монокристалла InSb (111) видно, что в момент разрастания канала количество Te в расплаве уменьшается, что отражается в изменении усредненной по пластине концентрации (табл. 3).

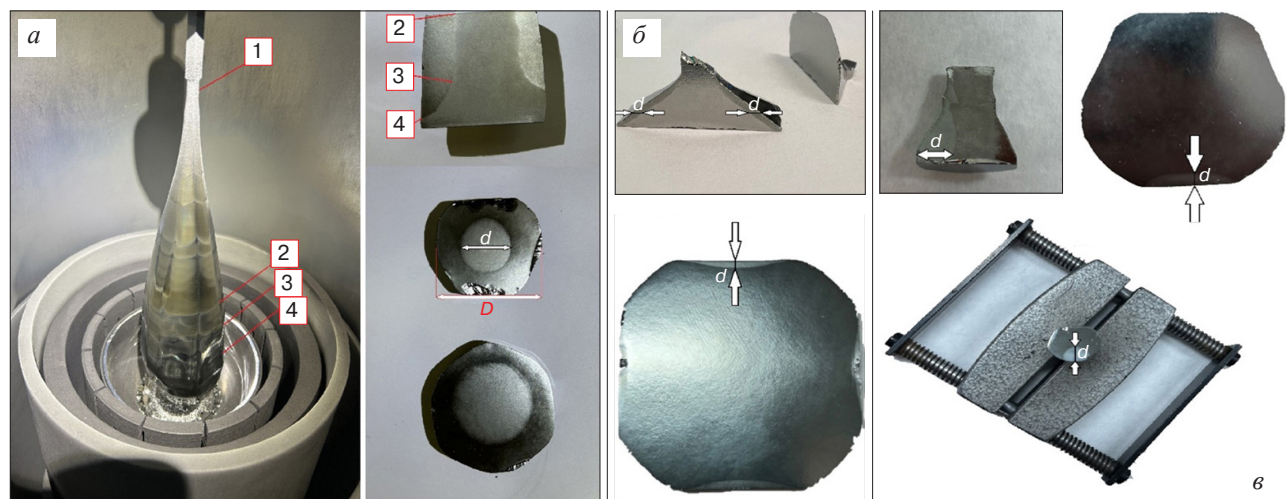


Рис. 3. Эффект канальной неоднородности в монокристаллах InSb, выращенных в различных кристаллографических направлениях: а — [111]; б — [100]; в — [112]

Fig. 3. Effect of channel inhomogeneity in InSb single crystals grown in different crystallographic directions: (a) [111], (б) [100], (в) [112]

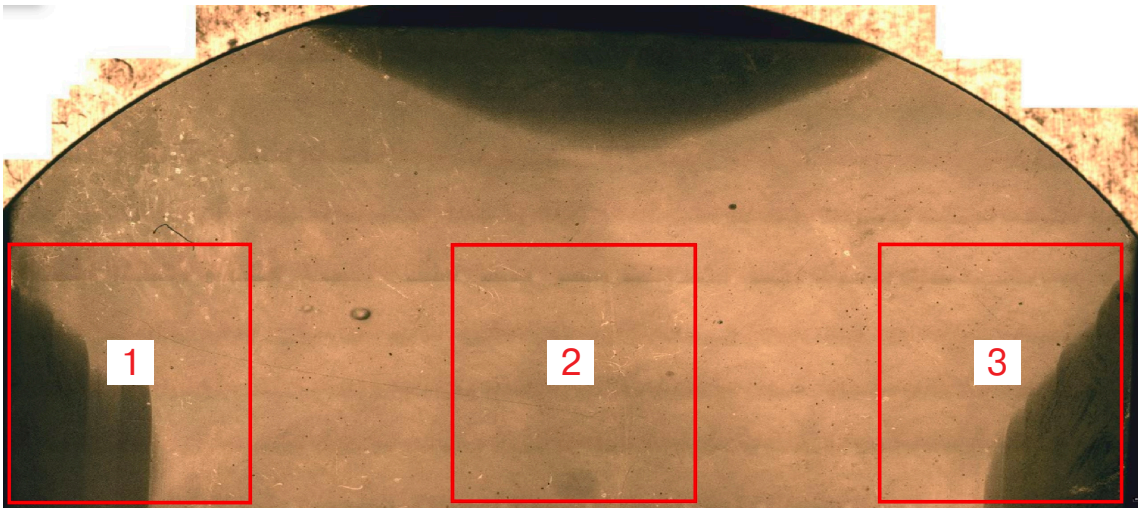


Рис. 4. Положение образцов 1—3 на пластине InSb (100)
Fig. 4. Position of samples 1—3 on the InSb (100) wafer

Таблица 2 / Table 2

Влияние канальной неоднородности на электрофизические параметры пластины InSb (100)
Effect of channel inhomogeneity on the electrical parameters of the InSb (100) wafer

Номер образца	n , 10^{17} см^{-3}	μ , $10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	ρ , $10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$
1	6,8	2,3	4,1
2	5,6	2,9	3,8
3	6,2	2,3	4,3

Таблица 3 / Table 3

Концентрация свободных носителей заряда в объеме пластин (111), вырезанных из различных участков монокристалла InSb [111]
Concentration of free charge carriers in the volume of (111) plates cut from different sections of InSb [111] single crystal

Монокристалл InSb [111]	n , см^{-3}
Начало	$9,8 \cdot 10^{17}$
Середина	$2,0 \cdot 10^{18}$
Конец	$7,1 \cdot 10^{17}$

Данная закономерность иллюстрирует еще один негативный фактор влияния канальной неоднородности — обеднение конца слитка свободными носителями заряда, что, в конечном итоге, может привести к несоответствию части кристалла заранее заданной марке.

Согласно данным работы [6], Те в InSb является упрочняющей примесью, что подтверждается различием в микротвердости, измеренной в канале

и вне его: $H_1 = 191 \pm 3,87$ и $H_2 = 184 \pm 2,52$ HV соответственно. Твердость монокристаллов полупроводников зачастую связывают с низкой плотностью дислокацией, что, с одной стороны, подтверждается низкой плотностью ямок травления в областях, соответствующих каналу, а с другой, согласно классической модели, активный захват примеси в процессы роста является причиной возникновения линейных дефектов [8]. В случае InSb можно выдвинуть предположение, что между концентрацией Те и плотностью дислокаций нет прямой зависимости. В то же время Те в составе ансамбля точечных дефектов вдоль линии дислокации оказывает влияние как на вероятность формирования в месте ее выхода ямки травления, так и на ее геометрические размеры (рис. 5).

Необходимо отметить, что анализ влияния концентрации теллура на геометрию и вероятность образования ямки травления на поверхности антимонида индия требует отдельного исследования.

Технологические аспекты нивелирования канальной неоднородности в монокристаллах InSb. Повышенный интерес к пластинам InSb с кристаллографической ориентацией (111) ставит в первую очередь технологическую задачу по нивелированию канальной неоднородности [9], решение которой имеет два основных вектора развития:

1. Рост монокристаллов в других направлениях ([112], [110], [100]), с последующей кристаллографической ориентацией;
2. Поиск технологических путей решения проблемы по нивелированию канальной неоднородности.

К ключевым недостаткам первого подхода можно отнести высокий расход материала, связанный с необходимостью резки кристалла под большими углами ($\angle[100] = 54,74^\circ$, $\angle[112]$, $\angle[110] = 35,26^\circ$), и трудности при нанесении фаски, направленной также и на корректировку эллипсообразной формы

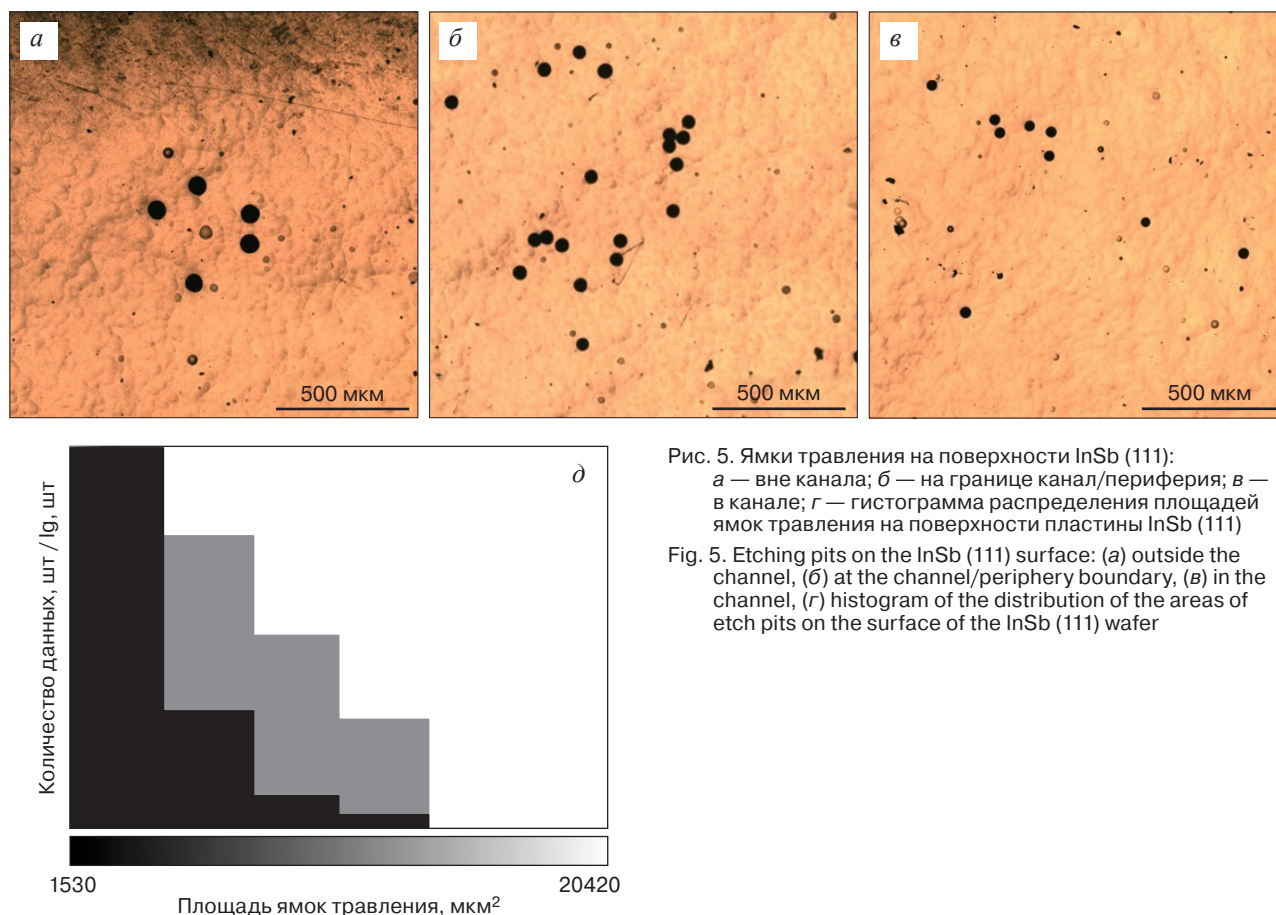


Рис. 5. Ямки травления на поверхности InSb (111): а — вне канала; б — на границе канал/периферия; в — в канале; г — гистограмма распределения площадей ямок травления на поверхности пластины InSb (111)

Fig. 5. Etching pits on the InSb (111) surface: (a) outside the channel, (б) at the channel/periphery boundary, (в) in the channel, (г) histogram of the distribution of the areas of etch pits on the surface of the InSb (111) wafer

пластин, что, в свою очередь, сказывается непосредственно на себестоимости готовой продукции. Необходимо отметить, что при резке под большими углами возникает эффект наведенной электрофизической неоднородности. Это обусловлено тем, что точки, образующие периферию пластин, по-разному удалены от затравочного кристалла и, следовательно, возникает градиент концентрации.

К трудностям, с которыми сопряжен поиск технологических путей решения этой проблемы, можно отнести тот факт, что обеспечение устойчивого роста монокристалла достигается путем строго определенных тепловых условий и параметров W_3 , V_3 , ΔT_0 , ΔT_r , изменение которых, помимо влияния на канальную неоднородность, сказывается непосредственно и на вероятности двойникования и образования субзеренной структуры.

Отметим, что канальная неоднородность обусловлена низкой энергией активации захвата примесных атомов плотноупакованными кристаллографическими плоскостями при их тангенциальном росте. Поэтому особый интерес вызывает изучение физических закономерностей процесса огранки, который также непосредственно связан с плоскостями {111} и является более широко освещенным в литературе [10, 11].

Однако нельзя однозначно утверждать, что между огранкой монокристалла и канальной не-

однородностью существует прямая корреляционная зависимость. Так, при выращивании InSb в направлении [111] на поверхности кристалла наблюдается ярко выраженная огранка, но форма канала (см. рис. 3, а) вырождается в круг. Эту закономерность можно объяснить тем, что на эффект канальной неоднородности параметры W_3 и W_T оказывают большее влияние, чем на огранку. В то же время монокристаллы, где эффект канальной неоднородности наименее выражен — InSb [100], имеют отчетливую огранку, из чего можно сделать вывод, что при сравнении режимов роста антимонида индия в различных направлениях следует обратить внимание на ключевые отличия в технологических параметрах, а не на достижение сходства кристаллов по критерию выраженности его граней.

Задача по нивелированию канальной неоднородности при выращивании в направлении [111] может иметь несколько путей решения. С одной стороны, можно стимулировать активный рост канала и его выход на диаметр монокристалла ($W_3 \downarrow$, $V_3 \uparrow$, $\Delta T_0 \downarrow$, $\Delta T_r \uparrow$, $d/D \rightarrow 1$), а с другой — можно попытаться избавиться от него, приблизив тепловые условия к тем, которые применяют при выращивании InSb в направлении [100] ($W_3 \uparrow$, $V_3 \downarrow$, $\Delta T_0 \uparrow$, $\Delta T_r \downarrow$, $d \rightarrow 0$). Экспериментальные результаты представлены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что изменение конструкции теплового узла ростовой печи оказывает прямое

Таблица 4 / Table 4

Технологические аспекты создания температурных градиентов на фронте кристаллизации при выращивании монокристаллов InSb(Te)

Technological aspects of creating temperature gradients at the crystallization front when growing InSb(Te) single crystals

№ п/п	Направление выращивания	Вертикальный экран	Горизонтальный экран	Положение тигля (h), мм	Выход канала
1	[111]	1	1	30	Обратный конус (о.к.)
2			1	25	Выше о.к. на 4 см
3			—	20	Выше о.к. на 2 см
4		2	—	20	Выше о.к. на 3 см
5	[112]	1	—	35	Канал не вышел
6			1	30	Верхний конус
7			—	35	Верхний конус

влияние на развитие эффекта канальной неоднородности:

- уменьшение осевых температурных градиентов на фронте кристаллизации ($\Delta T_o \downarrow$) за счет углубления тигля с расплавом ($h \downarrow$) (№ 1 и 2) или введения дополнительных экранов (№ 3 и 4) позволяет обеспечить ранний выход канала на диаметр монокристалла;
- в одних и тех же тепловых условиях канальная неоднородность для монокристаллов, выращенных в направлении [112] и [111] развивается принципиально по-разному, что согласуется с литературными данными; эта закономерность объясняется различным расположением проекций плоскостей {111} подрешетки индия и сурьмы на плоскость, перпендикулярную к направлению роста (см. рис. 2) [12];
- увеличение осевых градиентов на фронте кристаллизации ($\Delta T_o \uparrow$), осуществляемое за счет подъема тигля с расплавом ($h \uparrow$), позволяет сузить канал ($d \downarrow$) [13] (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что развитие эффекта канальной неоднородности для монокристалла InSb (111), выращенного при $\Delta T_o \uparrow$ имеет несколько характерных этапов. Разрастание канала на участках 1—2 и 3—4 ($d/D \uparrow$) и линейны рост на участке 2—3 происходит без значительного изменения диаметра слитка. На участке 4 в области эффекта канальной неоднородности возникает двойник. Необходимо отметить, что для кристаллов, растущих при больших ΔT_o вероятность двойникования заметно повышается, что связано с увеличением градиента термических напряжений $\Delta \sigma$ в процессе роста. В совокупности с пониженной энергией активации образования двойников при росте монокристаллов в направлении [111] дальнейшее повышение ΔT_o в рамках нивелирования канальной неоднородности может привести к

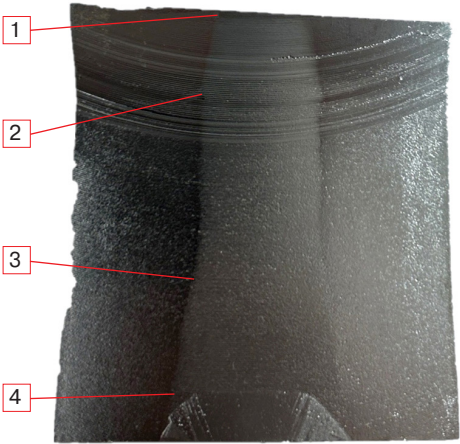


Рис. 6. Развитие эффекта канальной неоднородности в монокристалле InSb (111), выращенном при высоком осевом градиенте на фронте кристаллизации
Fig. 6. Development of the effect of channel inhomogeneity in an InSb (111) single crystal grown at a high axial gradient at the crystallization front

двойникованию и на более ранних стадиях роста антимида индия. Исследование этого физического явления и подбор технологических условий для устойчивого роста монокристаллов InSb при более высоких ΔT_o является предметом отдельного исследования.

Заклучение

Развитие эффекта канальной неоднородности в монокристаллах антимида индия, легированных теллуром, определяется совокупным влиянием выбора кристаллографического направления выращивания, схемой теплового узла ростовой печи и точностью подбора технологических условий процесса выращивания ($W_3, W_r, V_3, \Delta T_o, \Delta T_r$).

Изменение значений микротвердости в области канала и вне его ($H_1 = 191 \pm 3,87$ и $H_2 = 184 \pm 2,52$ HV) наглядно иллюстрирует роль тел-

лура как упрочняющей примеси. Анализ изменения линейных размеров ямок травления в области канала и вне его показал, что теллур также влияет на размер ямок и, как следствие, на вероятность их образования в местах выхода дислокаций на поверхность. Этот факт не позволяет однозначно утверждать, что механизм упрочнения InSb в областях с высокой концентрацией Те связан с низкой плотностью линейных дефектов.

Показано, что при выращивании InSb в направлении [111] можно управлять размером канальной неоднородности путем введения/выведения в тепловой узел печи вертикальных и горизон-

тальных экранов. Повышение осевых градиентов на фронте кристаллизации приводит к сужению канала ($d/D \downarrow$), тогда как его снижение — к более раннему выходу канала на торцевую поверхность монокристалла.

Получение пластин InSb (111) путем кристаллографической ориентации монокристаллов, выращенных в направлениях [100] и [112], позволяет уйти от эффекта канальной неоднородности, но вносит существенные «наведенные» градиенты концентрации ($\angle[100] = 54,74^\circ$, $\angle[112] = 35,26^\circ$), связанные с коэффициентом распределения теллура в теле слитка и является экономически невыгодным.

Библиографический список

1. Weiss E. Thirty years of HgCdTe technology in Israel. In: *Proceed. conf. SPIE Defense, Security, and Sensing. Orlando, Florida, United States. Vol. 7298. Infrared Technology and Applications XXXV*; 2009: 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. In: *Proceed. 6th Inter. symp. on optronics in defence and security. Optro. Paris, France. January 28, 2014*; 2014: 2931891.
3. Алфимова Д.Л., Лунина М.Л., Лунин 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>
4. Ежлов В.С., Мильвидская А.Г., Молодцова Е.В., Колчина Г.П., Меженный М.В., Резник В.Я. Исследование свойств крупногабаритных монокристаллов антимонида индия, выращенных методом Чохральского в кристаллографическом направлении [100]. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2012; (2): 13—17. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2012-2-13-17>
5. Кормилицина С.С., Молодцова Е.В., Комаровский Н.Ю., Козлов Р.Ю., Журавлев Е.О. Особенности роста монокристаллов антимонида индия в кристаллографических направлениях [100], [211], [111]. В: Сб. тезисов 2-й Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти академика Н.П. Сажина «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение» («РЕДМЕТ-2022»). Москва, 23–25 ноября 2022 г. М.: Научные технологии; 2022. С. 166—168.
6. Нашельский А.Я. Технология полупроводниковых материалов. М.: Металлургия; 1987. 334 с.
7. Комаровский Н.Ю., Молодцова Е.В., Белов А.Г., Гришечкин М.Б., Козлов Р.Ю., Кормилицина С.С., Журавлев Е.О., Нестюркин М.С. Исследование монокристаллов антимонида индия, полученных модернизированным методом Чохральского в различных кристаллографи-
- ческих направлениях. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2023; 89(8): 38—46. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-8-38-46>
8. Комаровский Н.Ю., Молодцова Е.В., Трофимов А.А., Кормилицина С.С., Улькаров В.А., Нестюркин М.С., Зареченская А.А., Цареградцев Д.О. Исследование зависимости прочностных характеристик монокристаллического InSb от кристаллографической ориентации и условий роста. *Прикладная физика*. 2023; (3): 63—72. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-3-63-72>
9. Dong J.T., Inbar H.S., Pendharkar M., Schijndel A.J., Young E.C., Dempsey C.P., Palmstrom C.J. Electronic structure of InSb (001), (110), and (111) B surfaces. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2023; 41(3): 032808. <https://doi.org/10.1116/6.0002606>
10. Merrell J.L., Gray N.W., Bolke J.G., Merrell A.N., Prax A.G., Demke J., Gossett N. Enabling on-axis InSb crystal growth for high-volume wafer production: characterizing and eliminating variation in electrical performance for IR focal plane array applications. In: *Proceed. SPIE. Vol. 9819. Infrared technology and applications XLII*; 2016: 981915. <https://doi.org/10.1117/12.2223956>
11. Gray N.W., Perez-Rubio V., Bolke J.G., Alexander W.B. Interface and facet control during Czochralski growth of (111) InSb crystals for cost reduction and yield improvement of IR focal plane array substrates. In: *Proceed. SPIE. Vol. 9220. Infrared sensors, devices, and applications IV*; 2014: 922003. <https://doi.org/10.1117/12.2061973>
12. Волков Д.А., Фистуль В.И. Топологическая оценка вероятности образования собственных точечных дефектов в кристаллах $A^{III}B^V$ со структурой сфалерита. *Физика и техника полупроводников*. 1990; 24(3): 475—478.
13. Жарикова Е.В., Молодцова Е.В., Козлов Р.Ю., Завражин Д.А., Титоров В.В., Кормилицина С.С., Князев С.Н. Исследование влияния условий выращивания на структуру крупногабаритных монокристаллов антимонида индия, полученных методом Чохральского. В: Сб. материалов 5-го Междисциплинар. науч. форума с междунар. участием «Новые материалы и перспективные технологии». Москва, 30 октября – 01 ноября 2019 г. Т. II. М.: Ителлект-уальные системы; 2019. С. 440—443.

References

1. Weiss E. Thirty years of HgCdTe technology in Israel. In: *Proceed. conf. SPIE Defense, Security, and Sensing. Orlando, Florida, United States. Vol. 7298. Infrared Technology and Applications XXXV*; 2009: 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. In: *Proceed. 6th Inter. symp. on optronics in defence and security. Optro. Paris, France. January 28, 2014; 2014*: 2931891.
3. 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. *Poverhnost'. rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya*. 2020; (8): 20—25. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S1028096020080038>
4. 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 Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2012; (2): 13—17. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2012-2-13-17>
5. Kormilitsina S.S., Molodtsova E.V., Komarovskiy N.Yu., Kozlov R.Yu., Zhuravlev E.O. Growth features of indium antimonide single crystals in crystallographic directions [100], [211], [111]. In: *Coll. thesis of the 2nd Int. scient.-pract. conf., dedicated to the memory of Academician N.P. Sazhin "Rare metals and materials based on them: technologies, properties and applications" ("REDMET-2022"). Moscow, November 23–25, 2022*. Moscow: Nauchnye tekhnologii; 2022. P. 166—168. (In Russ.)
6. Nashel'skii A.Ya. Technology of semiconductor materials. Moscow: Metallurgiya; 1987. 334 p. (In Russ.)
7. Komarovskiy N.Yu., Molodtsova E.V., Belov A.G., Grishechkin M.B., Kozlov R.Yu., Kormilitsina S.S., Zhuravlev E.O., Nestyurkin M.S. Study of indium antimonide single crystals obtained by the modernized Chokhralsky method in several crystallographic directions. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2023; 89(8): 38—46. (In Russ.). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-8-38-46>
8. Komarovskiy N.Yu., Molodtsova E.V., Trofimov A.A., Kormilitsina S.S., Ul'karov V.A., Nestyurkin M.S., Zarechenskaya A.A., Tsaregradtsev D.O. Study of dependence of strength characteristics of single-crystal InSb on crystallographic orientation and growth conditions. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*. 2023; (3): 63—72. (In Russ.). <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-3-63-72>
9. Dong J.T., Inbar H.S., Pendharkar M., Schijndel A.J., Young E.C., Dempsey C.P., Palmstrom C.J. Electronic structure of InSb (001), (110), and (111) B surfaces. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2023; 41(3): 032808. <https://doi.org/10.1116/6.0002606>
10. Merrell J.L., Gray N.W., Bolke J.G., Merrell A.N., Prax A.G., Demke J., Gossett N. Enabling on-axis InSb crystal growth for high-volume wafer production: characterizing and eliminating variation in electrical performance for IR focal plane array applications. In: *Proceed. SPIE. Vol. 9819. Infrared technology and applications XLII; 2016*: 981915. <https://doi.org/10.1117/12.2223956>
11. Gray N.W., Perez-Rubio V., Bolke J.G., Alexander W.B. Interface and facet control during Czochralski growth of (111) InSb crystals for cost reduction and yield improvement of IR focal plane array substrates. In: *Proceed. SPIE. Vol. 9220. Infrared sensors, devices, and applications IV; 2014*: 922003. <https://doi.org/10.1117/12.2061973>
12. Volkov D.A., Fistul V.I. Topological assessment of the probability of formation of intrinsic point defects in III–V crystals with a sphalerite structure. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 1990; 24(3): 475—478. (In Russ.)
13. Zharikova E.V., Molodtsova E.V., Kozlov R.Yu., Zavrazhin D.A., Titorov V.V., Kormilitsina S.S., Knyazev S.N. Investigation of the influence of growing conditions on the structure of large-sized single crystals of indium antimonide obtained by the Czochralskii method. In: *Collection. proceed. of the 5th Interdisciplinary. scient. forum with inter. participation "New materials and advanced technologies". Moscow, October 30 – November 1, 2019. Vol. II*. Moscow: Intellektual'nye sistemy; 2019. P. 440—443. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Комаровский Никита Юрьевич — научный сотрудник, АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; научный сотрудник, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7869-7886>; e-mail: nickkomarovskiy@mail.ru

Пархоменко Юрий Николаевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, научный руководитель, кафедра материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1970-9867>; e-mail: parkh@rambler.ru

Молодцова Елена Владимировна — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2699-9524>; e-mail: evmol@bk.ru

Nikita Yu. Komarovskiy — Researcher, Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2–1 Elektrodnaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; Researcher, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7869-7886>; e-mail: nickkomarovskiy@mail.ru

Yuri N. Parkhomenko — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Scientific Consultant, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics; National University of Science and Technology MISIS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1970-9867>; e-mail: parkh@rambler.ru

Elena V. Molodtsova — Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2–1 Elektrodnaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2699-9524>; e-mail: evmol@bk.ru

Журавлёв Евгений Олегович — студент–практикант; АО «Государственный научно–исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; e–mail: EOZhuravlev@yandex.ru

Чупраков Виктор Александрович — инженер 1–ой категории, АО «Государственный научно–исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация

Козлов Роман Юрьевич — начальник лаборатории; АО «Государственный научно–исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; e–mail: RYKozlov@rosatom.ru

Князев Станислав Николаевич — канд. техн. наук, начальник лаборатории высокотемпературных полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$; АО «Государственный научно–исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0002-2580-1707>; e–mail: stnknyazev@rosatom.ru

Белов Александр Георгиевич — канд. физ.–мат. наук, ведущий научный сотрудник; АО «Государственный научно–исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», ул. Электродная, д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; e–mail: IADenisov@rosatom.ru

Evgeny O. Zhuravlev — Trainee Student; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2–1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; National University of Science and Technology MISIS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; e–mail: EOZhuravlev@yandex.ru

Victor A. Chuprakov — Engineer 1st Category, Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2–1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation

Roman Yu. Kozlov — Head of the Laboratory; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2–1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; National University of Science and Technology MISIS, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; e–mail: RYKozlov@rosatom.ru

Stanislav N. Knyazev — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of High–Temperature Semiconductor Compounds $A^{III}B^V$; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2–1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2580-1707>; e–mail: stnknyazev@rosatom.ru

Aleksandr G. Belov — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Leading Researcher; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2–1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; e–mail: IADenisov@rosatom.ru

Поступила в редакцию 29.12.2023; поступила после доработки 28.02.2024; принята к публикации 05.03.2024
Received 29 December 2023; Revised 28 February 2024; Accepted 5 March 2024