

УДК 538.958
EDN: SJJBXS

PACS: 81.15.Hi

Структурные и оптические свойства InAs/GaSb сверхрешеток, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии*Г. Н. Ерошенко, В. С. Кривобок, И. И. Минаев, А. В. Клековкин,
К. А. Савин, А. Е. Гончаров, А. В. Муратов, А. Р. Дубовая,
А. А. Пручкина, С. Н. Николаев*

На подложках GaSb (100) получены короткопериодные сверхрешетки InAs/GaSb с компенсацией упругих напряжений, реализованных за счет внедрения интерфейсных слоев In(As)Sb. Структурное совершенство сверхрешеток и отсутствие пластической релаксации подтверждено с помощью рентгеноструктурного анализа и атомно-силовой микроскопии. На основе измерений спектров отражения показано, что край поглощения сверхрешеток расположен в районе 1000 см^{-1} мкм при температуре 77 К. Совокупность полученных данных демонстрирует возможность применения сверхрешеток с интерфейсной компенсацией напряжений для создания детекторов дальнего ИК-диапазона.

Ключевые слова: сверхрешетки, молекулярно-лучевая эпитаксия, дифракция быстрых электронов, атомно-силовая микроскопия, рентгеноструктурный анализ, ИК-Фурье спектроскопия.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-64-68

Введение

В настоящее время продолжают активно развиваться технологии получения фоточувствительных материалов для дальнего ИК-диапазона, основу которых составляют содержащие сурьму полупроводниковые соединения АЗВ5. Преимуществами таких систем, являются возможность подавления Оже-рекомбинации [1, 2] и межзонного туннелиро-

вания за счет высокой подвижности и большой эффективной массы электронов [3], а также отсутствие ограничений, связанных с правилами отбора для оптических переходов [4].

Одним из ярких примером таких структур являются сверхрешетки II-го типа (в англоязычной литературе T2SL – принятое сокращение от type II superlattice) на основе InAs и GaSb принадлежащих группе материалов с постоянной решетки $6,1\text{ \AA}$. Тем не менее, рас-

Ерошенко Григорий Николаевич¹, м.н.с., аспирант.
Кривобок Владимир Святославович^{1,2}, в.н.с., д.ф.-м.н.
E-mail: kolob7040@gmail.com
Минаев Илья Иванович¹, м.н.с., аспирант.
Клековкин Алексей Владимирович¹, м.н.с.
Савин Константин Антонович¹, н.с., к.ф.-м.н.
Гончаров Андрей Евгеньевич², инженер 1 кат.
Муратов Андрей Викторович¹, м.н.с.
Дубовая Анастасия Романовна^{1,3}, лаборант.
Пручкина Анна Артемовна¹, н.с., к.ф.-м.н.
Николаев Сергей Николаевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.
¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.
Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 53.

²АО «НПО «Орион».

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

³Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

*Статья поступила в редакцию 24.06.2024**После доработки 16.07.2024**Принята к публикации 30.07.2024**Шифр научной специальности: 1.3.11*

© Ерошенко Г. Н., Кривобок В. С., Минаев И. И.,
Клековкин А. В., Савин К. А., Гончаров А. Е.,
Муратов А. В., Дубовая А. Р., Пручкина А. А.,
Николаев С. Н., 2024

согласование постоянной решетки у доступных подложек и сверхрешетки создает определенные технологические сложности при росте структур, содержащих T2SL необходимой толщины. В данной работе обсуждается выращивание методом молекулярно-лучевой эпитаксии T2SL InAs/GaSb с компенсацией упругих напряжений за счет внедрения переходного слоя In(As)Sb, а также исследуются структурные и оптические полученных эпитаксиальных структур.

Результаты

Гетероструктуры с InAs/GaSb сверхрешетками, содержащие 50, 100 и 300 периодов, были выращены на подложках *epi-ready* GaSb (100) методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Compact-21T фирмы Riber, оснащенной двузонными эффузионными источниками III группы (Ga, In) и вентильными источниками с зоной крекинга элементов V группы (As, Sb), Рост контролировался *in-situ* с помощью системы дифракции быстрых электронов на отражение (RHEED). Использовались как компенсированные низколегированные подложки с дырочной проводимостью, так и сильнолегированные теллуrom с электронным типом проводимости. Дополнительной предэпитаксиальной подготовки поверхности подложек перед ростом не проводилось. Непосредственно перед процессом эпитаксиального роста подложки обезгаживались в камере предварительной подготовки для удаления с рабочей поверхности молекул воды и прочих загрязнений. После этого подложки перемещались в камеру роста.

Скорости роста и реконструкции поверхности *in-situ* контролировали с помощью RHEED. Контроль температуры осуществлялся односпектральным инфракрасным фокусируемым бесконтактным пирометром с рабочей длиной волны 1,6 мкм. Для измерения молекулярных потоков использовался выдвижной датчик Баярда-Альперта.

Компенсация упругих напряжений, возникающих из-за значительного рассогласования решеток (~0,6 %) между слоями InAs и GaSb, достигалась за счет внедрения промежуточных слоев InSb или InAsSb (одна из возможных реализаций подхода, описанного в работе [2]). Качество поверхности, структурное совершенство и параметры слоев полученных сверхрешеток InAs/GaSb были подтверждены с помощью атомно-силовой микроскопии, рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии. Результаты данных исследований также позволили оптимизировать дизайн сверхрешеток и параметры роста. Детали процедуры получения сверхрешеток InAs/GaSb описаны в работе [5].

Рисунок 1 иллюстрирует структуру различных областей сверхрешетки с периодом 7,41 нм. Соответствующие изображения получены с помощью просвечивающего микроскопа Titan Themis Z. На рисунке 1 хорошо видны слои InAs и GaSb. А также отчетливо видны все границы слоев сверхрешетки InAs/GaSb состоящей из 300 периодов и качественный переход от подложки GaSb, кроме того, на интерфейсах данных слоев видны области с отличающимся контрастом, толщина которых составляет 1–2 монослоя.

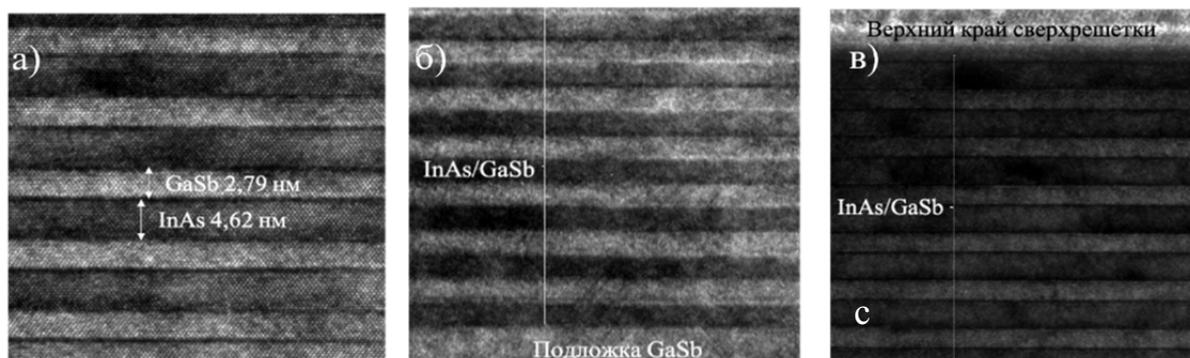


Рис. 1. Визуализация слоев сверхрешетки InAs/GaSb с помощью электронной микроскопии. а) – на границе сверхрешетки; б) – в центре сверхрешетки; в) – на границе сверхрешетки и буферного слоя GaSb

Данные области мы связываем с переходными слоями In(As)Sb. Соотношение толщин слоев InAs и GaSb в сверхрешетке $d_{\text{InAs}}/d_{\text{GaSb}} = 2$, находятся в полном согласии с номинально заложенным дизайном.

Периодичность короткопериодной сверхрешетки, а также толщины слоев были подтверждены рентгеноструктурными исследованиями, проведенными на дифрактометре высокого разрешения Bruker D8 Discover. Используя положение спутников, были рассчитаны средние значения периодов решетки используя уравнение Вульфа–Брэгга для дифракционных максимумов пиков спутников.

$$d = \frac{\lambda(N_i - N_j)}{2(\sin \theta_i - \sin \theta_j)} \quad (1)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения; d – период сверхрешетки; $\theta_{i,j}$ – угловое положение спутников; $N_{i,j}$ – порядок отражения.

Угловые значения и порядок спутников, полученные непосредственно из кривых качания сверхрешетки представлены в таблице.

Таблица

Номер спутника	Угловое значение, θ	$\sin \theta$
N_0	30,5023927	0,507574345
N_1	31,1873238	0,517837755
N_2	31,8843991	0,528207151
N_3	32,5839032	0,538534083
N_{-1}	29,8174616	0,4972384
N_{-2}	29,1349593	0,486868426

Среднее значение толщины сверхрешетки InAs/GaSb составило 7,46 нм, что соответствует номинально заложенным при росте.

Для исследования электронной подсистемы сверхрешеток были проведены измерения спектров отражения температуре 77 и 300 К. Для этого использовался Фурье спектрограф Bruker IFS-125HR. Полученные спектры отражения представлены на рисунке 2.

Из рисунка следует, что частотная зависимость коэффициента отражения в диапазоне 500–7000 см^{-1} демонстрирует ряд спектральных особенностей. Данные особенности могут определяться как интерференцией на толщине

сверхрешетки, так и наличием выраженных резонансов, в том числе, сформированных минизонами сверхрешетки.

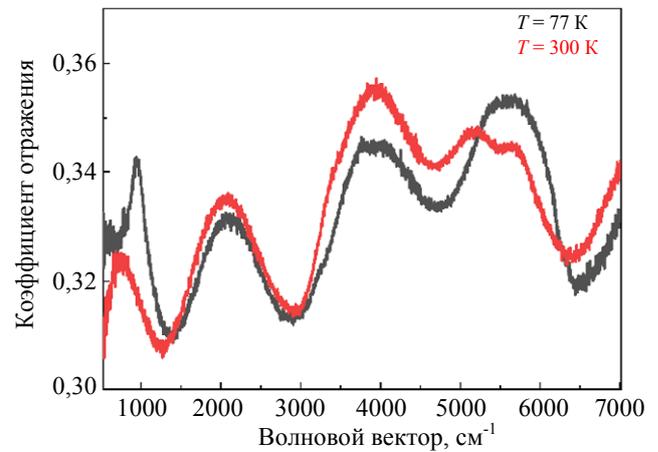


Рис. 2. Обзорный спектр отражения структуры GaSb/InAs 100 периодов

Типичное значение показателя преломления для материалов АЗВ5 из семейства 6,1 Å находятся в диапазоне $n \sim 3,5\text{--}3,8$. Это означает, что наиболее длинноволновый интерференционный максимум должен возникать на длине волны $\lambda \sim d \times n \sim 5,25\text{--}5,8$ мкм, что соответствует волновому вектору $\sim 1700\text{--}1900$ см^{-1} . В то же время, как видно из рисунка 2, наиболее длинноволновый максимум в спектре отражения расположен в районе 950 см^{-1} при температуре 77 К и смещается к 750 см^{-1} при температуре 300 К. Данный максимум следует связать с дисперсией показателя преломления сверхрешетки в окрестности оптического перехода. Так как фононные резонансы сверхрешеток расположены в существенно более длинноволновой области, а межзонные переходы в InAs и GaSb в существенно более коротковолновой области, особенность в районе 950 см^{-1} следует приписать переходам с участием минизон. Данный вывод подтверждается тем, что сдвиг особенности с увеличением температуры до 300 К составляет приблизительно 200 см^{-1} , что существенно превышает длинноволновый сдвиг интерференционных максимумов в диапазоне 1000–7000 см^{-1} за счет теплового расширения материалов.

Для качественных оценок зависимость мнимой части комплексной диэлектрической функции ϵ'' от частоты ω вблизи края погло-

щения сверхрешетки можно грубо приблизить ступенчатой функцией вида

$$\varepsilon''(w) \sim A \times \theta(w - w_1) \times \theta(w_2 - w) \quad (2)$$

где $\theta(w)$ – функция Хевисайда, константа A определяется силой осциллятора перехода, а нижняя (w_1) и верхняя (w_2) границы спектра поглощения определяются относительным положением верхней дырочной и нижней электронной минизоны.

Применимость (2) определяется тем, что ширина верхней минзоны, формируемой тяжелыми дырками, много меньше ширины нижней минзоны, формируемой электронами. Согласно соотношениям Крамерса-Кронига несложно получить частотную зависимость действительной части диэлектрической функции для среды, спектр поглощения которой определяется выражением (3):

$$\varepsilon'(w) = \frac{A}{\pi} \operatorname{Ln} \frac{(w_2 + w)|w_2 - w|}{(w_1 + w)|w_1 - w|} + \varepsilon_\infty. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что $\varepsilon'(w)$ должно иметь выраженный максимум в области, где расположена низкочастотная граница в спектре поглощения, определяемым (2). Так как для системы T2SL $\varepsilon'(w) \gg \varepsilon''(w)$, максимум $\varepsilon'(w)$ будет приблизительно соответствовать максимуму в спектре отражения. Таким образом это означает, что край фундаментального поглощения сверхрешетки соответствует наиболее длиноволновому максимуму в спектре отражения на рисунке 2.

Заключение

Совокупность полученных данных позволяет утверждать, что формирование переходных слоев In(As)Sb позволяет получать методом молекулярно-лучевой эпитаксии свободные от пластической релаксации сверхрешетки, содержащие до 300 периодов чередующихся слоев InAs/GaSb толщиной 4,62 и 2,79 нм, соответственно. Край поглощения данных сверхрешеток расположен в районе 10,5 мкм, а толщина ~ 2250 нм достаточна для формирования поглощающего слоя в матричных ФПУ дальнего ИК-диапазона.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Grein C. H., Cruz H., Flatte M. E., Ehrenreich H. / Applied Physics Letters. 1994. Vol. 65. № 20. P. 2530–2532.
2. Rogalski A., Antoszewski J., Faraone L. / Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 105. № 9. P. 4.
3. Rogalski A. / Infrared Physics & Technology. 2011. Vol. 54. № 3. P. 136–154.
4. Лутвинов Д. А. и др. / Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук. 2020. Т. 47. № 4. С. 9–16.
5. Krivobok V. S. et al. / Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2023. Vol. 50. № 9. P. 396–402.

PACS: 81.15.Hi

Structural and optical properties of InAs/GaSb superlattices obtained by molecular beam epitaxy method

G. N. Eroshenko¹, V. S. Krivobok^{1,2}, I. I. Minaev¹, A. V. Klekovkin¹, K. A. Savin¹,
A. E. Goncharov², A. V. Muratov¹, A. R. Dubovaya^{1,3}, A. A. Pruchkina¹
and S. N. Nikolaev¹

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 str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: kolob7040@gmail.com

³ Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, 141701, Russia

Received 24.06.2024; revised 16.07.2024; accepted 30.07.2024

Short-period InAs/GaSb superlattices with elastic stress compensation realized by introducing In(As)Sb interface layers have been obtained on GaSb (100) substrates. The structural perfection of the superlattices and the absence of plastic relaxation were confirmed by X-ray diffraction analysis and atomic force microscopy. Based on reflectance spectra measurements, it is shown that the absorption edge of the superlattice is located in the region of 1000 cm⁻¹ μm at a temperature of 77K. The data obtained demonstrates the possibility of using superlattices with interface strain compensation to create far-IR detectors.

Keywords: molecular beam epitaxy, fast electron diffraction, atomic force microscopy, X-ray diffraction analysis, FTIR spectroscopy.

REFERENCES

1. Grein C. H., Cruz H. and Flatte M. E., Applied Physics Letters **65** (20), 2530–2532 (1994).
2. Rogalski A., Antoszewski J. and Faraone L., Journal of Applied Physics **105** (9), 4 (2009).
3. Rogalski A., Infrared Physics & Technology **54** (3), 136–154 (2011).
4. Litvinov D. A. et al., Bulletin of the Lebedev Physics Institute **47**, 105–109 (2020).
5. Krivobok V. S. et al., Bulletin of the Lebedev Physics Institute **50** (9), 396–402 (2023).