

УДК 538.915
EDN: UIGFSZ

PACS: 81.15.Hi

Структурные и оптические свойства твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ для средневолновых инфракрасных фотодетекторов

В. С. Кривобок, А. В. Клековкин, И. И. Минаев, К. А. Савин, Г. Н. Ерошенко,
Д. Ф. Аминев, В. П. Мартовицкий, С. Н. Николаев, А. А. Пручкина, С. Е. Якубсон

Исследованы структурные и оптические свойства твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках $\text{GaSb}(100)$ с использованием различных соотношений потоков сурьмы и мышьяка (Sb/As), а также материалов III и V групп. Кристаллическое совершенство образцов подтверждено методом рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения, а оптические свойства изучены с помощью низкотемпературной фотолюминесценции. Определены ширина запрещенной зоны и концентрации сурьмы (от 9,4 % до 15,4 %), которые влияют на оптические характеристики. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ для создания инфракрасных фотодетекторов среднего диапазона.

Ключевые слова: молекулярно-пучковая эпитаксия, твердый раствор $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, низкотемпературная ФЛ, ИК фотодетектор.

DOI: 10.51361996-0948-2024-5-69-72

Введение

В последние годы детекторы на основе сверхрешеток InAs/GaSb рассматриваются как альтернатива детекторам на основе HgCdTe (КРТ), работающим в средневолновом и длинноволновом инфракрасном диапазоне (3–12 мкм). Но, несмотря на целый ряд преимуществ данной системы по сравнению с КРТ детекторами, дефекты в слоях GaSb , возникающие в процессе роста, приводят к более высокому темновому току, что значительно ограничивает чувствительность детекторов [1, 2].

Альтернативой для сверхрешеток InAs/GaSb являются твердые растворы $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, не содержащие Ga.

Варьируя состав можно изменять ширину запрещенной зоны в достаточно широком интервале [3].

Кроме того, эти материалы характеризуются высокой подвижностью как электронов, так и дырок, высокой механической прочностью, химической стабильностью и относительно низкой стоимостью. Именно благодаря этим свойствам твердые растворы $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ являются наиболее перспективным материалом для создания средне- и длинно-

Кривобок Владимир Святославович^{1,2}, в.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: kolob7040@gmail.com

Клековкин Алексей Владимирович¹, м.н.с.

Минаев Илья Иванович¹, м.н.с., аспирант.

Савин Константин Антонович¹, н.с., к.ф.-м.н.

Ерошенко Григорий Николаевич¹, м.н.с., аспирант.

Аминев Денис Фагимович^{1,2}, с.н.с., к.ф.-м.н.

Мартовицкий Виктор Петрович¹, в.н.с., д.ф.-м.н.

Николаев Сергей Николаевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Пручкина Анна Артемовна¹, н.с., к.ф.-м.н.

Якубсон Сергей Евгеньевич³, к.т.н., директор департамента по специальным системам.

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.

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

² АО «НПО «Орион».

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

³ АО «Швабе».

Россия, 129366, Москва, пр. Мира, 176

Статья поступила в редакцию 18.07.2024

После доработки 9.08.2024

Принята к публикации 14.08.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Кривобок В. С., Клековкин А. В., Минаев И. И., Савин К. А., Ерошенко Г. Н., Аминев Д. Ф., Мартовицкий В. П., Николаев С. Н., Пручкина А. А., 2024

волновых инфракрасных фотодетекторов с барьерно диодной архитектурой [4,5].

Результаты

Серия структур с твердыми растворами $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ была получена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaSb (100) с n -типом проводимости. Для эпитаксиального выращивания использовалась установка Riber Compact-21T. Для получения твердых $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ растворов с высоким содержанием сурьмы ($x > 0,1$) использовался метаморфный буферный слой, схема которого представлена на рисунке 1.

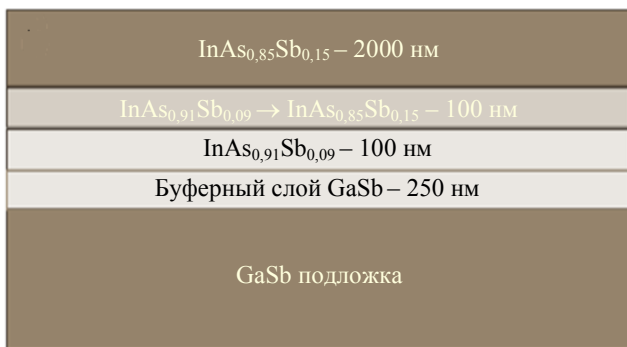


Рис. 1. Схема поперечного сечения образца, выращенного с использованием метаморфного буферного слоя

При росте слоя $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ наблюдался переход от реконструкции (1×3) , типичной для GaSb [6], к реконструкции (2×4) . По мере увеличения потока Sb, реконструкция (2×4) постепенно гаснет, а рефлексы слегка размываются.

Характерное АСМ (атомно-силовой микроскоп) изображение морфологии поверхности слоя $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ выращенного при соотношении потоков $\text{Sb}/\text{As} \approx 0,018$, продемонстрировано на рисунке 2, видны террасы послыонного роста (горизонтальные линии). На поверхности образцов отсутствуют видимые дефекты, среднеквадратичная шероховатость поверхности слоев не превышала 0,2 нм, что существенно ниже значения толщины одного монослоя, что говорит об атомарной гладкости поверхности. Однако, при увеличении соотношения потоков Sb/As на поверхности помимо террас роста наблюдаются следы отдельных дислокаций несоответствия, пред-

положительно возникающих из-за увеличения напряжений в слое твердого раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, возникающих из-за рассогласования параметров решеток подложки и твердого раствора. На поверхности также наблюдались неровности в виде пирамид, однако значение среднеквадратичной шероховатости поверхности слоев не превышало $\approx 0,41$ нм.

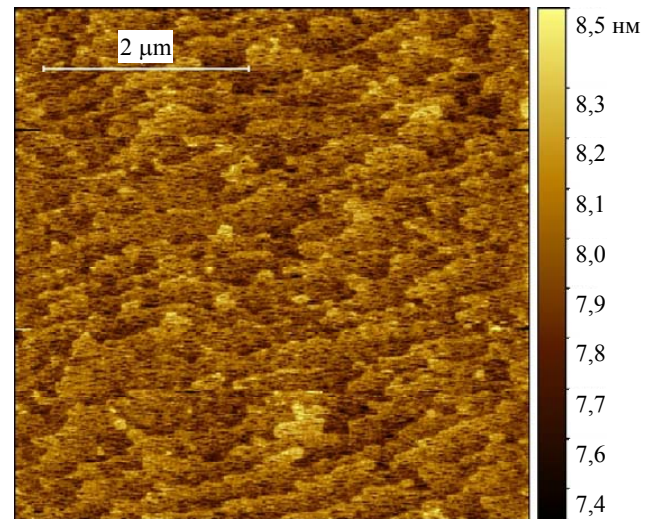


Рис. 2. АСМ изображение поверхности слоя $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$

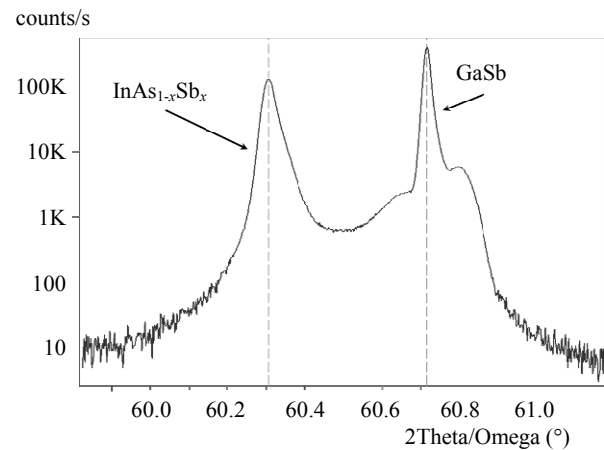


Рис. 3. Рентгеновская кривая качания для структуры, содержащей слой $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ снятая на рефлексе (004)

Для определения параметров выращенных слоев $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ гетероструктуры исследовались методом рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения. Так на рисунке 3 представлена типичная рентгеновская кривая качания структуры, содержащей слой $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ выращенный при соотношении потоков $\text{Sb}/\text{As} \approx 0,43$. На кривых можно видеть дифракционные пики, соответствующие антимониду галлия и слою $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. По поло-

жению пиков подложки и эпитаксиального слоя можно оценить концентрацию Sb ($x \approx 0,154$) и процент пластической релаксации (0,37 %). А для слоев $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ выращенных при соотношении потоков $\text{Sb}/\text{As} \approx 0,018$ положение пиков подложки и эпитаксиального слоя дает концентрацию Sb ($x \approx 0,094$) при 0,03 % процентах пластической релаксации.

Оптические свойства твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ исследовались при помощи измерений низкотемпературной фотолюминесценции. Для возбуждения люминесценции использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 660 нм и мощностью до 1 Вт. Излучение лазера модулировалось при помощи генератора импульсов. Излучение образца собиралось на входную щель монохроматора при помощи сферического зеркала. На выходе монохроматора располагался приемник излучения чувствительный в области 3–17 микрометров. Измерения проводились при температуре жидкого азота.

Данный подход позволил определить ширину запрещенной зоны в исследуемой структуре, для этого была использована простая модель люминесценции в прямозонном материале [7].

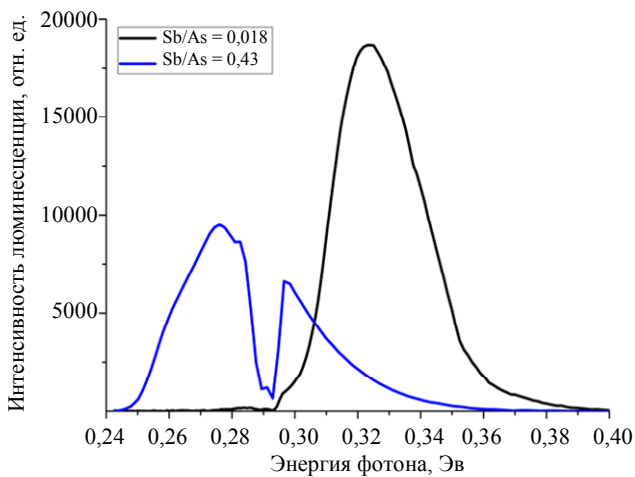


Рис. 4. Экспериментально измеренные спектры люминесценции слоев $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, выращенных при соотношении потоков $\text{Sb}/\text{As} \approx 0,43$ и $\approx 0,018$

Характерные спектры люминесценции твердого раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ при температуре 80 К представляет собой сравнительно широкую полосу, возникающую из-за наложения между зонной излучательной рекомбинации и примесно-дефектного излучения.

В спектре люминесценции образца, содержащего слой $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, выращенного при соотношении потоков $\text{Sb}/\text{As} \approx 0,43$, представленном на рисунке 4, видна некоторая особенность в районе 0,3 эВ, связанная с линией атмосферного поглощения (CO_2). Наилучшее соответствие экспериментальных и расчётных данных для гетероструктур с твердыми растворами $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ выращенными при соотношении потоков $\text{Sb}/\text{As} \approx 0,018$ и 0,43 наблюдается для значений ширины запрещенной зоны $E_g = 0,263$ эВ и $E_g = 0,313$ эВ, соответственно. На основе результатов работы [3] были проведены расчеты концентрации сурьмы, и были получены значения 10 % и 15 %, для соотношений потоков $\text{Sb}/\text{As} \approx 0,018$ и 0,43, соответственно. Полученный результат хорошо согласуется с данными рентгеноструктурного анализа.

Заключение

Таким образом, методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaSb выращены гетероструктуры $\text{GaSb}/\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. Исследование структурных свойств методами рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения подтвердил высокое кристаллическое качество, и позволило оценить концентрации Sb в выращенных твердых растворах $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$.

Высокая интенсивность и форма линий рекомбинационного излучения для выращенных $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ слоев указывает на доминирующую роль собственного излучения и второстепенную роль люминесценции возникающей за счет наличия фоновых примесей и дефектов. Анализ формы линии люминесценции позволил определить среднее значение запрещенной зоны. На основе данных параметров и литературных данных рассчитаны концентрации сурьмы.

Полученные результаты демонстрируют пригодность выращенных твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ для изготовления на их основе матричных детекторов среднего ИК-диапазона.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Satpati B. et al. / Journal of Crystal Growth. 2007. Vol. 301. P. 889–892.
2. Klin O. et al. / Journal of Crystal Growth. 2015. Vol. 425. P. 54–59.
3. Murawski K. et al. / Progress in Natural Science: Materials International. 2019. Vol. 29. № 4. P. 472–476.
4. Kim J. D. et al. / Applied Physics Letters. 1996. Vol. 68. № 1. P. 99–101.
5. Dixit V. K. et al. / Journal of Applied Physics. 2004. Vol. 96. № 9. P. 4989–4997.
6. Bracker A. S. et al. / Journal of Crystal Growth. 2000. Vol. 220. № 4. P. 384–392.
7. Christen J., Bimberg D. / Physical Review B. 1990. Vol. 42. № 11. P. 7213.

PACS: 81.15.Hi

Structural and optical properties of $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ solid alloys for mid-wave infrared photodetectors

V. S. Krivobok^{1,2}, A. V. Klekovkin¹, I. I. Minaev¹, K. A. Savin¹, G. N. Eroshenko¹, D. F. Aminev^{1,2}, V. P. Martovitsky¹, S. N. Nikolaev¹, A. A. Pruchkina¹ and S. E. Jakubson³

¹ P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
53 Leninsky Ave., Moscow, 119991, Russia

² Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: kolob7040@gmail.com

³ Shvabe Holding
176 Prospekt Mira, Moscow, 129366, Russia

Received 18.07.2024; revised 9.08.2024; accepted 14.08.2024

InAs_{1-x}Sb_x solid alloys were grown by molecular beam epitaxy on GaSb(100) substrates at different ratios of Sb and As fluxes, as well as fluxes of group III and V materials. The crystalline perfection of the structure is confirmed by high-resolution X-ray diffraction analysis. The optical properties of the obtained heterostructures with InAs_{1-x}Sb_x solid alloys were investigated using low-temperature photoluminescence measurements.

Keywords: molecular beam epitaxy, $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ solid alloy, low-temperature PL, IR photodetector.

REFERENCES

1. Satpati B. et al., Journal of Crystal Growth **301**, 889–892 (2007).
2. Klin O. et al., Journal of Crystal Growth **425**, 54–59 (2015).
3. Murawski K. et al., Progress in Natural Science: Materials International **29** (4), 472–476 (2019).
4. Kim J. D. et al., Applied Physics Letters **68** (1), 99–101 (1996).
5. Dixit V. K. et al., Journal of Applied Physics **96** (9), 4989–4997 (2004).
6. Bracker A. S. et al., Journal of crystal growth **220** (4), 384–392 (2000).
7. Christen J. and Bimberg D., Physical Review B **42** (11), 7213 (1990).