

07.2;07.3

## Использование микроскопии сопротивления растекания для определения параметров барьерного слоя в nВn-структурах на основе InSb

© К.А. Савин<sup>1</sup>, А.В. Клековкин<sup>1</sup>, И.И. Минаев<sup>1</sup>, Г.Н. Ерошенко<sup>1</sup>, В.С. Кривобок<sup>1,2</sup>,  
Д.Е. Свиридов<sup>1</sup>, А.Е. Гончаров<sup>2</sup>, С.Н. Николаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> АО „НПО „Орион“, Москва, Россия

E-mail: savinkonstantin93@gmail.com

Поступило в Редакцию 8 мая 2024 г.

В окончательной редакции 8 мая 2024 г.

Принято к публикации 7 июня 2024 г.

Продемонстрирован новый подход, позволяющий визуализировать электронную подсистему барьерно-диодных структур InSb/InAlSb, оценивать однородность слоя InAlSb, блокирующего основные носители в таких структурах, и определять высоту соответствующего потенциального барьера. Подход основан на измерении кремниевым зондом с алмазным покрытием сопротивления растекания на свежеприготовленном сколе (110) эпитаксиальной гетероструктуры.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2024.19.58654.19986

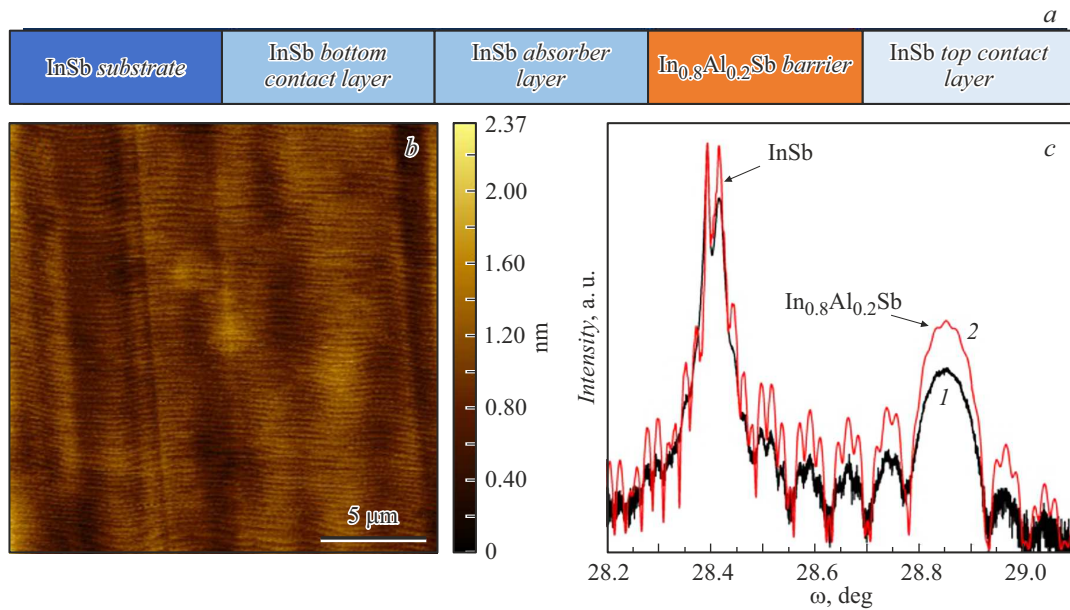
Антимонид индия (InSb) и твердые растворы на его основе активно применяются для создания фотоприемных устройств среднего ИК-диапазона [1,2]. При этом в современной литературе существует устоявшееся мнение, что одним из наиболее существенных источников шума в таких детекторах являются генерационно-рекомбинационные процессы, связанные с механизмом Шокли–Рида–Холла [3]. Как известно, подавление шумов данного типа реализуется за счет внедрения униполярного барьера, блокирующего основные носители [4]. По этой причине одно из актуальных направлений современной фотосенсорики среднего ИК-диапазона связано с разработкой технологий эпитаксиального роста барьерно-диодных структур (nВn в англоязычной литературе) на основе InSb [5].

Наряду с развитием технологий эпитаксиального роста гетероструктур с униполярным барьером необходима разработка методов контроля их электрофизических свойств, подразумевающих в первую очередь анализ однородности блокирующего слоя и определение высоты соответствующего потенциального барьера. Эти факторы являются ключевыми для ИК-детекторов с униполярным барьером и во многом определяют их шумовые характеристики, а также возможность работы при повышенных температурах. В настоящей работе на примере эпитаксиальных структур InSb/InAlSb/InSb с униполярным барьером InAlSb продемонстрировано, что простым и эффективным методом контроля униполярного барьера является картирование сопротивления растекания на сколе (110) гетероструктуры при комнатной температуре.

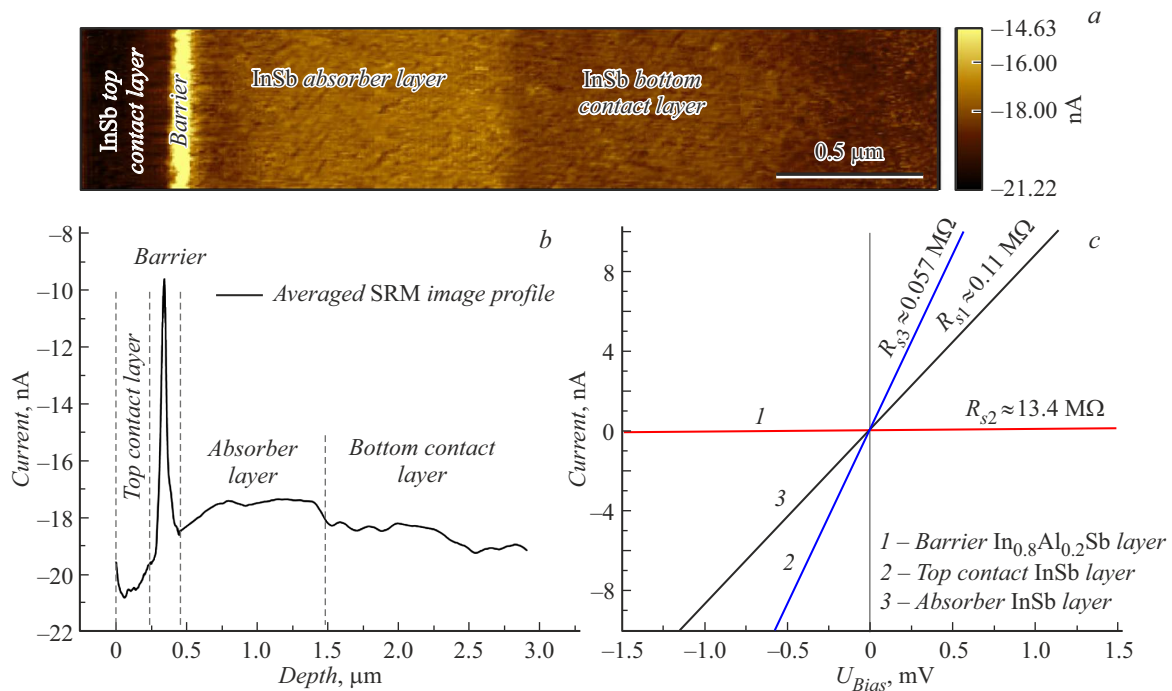
Барьерно-диодные гетероструктуры на основе InSb были выращены методом молекулярно-пучковой эпи-

таксии на подложках InSb (100) с n-типом проводимости на установке Ribber Compact-21T. Барьер в этих гетероструктурах был образован слоем InAlSb толщиной  $\sim 70$  nm. Для реализации верхнего и нижнего контактов в структуре были предусмотрены слои InSb толщиной до 400 nm, легированные теллуром до  $10^{17}$  cm<sup>-3</sup>. Дизайн структуры представлен на рис. 1, *a*. Характерное АСМ-изображение поверхности полученной барьерно-диодной структуры приведено на рис. 1, *b*. На поверхности образцов отсутствуют видимые дефекты, средняя шероховатость составляет 0.24 nm, что меньше величины одного монослоя и свидетельствует об атомарной гладкости поверхности. Параметры слоев в структурах были подтверждены на основе измерений рентгеновских кривых качания и их последующего моделирования (рис. 1, *c*). Измерения в режиме микроскопии сопротивления растекания (MCP) проводились с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47 Pro (NT-MDT) при комнатной температуре в атмосферных условиях. В работе использовались кремниевые зонды с алмазным проводящим покрытием, легированным бором (DCP30). Сила прижатия зонда к образцу составляла  $\sim 1000$  nN. Второй контакт осуществлялся посредством нанесения жидкой InGa-эвтектики на свежесколотую поверхность. Постоянное смещение прикладывалось к этому контакту, зонд заземлялся.

На рис. 2, *a* представлена характерная двумерная карта сопротивления растекания для барьерно-диодной архитектуры, полученная при напряжении  $U = -4$  mV. Для наглядности на рис. 2, *b* приведена усредненная зависимость силы тока от положения зонда на поверхности скола в направлении роста структуры. Как видно из рис. 2, *b*, наблюдается ожидаемый контраст



**Рис. 1.** *a* — дизайн барьерно-диодной структуры на основе InSb; *b* — АСМ-изображение поверхности структуры; *c* — XRD-изображение структуры (1 — экспериментальные данные, 2 — расчет для структуры с барьером  $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{Sb}$  толщиной 66 nm).



**Рис. 2.** *a* — двумерная карта МСР-сигнала для барьерно-диодной структуры InSb/InAlSb, полученная при  $U = -4$  mV; *b* — усредненный профиль двумерной карты; *c* — вольт-амперные характеристики, полученные в разных областях структуры при одинаковых условиях.

в барьерной области, а также различия в контактных и поглощающем слоях по величине тока из-за разной степени легирования. Номинально заложенные толщины совпадают с установленными на основе данных рис. 2, *a*. В то же время эффекты, связанные с закорачиванием барьера из-за возможной сегрегации материала во время эпитаксиального роста, отсутствуют.

На рис. 2, *c* представлены вольт-амперные характеристики, полученные для разных областей гетероструктуры. Наблюдаемая линейность свидетельствует об омическом характере контакта зонд–полупроводник. Точковый сигнал определяется с помощью выражения  $I = U/R_{total}$ , а  $R_{total}$  складывается из сопротивления зонда  $R_p$  и сопротивления растекания исследуемого образца  $R_s$ . Наличие

на сколе контраста от слоев с разной проводимостью указывает на то, что  $R_s \gg R_p$ , и, следовательно, в условиях эксперимента сопротивлением зонда можно пренебречь:  $I \approx U/R_s$ .

Сопротивление растекания определяется концентрацией носителей и их подвижностью. Это означает, что по соотношению токовых сигналов в двух точках можно определить соотношение концентраций носителей, если известно соотношение подвижностей:  $I_1/I_2 \propto R_{s2}/R_{s1} \propto \sigma_1/\sigma_2 \propto n_1\mu_1/n_2\mu_2$ . Поскольку все измерения проводились при комнатной температуре, основным фактором, определяющим подвижность носителей в материале, является рассеяние на оптических фононах, соответствующих связям In–Sb и Al–Sb. С учетом низкой (20%) мольной доли алюминия и соотношения характерных частот для LO-фононов, соответствующих разным типам связей [6,7], можно утверждать, что в условиях эксперимента электронная подвижность в  $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$  ( $x \approx 0.2$ ) будет слабо отличаться от таковой для InSb. Эффективная же масса электронов  $m_{n2}^* = 0.05m_0$  в  $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$  ( $x \approx 0.2$ ) может быть взята из линейной зависимости эффективной массы электрона от ширины запрещенной зоны для InSb и AlSb [8].

Перечисленные выше приближения позволяют использовать МСР для оценки высоты униполярного барьера в рассматриваемой системе на основе стандартного выражения для концентрации носителей заряда вблизи дна зоны проводимости

$$n_{CB} = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right),$$

где

$$N_C = 2 \left( \frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}.$$

$E_C$  — энергия дна зоны проводимости,  $E_F$  — химический потенциал. При наличии детального равновесия между поглощающим слоем InSb и барьером  $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$  выполняется равенство  $E_{F1} = E_{F2}$ . Таким образом, для высоты барьера  $\Delta E_C$  можно получить следующее выражение:

$$\Delta E_C = kT \ln \left[ \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \left( \frac{m_{n2}^*}{m_{n1}^*} \right)^{3/2} \right] = kT \ln \left[ \frac{R_{s2}}{R_{s1}} \left( \frac{m_{n2}^*}{m_{n1}^*} \right)^{3/2} \right]. \quad (1)$$

После подстановки в (1) значений  $R_s$ , полученных из данных рис. 2, с, находим, что высота барьера  $\Delta E_C$  в зоне проводимости составляет 0.18 eV. Данный результат согласуется с расчетными данными для барьерных слоев  $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ , представленными в работе [5]. Следует также отметить, что механические напряжения, возникающие из-за рассогласования постоянных решеток между  $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$  ( $x \approx 0.2$ ) и InSb, приводят к уменьшению  $E_g$  [9], что в свою очередь влияет на высоту  $\Delta E_C$ , однако более детальная оценка этого вклада требует дальнейшего исследования.

Таким образом, методом микроскопии сопротивления растекания исследована электронная подсистема барьерно-диодных структур InSb/InAlSb/InSb, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Измерения проводились на свежеприготовленных сколах гетероструктур, соответствующих плоскости (110). Показано, что при использовании кремниевых зондов с алмазным покрытием сопротивление зонда несущественно даже в случае умеренно легированных слоев. Эта особенность позволяет рассматривать микроскопию сопротивления растекания как метод прямого картирования произведения концентрации основных носителей на их подвижность. В свою очередь известная подвижность электронов в материалах данной группы позволяет пересчитывать сигнал в концентрацию носителей и затем восстанавливать профиль потенциала в зоне проводимости. Таким образом, микроскопия растекания позволила не только визуализировать неоднородность электронной подсистемы, связанную с блокирующими слоями InAlSb, но и оценить высоту соответствующего потенциального барьера. Это позволяет рассматривать микроскопию сопротивления растекания как эффективный метод характеристики барьерно-диодных структур, используемых для создания многоканальных детекторов средневолнового ИК-диапазона.

### Финансирование работы

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

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] H. Heidarzaden, Phys. Status Solidi B, **260** (3), 2200358 (2022). DOI: 10.1002/pssb.202200358
- [2] М.А. Суханов, А.К. Бакаров, Д.Ю. Протасов, К.С. Журавлев, Письма в ЖТФ, **46** (4), 3 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.04.49040.18055 [M.A. Sukhanov, A.K. Bakarov, D.Yu. Protasov, K.S. Zhuravlev, Tech. Phys. Lett., **46**, 154 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020020285].
- [3] F.M. Klaassen, J. Blok, F.J. De Hoog, Physica, **27** (2), 185 (1961). DOI: 10.1016/0031-8914(61)90041-6
- [4] S. Maimon, G.W. Wicks, Appl. Phys. Lett., **89** (15), 151109 (2006). DOI: 10.1063/1.2360235
- [5] A. Evirgen, J. Abautret, J.P. Perez, A. Cordat, A. Nedelcu, P. Christol, Electron. Lett., **50** (20), 1472 (2014). DOI: 10.1049/el.2014.2799
- [6] R. Xiao, H. Yan, Y. Pei, B. Li, K. Yang, J. Liu, X. Liu, J. Mater. Sci.: Mater. Electron., **30** (14), 13290 (2019). DOI: 10.1007/s10854-019-01692-4
- [7] H. Liu, Y. Zhang, E.H. Steenbergen, S. Liu, Z. Lin, Y.-H. Zhang, J. Kim, M.-H. Ji, T. Detchprohm, R.D. Dupuis, J.K. Kim, S.D. Hawkins, J.F. Klem, Phys. Rev. Appl., **8** (3), 034028 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.8.034028
- [8] J. Singh, *Semiconductor devices: basic principles* (John Wiley & Sons, 2000).
- [9] Y. Sun, S.E. Thompson, T. Nishida, J. Appl. Phys., **101** (10), 104503 (2007). DOI: 10.1063/1.2730561