

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОМАСШТАБНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ НЕЛЕГИРОВАННОЙ InAs/GaSb СВЕРХРЕШЕТКИ С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТЕКАНИЯ

Д. Е. Свиридов

*С помощью микроскопии сопротивления растекания (МСР) в атмосферных условиях продемонстрирован устойчивый контраст электрофизических свойств на сколе нелегированной InAs/GaSb сверхрешетки II-типа с периодом 7.5 нм. Показано, что данный контраст является следствием различия в проводимости слоев InAs и GaSb сверхрешетки. Предложен простой и эффективный метод контроля структуры и электронно-дырочной подсистемы InAs/GaSb сверхрешеток, применяемых в современной ИК фотосенсорике.*

**Ключевые слова:** микроскопия сопротивления растекания, проводящая атомно-силовая микроскопия, сверхрешетка, InAs/GaSb, барьер Шоттки.

*Введение.* Микроскопия сопротивления растекания (МСР) является методом анализа, позволяющим визуализировать двумерное распределение областей легирования с высоким пространственным разрешением. Метод МСР реализован на основе контактной атомно-силовой микроскопии (АСМ). Он позволяет создавать двумерные карты сопротивления поверхности полупроводникового образца, связанного с локальным удельным сопротивлением. Помимо визуализации проводящей структуры поверхности МСР позволяет проводить количественные измерения распределения концентрации носителей с помощью калибровочных измерений [1]. Латеральное разрешение данного метода при использовании сверхострых алмазных проводящих зондов приближается к таковому для сверхвысоковакуумной сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). На прототипных поверхностях, таких как WSe<sub>2</sub>, при отсутствии естественного поверхностного оксида, для механического преодоления которого требуется значительное контактное

усилие, этот метод позволяет визуализировать отдельные точечные дефекты [2]. Метод МСР успешно применялся для визуализации внутренней структуры и изучения электронных свойств на сколах различных легированных и нелегированных гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми точками (КТ) [3, 4].

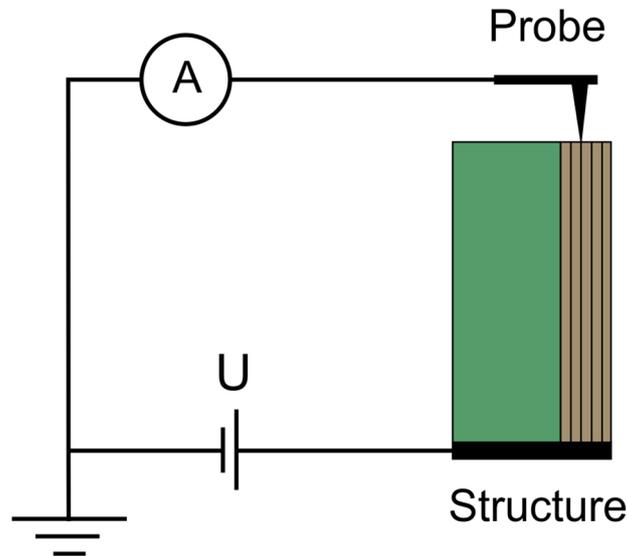


Рис. 1: Схема МСР измерений на сколотой поверхности структуры.

В этой работе мы применили метод МСР для наноразмерной характеристики электронных свойств слоев на сколе сверхрешетки InAs/GaSb II-типа с периодом 7.5 нм. Особенностью данной структуры является одновременное присутствие электронов и дырок в слоях InAs и GaSb, соответственно. Рассмотрен механизм визуализации слоев сверхрешетки, а также его зависимость от величины и полярности прикладываемого напряжения. Обнаружено, что токовый сигнал от слоев InAs на МСР изображениях меньше, чем от слоев GaSb, независимо от полярности напряжения. Контакты зонда со слоями структуры обладают омическими свойствами. Меньший токовый сигнал от слоев InAs по сравнению со слоями GaSb является следствием их более низкой проводимости.

*Эксперимент.* Сверхрешетка InAs/GaSb была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) с использованием установки Compact-21T (Riber) на подложке GaSb (100). Скорость роста и реконструкция поверхности контролировались *in-situ* путем наблюдения 2D полосчатых структур дифракции быстрых электронов (ДБЭ) [5]. Сначала выращивался буферный слой GaSb толщиной ~300 нм. Затем температура уменьшалась и выращивалась сверхрешетка, содержащая 100 периодов. Толщины

слоев InAs и GaSb составляли – 5 и 2.5 нм, соответственно. Компенсация упругих напряжений, возникающая вследствие рассогласования решеток InAs и GaSb, достигалась внедрением промежуточных ультратонких слоев In(As)Sb на интерфейсах [6].

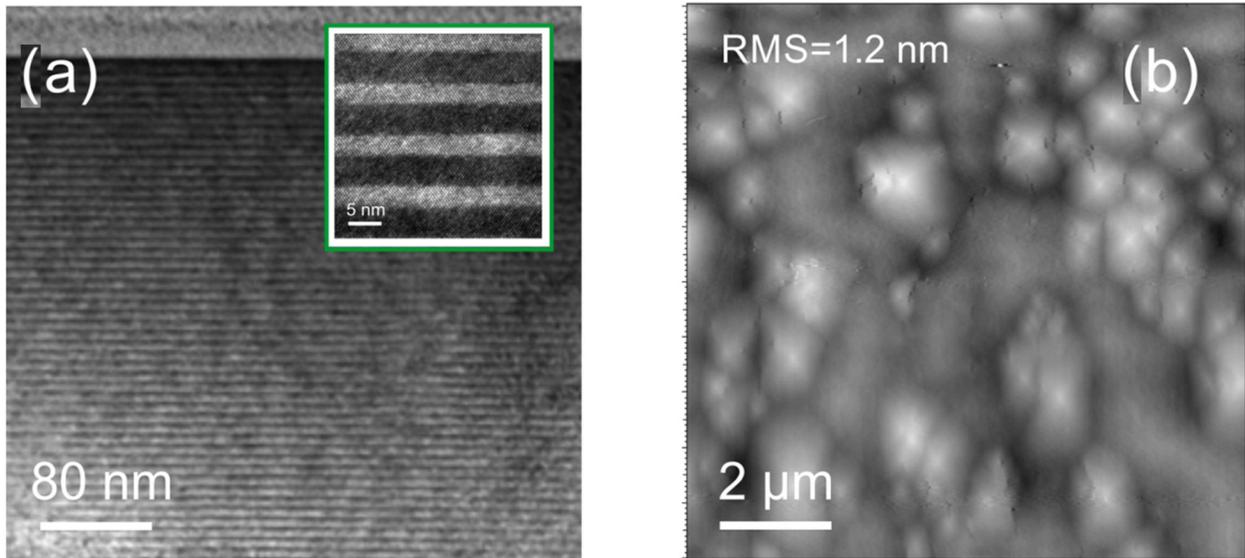


Рис. 2: (a) *кросс-секционное ПЭМ изображение исследуемой сверхрешетки InAs/GaSb с периодом 7.5 нм; (b) АСМ изображение ростовой поверхности структуры. Высотный контраст – 10.2 нм.*

Измерения в режиме МСР проводились с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47 Pro (NTMDT) при комнатной температуре в атмосферных условиях. Мы использовали алмазные проводящие зонды DEP01 ( $\rho \approx 0.003 - 0.005 \text{ Ом}\times\text{см}$ ) с радиусом закругления  $\sim 7$  нм. Сканирование осуществлялось с силой прижатия зонда к поверхности  $\sim 100$  нН, достаточной для преодоления слоя естественного оксида и установления стабильного электрического контакта. Для изучения электронных и структурных свойств слоев сверхрешетки, образец скалывался и закреплялся на специально сконструированном держателе. Макроскопический контакт был сформирован посредством нанесения жидкой InGa эвтектики на сколотую поверхность. Постоянное смещение прикладывалось к этому контакту, зонд заземлялся (рис. 1). Период сверхрешетки и её структурное качество оценивались с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Titan Themis Z.

*Результаты и обсуждение.* Кросс-секционное ПЭМ изображение, показывающее все слои исследуемой структуры, представлено на рис. 2(a). На вставке представлено

увеличенное ПЭМ изображение слоев InAs и GaSb. Видно, что структура обладает резкими интерфейсами с малой степенью атомной интердиффузии, что подтверждает ее высокое качество. Толщины слоев InAs и GaSb хорошо соответствуют номинальным. На рис. 2(b) представлено топографическое 10 мкм × 10 мкм АСМ изображение ростовой поверхности сверхрешетки. Шероховатость поверхности (RMS) – 1.2 нм. Поверхность имеет холмистую структуру со ступенями 1-2 монослоя (1 МС ≈ 0.3 нм). Форма холмов напоминает пирамиды с квадратным или прямоугольным основанием. Образование холмистой поверхностной структуры связано с наличием барьера Эрлиха–Швобеля на краю ступеней, который должны преодолеть атомы, диффундирующие по поверхности террас, для того чтобы оказаться на нижних ступенях [7]. Присутствие барьера уменьшает вероятность встраивания атомов в нижние ступени, увеличивая тем самым вероятность встраивания в верхние, что приводит к формированию холмов.

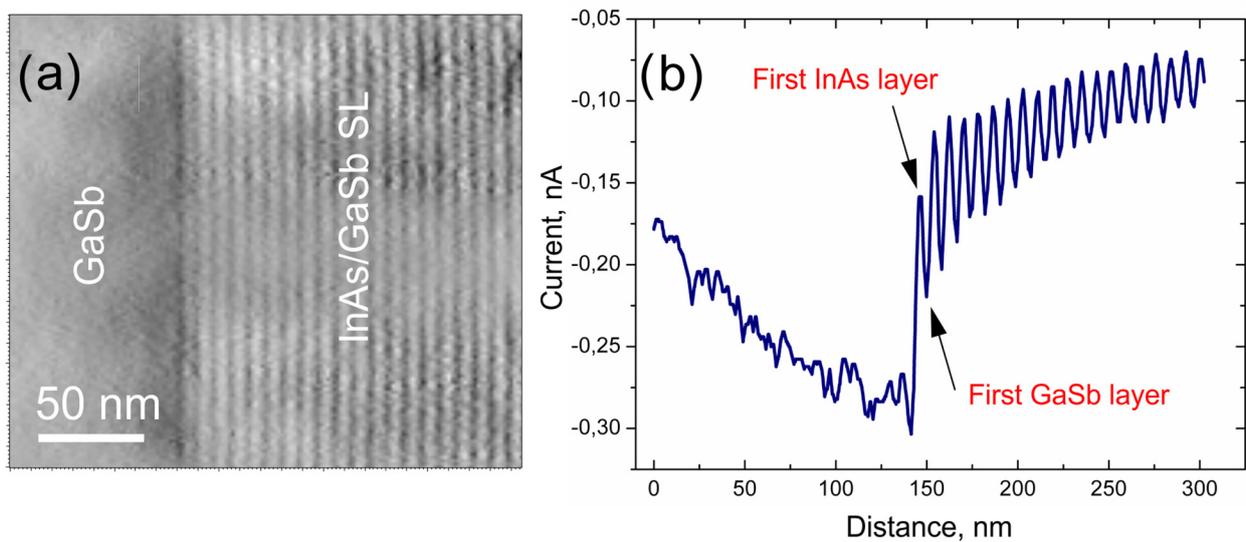


Рис. 3: (a) МСР изображение скола сверхрешетки InAs/GaSb с периодом 7.5 нм, полученное при  $U = -2$  мВ; (b) усредненный профиль МСР изображения.

На рис. 3(a) представлено МСР изображение поверхности скола сверхрешетки, полученное при напряжении  $U = -2$  мВ. На изображении виден буферный слой GaSb и слои InAs/GaSb сверхрешетки. На рис. 3(b) представлен усредненный профиль МСР изображения. Из рис. 3 видно, что токовый сигнал от слоев InAs (светлые полосы) меньше, чем от слоев GaSb (темные полосы). При положительном напряжении  $U = 2$  мВ токовый сигнал от слоев InAs также был меньше, чем от слоев GaSb. При этом, как для слоев InAs, так и для слоев GaSb, величина токового сигнала по модулю была равна

величине сигнала при отрицательном напряжении  $U = -2$  мВ. Подобное поведение токового сигнала в зависимости от полярности прикладываемого к структуре напряжения наблюдалось и для других напряжений  $|U| \gg 2$  мВ.

Контакт металлического зонда с полупроводниковым образцом, для большинства технологически известных материалов приводит к формированию барьера Шоттки из-за поверхностного закрепления уровня Ферми [8]. В этом случае величина тока, протекающего через такой контакт, заметно отличается в зависимости от полярности прикладываемого напряжения. Отсутствие влияния полярности напряжения на величину токового сигнала в нашем случае свидетельствует о том, что, несмотря на то, что структура нелегированная, влиянием барьеров Шоттки на токоперенос в контактах зонда со слоями сверхрешетки на сколе можно пренебречь. Проводимость используемых нами алмазных зондов, легированных бором, при комнатной температуре близка к металлической [9]. Контакт такого зонда с поверхностью полупроводника можно рассматривать как контакт металл–полупроводник с барьером типа Шоттки [10]. Поверхность слоев InAs обладает вырожденной электронной проводимостью с закреплением уровня Ферми приблизительно на 100 мэВ выше минимума зоны проводимости [11]. В этом случае формирования барьера типа Шоттки на контактах алмазного зонда со слоями InAs не происходит, что и является причиной отсутствия влияния полярности напряжения на величину токового сигнала. Поверхность слоев GaSb обладает невырожденной дырочной проводимостью с закреплением уровня Ферми вблизи максимума валентной зоны [12]. В этом случае отсутствие влияния полярности напряжения на сигнал объясняется малой высотой барьера типа Шоттки и его туннельной прозрачностью.

Таким образом, токовый сигнал, протекающий в контактах зонда со слоями сверхрешетки, определяется с помощью выражения  $I \approx U/(R_p + R_s)$ , где  $R_p$  и  $R_s$  – сопротивления зонда и растекания, соответственно. Сопротивление зонда  $R_p$ , судя по наличию контраста от слоев с разной проводимостью на сколе, заметно меньше сопротивления растекания  $R_s$ . В этом случае, аналогично системе InSb/InAlSb [13], выражение для тока можно упростить  $-I \approx U/R_s$ . Сопротивление растекания определяется с помощью выражения  $R_s = \rho/4 \cdot a$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление,  $a$  – радиус контакта зонд-образец. Тогда выражение для тока примет вид  $-I \approx 4 \cdot a \cdot \sigma \cdot U$ , где  $\sigma$  – проводимость. Следовательно, меньший токовый сигнал от слоев InAs по сравнению со слоями GaSb означает, что их проводимость, определяющаяся концентрацией носителей и их подвижностью также меньше. Подвижность электронов в InAs значительно больше подвижности дырок в слоях GaSb, поэтому меньшая проводимость слоев InAs является

следствием значительно более низкой концентрации носителей в них по сравнению со слоями GaSb.

Из рис. 3(b) также видно, что толщины слоев InAs и GaSb, измеренные по ширине на полувысоте (FWHM) пиков на усредненном МСР профиле – 4/3.6 нм, заметно отличаются от номинальных значений – 5 и 2.5 нм. При этом измеренный период сверхрешетки – 7.6 нм хорошо соответствует номинальному значению – 7.5 нм. Кроме того, из рис. 3 видно, что токовый сигнал от первого слоя InAs значительно больше, чем от последующих слоев InAs. Данные наблюдения объясняются эффектом усреднения из-за большой контактной силы, необходимой для механического преодоления слоя естественного оксида. В случае, когда зонд находится в контакте с первым, слабопроводящим слоем InAs, он одновременно контактирует с высокопроводящими буферным и первым GaSb слоями. Поэтому токовый сигнал от него относительно большой. При перемещении на второй слой InAs, зонд контактирует помимо соседних слоев GaSb также со слабо проводящими первым и третьим слоями InAs. В этом случае сигнал от него и последующих слоев InAs меньше.

*Заключение.* Мы показали применимость метода МСР в атмосферных условиях для быстрой и надежной визуализации слоев и наноразмерной характеристики их проводящих характеристик на сколе сверхрешетки InAs/GaSb II-типа. Рассмотрен механизм визуализации слоев сверхрешетки на сколе, а также его зависимость от величины и полярности прикладываемого к структуре напряжения. Обнаружено, что величина токового сигнала от слоев InAs на МСР изображениях меньше, чем от слоев GaSb, независимо от полярности приложенного постоянного смещения. Контакты зонда со слоями структуры обладают омическими характеристиками. Меньший токовый сигнал от слоев InAs по сравнению со слоями GaSb является следствием их более низкой проводимости вследствие значительно меньшей концентрации носителей.

Автор выражает благодарность коллективу лаборатории “Новых материалов для ИК фотоники” ОФТТ ФИАН за предоставленный образец и обсуждение результатов.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. P. Lu, K. L. Kavanagh, St. J. Dixon-Warren, et al., J. Vac. Sci. Technol. B **19**, 1662 (2001). doi.org/10.1116/1.1387458.
- [2] P. Vampoulis, K. Sotthewes, M. H. Siekman, H. J. W. Zandvliet, ACS Appl. Mater. Interfaces **10**, 13218 (2018). doi.org/10.1021/acsami.8b01506.

- [3] D. E. Sviridov, V. I. Kozlovsky, D. A. Sannikov, *Phys. Stat. Sol. (b)* **247**, 1420 (2010). doi.org/10.1002/pssb.200983252.
- [4] T. Hakkarainen, O. Douhéret, S. Anand, et al., *Appl. Phys. Lett.* **97**, 041106 (2010). doi.org/10.1063/1.3467138.
- [5] В. С. Кривобок, Д. А. Пашкеев, А. В. Клековкин и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **50**(9), 51 (2023). doi.org/10.3103/S1068335623090051.
- [6] В. С. Кривобок, Г. Н. Ерошенко, А. В. Муратов и др., *Письма в ЖЭТФ* **120**, 354 (2024). doi.org/10.31857/S0370274X24090069.
- [7] B. Z. Noshov, B. R. Bennett, E. H. Aifer, M. Goldenberg, *Journal of Crystal Growth* **236**, 155 (2002). doi.org/10.1016/S0022-0248(01)02392-2.
- [8] H. K. Henisch, *Semiconductor contacts – An approach to ideas and models* (Clarendon Press, Oxford, 1984), p. 320.
- [9] H. Fu, H. Zhuang, L. Yang, et al., *Appl. Phys. Lett.* **110**, 031601 (2017). doi.org/10.1063/1.4974295.
- [10] R. P. Lu, K. L. Kavanagh, St. J. Dixon-Warren, et al., *J. Vac. Sci. Technol. B* **20**, 1682 (2002). doi.org/10.1116/1.1496512.
- [11] L. O. Olsson, C. B. M. Andersson, M. C. Hakansson, et al., *Phys. Rev. Lett.* **76**, 3626 (1996). doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.3626.
- [12] P. S. Dutta, H. L. Bhat, V. Kumar, *J. Appl. Phys.* **81**, 5821 (1997). doi.org/10.1063/1.365356.
- [13] К. А. Савин, А. В. Клековкин, И. И. Минаев и др., *Письма в ЖТФ* **50**, 31 (2024). doi.org/10.61011/PJTF.2024.19.58654.19986.

Поступила в редакцию 13 октября 2024 г.

После доработки 3 ноября 2024 г.

Принята к публикации 6 ноября 2024 г.