

УДК 538.915  
EDN: YAVKFZ

PACS: 81.15.Hi

## Оптические и электрофизические свойства барьерно-диодной гетероструктуры на основе InSb

К. А. Савин, И. И. Минаев, А. В. Клековкин, Г. Н. Ерошенко, В. С. Кривобок,  
С. Н. Николаев, А. Е. Гончаров, А. А. Пручкина, Д. А. Пашкеев, Д. Е. Свиридов

*Методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках InSb(100) получена барьерно-диодная ( $nВп$ ) структура с униполярным барьером  $In_{0,8}Al_{0,2}Sb$ . Кристаллическое совершенство структуры и её соответствие номинально заложенному дизайну подтверждено с помощью рентгеноструктурного анализа. Электронная подсистема полученной  $nВп$ -структуры охарактеризована с помощью измерений микроскопии растекания тока на сколе (011).*

*Ключевые слова:* микроскопия сопротивления растекания, молекулярно-пучковая эпитаксия, ИК фотодетектор, InSb, барьерно-диодные гетероструктуры.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-53-56

### Введение

Барьерно-диодная архитектура фоточувствительных элементов (ХВп в англоязычной

литературе) широко применяется в ИК фотоприемных устройствах (ФПУ) на основе твердых растворов In(As)Sb [1], сверхрешеток InAs/GaSb [2] и сверхрешеток InAs/InAsSb [3]. Данная архитектура позволяет существенно снизить объемные темновые токи, связанные с механизмом Шокли-Рида-Холла [4, 5] и, таким образом, обеспечивает повышение рабочей температуры прибора. Барьерно-диодные структуры  $nВп$ -типа, являющиеся частным случаем ХВп-архитектуры, состоят из поглощающего слоя с  $n$ -типом проводимости, барьерного слоя блокирующего электроны, и верхнего контактного слоя, также имеющего  $n$ -тип проводимости.

Фототок обеспечивается неосновными носителями (дырками), которые создаются при поглощении излучения, и могут свободно перемещаться в валентной зоне.

Простейшим типом  $nВп$ -гетероструктур для среднего ИК-диапазона являются гетероструктуры InSb/InAlSb/InSb в которых роль униполярного барьера играет слой InAlSb. Получение гетероструктур данного типа методом молекулярно-пучковой эпитаксии и исследование их электронной подсистемы является основной целью настоящей работы.

Савин Константин Антонович<sup>1</sup>, н.с., к.ф.-м.н.  
Минаев Илья Иванович<sup>1</sup>, м.н.с., аспирант.  
Клековкин Алексей Владимирович<sup>1</sup>, м.н.с.  
Ерошенко Григорий Николаевич<sup>1</sup>, м.н.с., аспирант.  
Кривобок Владимир Святославович<sup>1,2</sup>, в.н.с, д.ф.-м.н.  
E-mail: kolob7040@gmail.com

Николаев Сергей Николаевич<sup>1</sup>, с.н.с., к.ф.-м.н.  
Гончаров Андрей Евгеньевич<sup>3</sup>, инженер I кат.  
Пручкина Анна Артемовна<sup>1</sup>, н.с., к.ф.-м.н.  
Пашкеев Дмитрий Александрович<sup>1</sup>, н.с., к.ф.-м.н.  
Свиридов Дмитрий Евгеньевич<sup>1</sup>, н.с., к.ф.-м.н.

<sup>1</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.  
Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 53.  
<sup>2</sup> Московский физико-технический институт.  
Россия, 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

<sup>3</sup> АО «НПО «Орион».  
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 18.06.2024

После доработки 1.07.2024

Принята к публикации 9.07.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Савин К. А., Минаев И. И., Клековкин А. В.,  
Ерошенко Г. Н., Кривобок В. С., Николаев С. Н.,  
Гончаров А. Е., Пручкина А. А., Пашкеев Д. А.,  
Свиридов Д. Е., 2024

## Результаты

Серия  $n\text{Вн}$ -структур была получена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках  $\text{InSb}$  (100) с  $n$ -типом проводимости. Для эпитаксиального выращивания использовалась установка Riber Compact-21T. Барьерный слой структур состоял из  $\text{In}_{0,8}\text{Al}_{0,2}\text{Sb}$  толщиной 70 нм, фоточувствительный слой – из  $\text{InSb}$  толщиной 1 мкм, нижний и верхний контактные слои – из  $\text{InSb}$  толщиной 400 и 200 нм соответственно. Контактные и фоточувствительные слои легировались теллуром в различных концентрациях –  $10^{17}$  и  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  соответственно. Данные концентрации и тип проводимости были подтверждены с помощью холловских измерений. В процессе эпитаксиального роста осуществлялся in-situ контроль реконструкции поверхности. Тип реконструкции, на всех этапах роста, включая рост барьерного слоя был  $(1 \times 3)$ , см. рисунок 1.

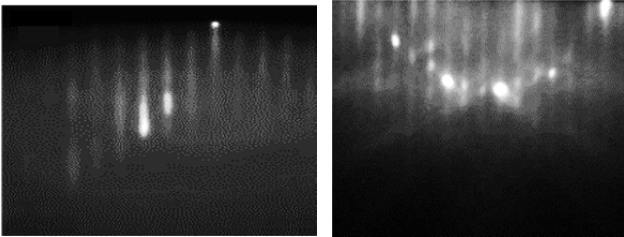


Рис. 1. Реконструкция поверхности  $(1 \times 3)$ , полученная с помощью ДБЭ при эпитаксиальном росте  $\text{InSb}$

Характерное АСМ изображение поверхности полученной  $n\text{Вн}$ -структуры продемонстрировано на рисунке 2, видны террасы послойного роста (вертикальные линии) и следы отдельных дислокаций несоответствия (горизонтальные линии), предположительно возникающих в барьерном слое, за счет наличия в нем напряжений. На поверхности образцов отсутствуют видимые дефекты, средняя шероховатость поверхности слоев не превышала 0,24 нм, что существенно ниже одного монослоя и говорит об атомарной гладкости поверхности.

Параметры слоев в структурах были подтверждены на основе измерений рентгеновских кривых качания и их последующего моделирования. Так на рисунке 3 представлены рентгеновские кривые качания  $n\text{Вн}$ -структуры, где кривая 1 – экспериментальные

данные, кривая 2 – расчетные для структуры с барьером  $\text{In}_{0,8}\text{Al}_{0,2}\text{Sb}$  толщиной 66 нм. На кривых можно видеть дифракционные пики, соответствующие антимиониду индия и материалу барьерного слоя ( $\text{In}_{0,8}\text{Al}_{0,2}\text{Sb}$ ). Их положения совпадают с рассчитанными.

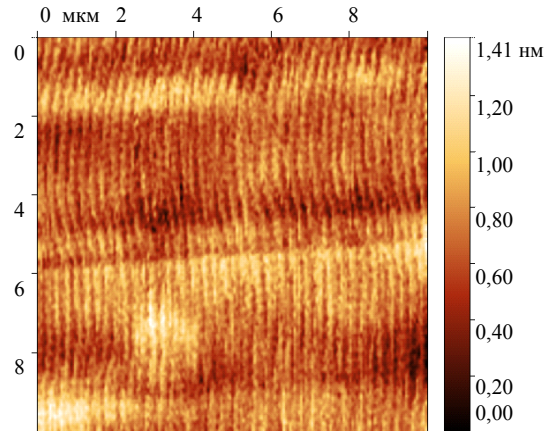


Рис. 2. АСМ изображение поверхности структуры

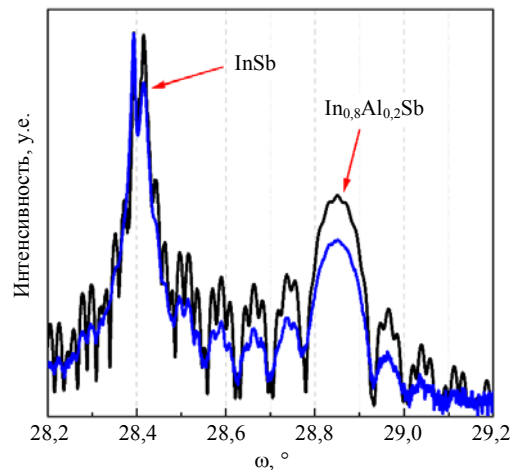


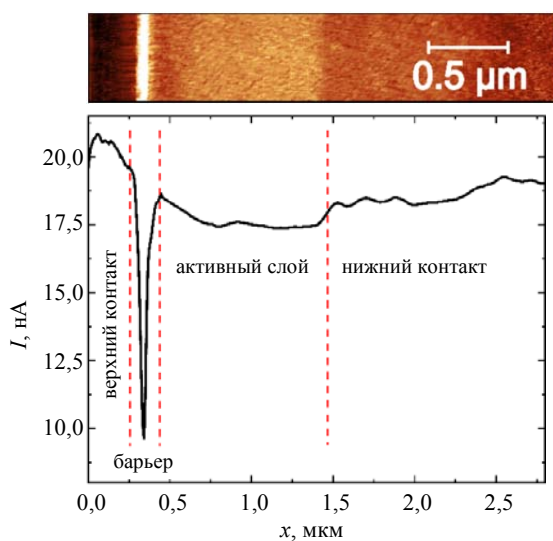
Рис. 3. Рентгеновская кривая качания: синяя кривая – экспериментальные данные, черная кривая – расчетные данные для структуры с барьером  $\text{In}_{0,8}\text{Al}_{0,2}\text{Sb}$  толщиной 66 нм

Измерения в режиме микроскопии сопротивления растекания проводились с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47 Pro (NTMDT) при комнатной температуре в атмосферных условиях. Все измерения были приведены на свежеприготовленных сколах структуры вдоль плоскости  $(110)$ . В работе использовались кремниевые зонды с алмазным проводящим покрытием легированным бором (DCP30). Сила прижатия зонда к образцу составляла  $\sim 1000$  нН. Второй контакт осуществлялся посредством нанесения жидкой  $\text{InGa}$  эвтектики на свежесколотую по-

верхность. Постоянное смещение прикладывалось к этому контакту, зонд заземлялся.

На рисунке 4 сверху представлена характерная двумерная карта сопротивления растекания для *nVn*-архитектуры, полученная при напряжении  $U = 4$  мВ. Для наглядности, на рисунке 4 снизу приведена усредненная зависимость силы тока от положения зонда на поверхности скола в направлении роста структуры.

Наблюдается ожидаемый контраст в барьерной области, что подтверждает высокое сопротивление барьерного слоя структуры. Также можно выделить различия в контактном и поглощающем слоях по величине тока. Это происходит из-за разной степени легирования в эпитаксиальных слоях. В тоже время эффекты, связанные с закорачиванием барьера из-за возможной сегрегации материала во время эпитаксиального роста, не регистрируются. Номинально заложенные толщины слоев совпадают с данными рентгеноструктурного анализа, см. рисунок 3.



**Рис. 4.** Сверху – двумерная карта микроскопии сопротивления растекания для барьерно-диодной структуры *InSb/InAlSb*; снизу – усредненный профиль двумерной карты

Как видно из рисунка 4, несмотря на номинально одинаковую закладываемую концентрацию в контактных слоях, проводимость у верхнего и нижнего контакта заметно отличается. Мы связываем данный эффект с изменением положения уровня Ферми в приповерхностной области из-за поверхностных состояний. Особенностью поверхности (100)

с характерной реконструкцией ( $1 \times 3$ ) является формирование тамовских уровней вблизи дна зоны проводимости [6]. При комнатной температуре данные уровни, являются источником электронов, что и приводит к заметному росту проводимости в приповерхностных слоях, включая контактные.

Помимо резкого контраста проводимости в приповерхностных слоях, на рисунке 4 наблюдается плавное уменьшение проводимости при движении зонда от верхнего контакта к фоточувствительной области. Данный эффект однозначно указывает на заметный изгиб зон в окрестности барьерного слоя. Данный изгиб следует принимать во внимание при оптимизации фотоэлектрических параметров *XVn*-гетероструктур.

### Заключение

Таким образом, методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке *InSb* выращены свободные от пластической релаксации *XVn*-гетероструктуры *InAs/In<sub>0,8</sub>Al<sub>0,2</sub>Sb*, предназначенные для изготовления на их основе матричных детекторов среднего ИК-диапазона. Показано, что полученные гетероструктуры имеют приемлемое качество поверхности и соответствуют номинально заложенному дизайну. Установлено, что при толщине слоя твердого раствора *In<sub>0,8</sub>Al<sub>0,2</sub>Sb* порядка 70 нм в зоне проводимости формируется сравнительно однородный в плоскости гетероструктуры потенциальный барьер для основных носителей. В приповерхностной области, обнаружено заметное увеличение концентрации электронов, вызванное их освобождением из поверхностных состояний. Данный эффект сопровождается заметным изгибом зон в области глубины  $\sim 500$  нм.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 19-79-30086.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Klipstein P. et al. / Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7660. P. 76602Y-1–76602Y-9.
2. Ting D. Z. Y. et al. / Inf. Phys. Technol. 2011. Vol. 54. P. 267–272.

3. Kim H. S. et al. / Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101. P. 161114-1–161114-3.

4. Klaassen F. M., Blok J., De Hoog F. J. / Physica. 1961. Vol. 27. № 2. P. 185–196.

5. Maimon S., Wicks G. W. / Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 151109.

6. Dong J. T. et al. / Journal of Vacuum Science & Technology B. 2023. Vol. 41. № 3.

PACS: 81.15.Hi

## Optical and electrical properties of a barrier-diode heterostructure based on InSb

*K. A. Savin<sup>1</sup>, I. I. Minaev<sup>1</sup>, A. V. Klekovkin<sup>1</sup>, G. N. Eroshenko<sup>1</sup>, V. S. Krivobok<sup>1,2</sup>, S. N. Nikolaev<sup>1</sup>, A. E. Goncharov<sup>3</sup>, A. A. Pruchkina<sup>1</sup>, D. A. Pashkeev<sup>1</sup> and D. E. Sviridov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences  
53 Leninsky Ave., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: kolob7040@gmail.com

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

<sup>3</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

*Received 18.06.2024; revised 1.07.2024; accepted 9.07.2024*

***Using molecular beam epitaxy on InSb(100) substrates, a barrier-diode (nBn) structure with a unipolar In<sub>0.8</sub>Al<sub>0.2</sub>Sb barrier was obtained. The crystalline perfection of the structure and compliance with the nominal design was confirmed by X-ray diffraction analysis. The electronic subsystem of the resulting nBn structure was characterized using current spreading resistance at the (011) split.***

***Keywords:*** current spreading resistance, molecular beam epitaxy, IR photodetector, InSb, barrier-diode heterostructures.

### REFERENCES

1. Klipstein P. et al., Proc. of SPIE **7660**, 76602Y-1–76602Y-9 (2010).
2. Ting D. Z. Y. et al., Inf. Phys. Technol. **54**, 267–272 (2011).
3. Kim H. S. et al., Appl. Phys. Lett. **101**, 161114-1–161114-3 (2012).
4. Klaassen F. M., Blok J. and De Hoog F. J., Physica **27** (2), 185–196 (1961).
5. Maimon S. and Wicks G. W., Appl. Phys. Lett. **89**, 151109 (2006).
6. Dong J. T. et al., Journal of Vacuum Science & Technology B **41** (3), (2023).