

06.5;08.2

Особенности роста слоев в напряженных сверхрешетках InAs/GaSb

© Р.В. Левин, В.Н. Неведомский, Л.А. Сокура

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Lev@vregroup.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 20 июля 2021 г.

В окончательной редакции 4 октября 2021 г.

Принято к публикации 18 октября 2021 г.

Представлены результаты исследования факторов, влияющих на толщину переходных слоев в напряженных сверхрешетках InAs/GaSb при их выращивании методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Показано, что толщины интерфейсных слоев между InAs и GaSb практически не зависят от температуры роста. Регистрируемое влияние на толщину интерфейсных слоев оказывает направление переключения роста слоев. Наименьшая толщина 1.2–1.4 nm интерфейсного слоя была получена для направления переключения роста с GaSb на InAs.

Ключевые слова: газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений, напряженная сверхрешетка, InAs/GaSb, интерфейсный слой, просвечивающая электронная микроскопия.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.03.51974.18966

Фотоприемники, работающие в ближнем и среднем инфракрасном (ИК) диапазоне, могут использоваться в самых различных областях: от экологии (для детектирования вредных веществ в атмосфере) до военного применения. Разработка и создание таких устройств представляют собой весьма перспективную задачу. В настоящее время основной системой материалов для ИК-фотоприемников является HgCdTe. Напряженные сверхрешетки на основе InAs/GaSb позволяют расширить класс оптоэлектронных приборов для среднего и ближнего ИК-диапазона (вплоть до 15 μm), их использование является альтернативным подходом, который позволит понизить скорость оже-рекомбинации и, как следствие, повысить рабочую температуру [1,2].

Основным методом изготовления сверхрешеток InAs/GaSb в настоящее время является метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [3–5]. Как следует из литературных данных [6], минимальная толщина интерфейсных (т.е. переходных) слоев InAs/GaSb для метода МПЭ составляет около 1 монослоя (0.3 nm). Однако для массового производства приборов более предпочтительной технологией получения является газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (ГФЭМОС) по причине более низкой себестоимости. В настоящее время ГФЭМОС приоритетно используется для получения толстых (более 3 μm) слоев A^3B^5 , в частности InAs и GaSb. Однако при выращивании тонкослойных сверхрешеток возрастают требования к резкости и качеству интерфейса между слоями. Поэтому для метода ГФЭМОС необходимо проведение комплекса исследований стадий роста, которые влияют на резкость гетерограниц и на „качество“ квантовых ям, от которых зависят рабочие характеристики гетероструктуры. Например, в работе [7] была изучена зависимость толщины интерфейсных слоев в сверхрешетках InAs/GaSb, получаемых методом ГФЭМОС, от направления переключе-

ния роста с InAs на GaSb и наоборот. Их минимальная толщина составила 2.5–3.8 монослоев (0.75–1.14 nm).

Целью настоящей работы является изучение влияния температуры, условий и динамики переключения роста слоев InAs/GaSb/InAs на резкость и качество гетерограниц.

Структуры выращивались на установке ГФЭМОС AIX-200 (AIXTRON, Германия) на подложках *n*-GaSb (001). Давление в реакторе составляло 100 mbar. Газ-носитель — очищенный водород с точкой росы не хуже -100°C , суммарный поток через реактор составлял 5.5 slpm. Источниками элементов для роста были следующие соединения: триметилиндий (TMIn), триэтилгаллий (TEGa), триметилсурьма (TMSb) и арсин (AsH_3). Соотношение элементов V/III (условие полного пиролитического разложения реагентов) составило 93 для InAs и 22.5 для GaSb. Скорости роста InAs и GaSb поддерживались на одном уровне.

Полученные структуры были исследованы методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-2100F (Jeol, Япония) при ускоряющем напряжении 200 kV в режиме дифракционного контраста (двулучевые условия). Подготовка проб осуществлялась стандартным для гетероструктур методом: шлифовка с последовательным уменьшением размера зерна абразива и распылением ионами Ar^+ с энергией 4–0.5 keV под скользкими углами на конечном этапе.

Измерение толщин слоев проводилось по темнопольным ПЭМ-изображениям, полученным в двулучевых условиях с действующим вектором дифракции $\mathbf{g} = (002)$. В этом режиме механизм формирования контраста такой, что на изображении слои GaSb отделены от слоев InAs тонкой полосой темного контраста, которая соответствует переходному слою In(GaAs)Sb с постепенным взаимозамещением компонентов в подрешетках III и V групп. Границы слоев InAs/GaSb определялись по мини-

мумам контраста на профиле интенсивности, который соответствует середине переходного слоя In(GaAs)Sb. Границы же самого переходного слоя In(GaAs)Sb определялись на половинах высоты перепада интенсивности слоев In(GaAs)Sb/InAs и In(GaAs)Sb/GaSb.

Также следует заметить, что разрешающая способность ПЭМ в дифракционном режиме хуже, чем в режиме разрешения решетки, из-за меньшей апертуры объектной диафрагмы. Однако при используемой диафрагме пространственное разрешение ПЭМ будет не хуже 0.6 nm.

Проведенные исследования условно можно разделить на выявление двух закономерностей:

- 1) влияния температуры роста на толщину переходных слоев In(GaAs)Sb при прочих равных условиях;
- 2) влияния условий переключения подачи газов на толщину переходных слоев In(GaAs)Sb при выбранной температуре роста.

Для исследования влияния температуры роста на толщину интерфейсных слоев была выращена структура, состоящая из четырех групп по два слоя InAs в GaSb. Каждая группа выращивалась при постоянной температуре в диапазоне от 480 до 540°C с шагом 20°C. Толщина GaSb между группами была задана 30 nm, между слоями InAs внутри группы и толщина самих слоев InAs — 15 nm. Потоки реагентов элементов V и III групп поддерживались постоянными, а изменялась только температура роста с необходимой выдержкой для стабилизации ее возможных колебаний.

Конечно, при таком дизайне структуры возможные протяженные дефекты и другие особенности нижних слоев будут влиять на рост вышележащих слоев. Однако мы предположили (и это подтвердилось результатами ПЭМ-исследований), что нижние группы слоев будут иметь небольшую плотность прорастающих протяженных дефектов. А дефекты, генерирующиеся на конкретном слое, можно определять дифференциальным методом.

На изображении поперечного сечения структуры (рис. 1, *a*) в режиме, чувствительном к изменениям химического состава (темное поле с действующим дифракционным вектором $g = (002)$), хорошо видны четкие границы слоев InAs и GaSb, что удобно для определения их толщины. Протяженные дефекты можно наблюдать в других дифракционных условиях, например с действующим дифракционным вектором $g = (220)$ (рис. 1, *b*).

Помимо толщин слоев InAs, GaSb и переходных слоев In(GaAs)Sb по ПЭМ-изображениям было оценено качество структуры, а также наличие протяженных дефектов. Из рис. 1 видно, что в первой (нижней) паре слоев InAs/GaSb (температура роста 480°C) можно наблюдать неоднородность толщины слоев в латеральном направлении, промежутки между слоями InAs очень тонкий, встречаются дефекты-включения, создающие локальные упругие напряжения полусферической формы. Для второй пары (температура роста 500°C) наблюдается улучшение однородности толщин слоев,

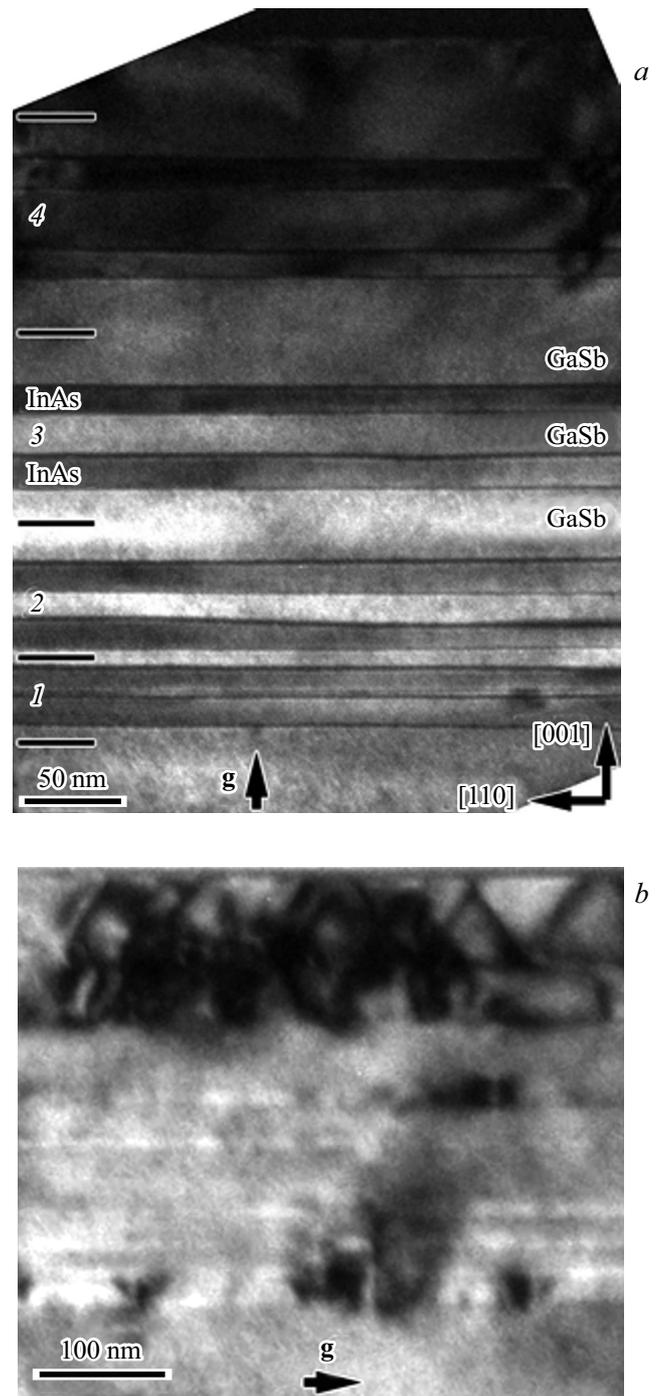


Рис. 1. ПЭМ-изображение поперечного сечения $(1\bar{1}0)$ образца со слоями InAs/GaSb, полученными при температурах 480–540°C, в различных дифракционных условиях. *a* — темнопольное изображение с действующим дифракционным вектором $g = (002)$. Цифрами 1–4 указаны номера групп слоев, горизонтальные отрезки между цифрами — условное разделение между группами из двух пар слоев InAs/GaSb. *b* — светлопольное изображение с действующим дифракционным вектором $g = (220)$.

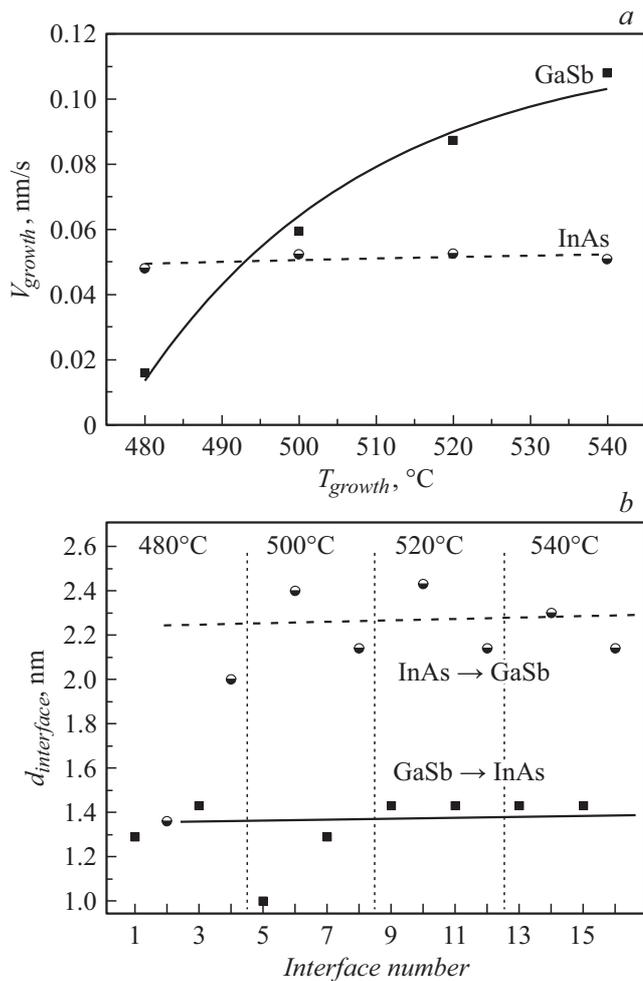


Рис. 2. Зависимости скорости роста бинарных слоев InAs и GaSb от температуры роста (a) и толщины переходного слоя между InAs/GaSb от его номера и соответственно температуры роста (b).

меньшее количество дефектов. Для третьей пары слоев (температура роста 520 °C) обнаружена лучшая в этом образце однородность толщины слоев, однако встречается некоторое количество протяженных дефектов. Для четвертой (самой верхней) пары слоев (температура роста 540 °C) однородность толщины в латеральном направлении такая же, как и в третьей паре, однако плотность протяженных дефектов на один-два порядка больше, чем во всех нижележащих слоях. Из рис. 1, b очевидно, что дефектов больше всего именно в четвертой паре. На основании изложенного выше был сделан вывод, что оптимальная температура роста на установке AIX-200 составляет 500–520 °C, в этом случае в слоях генерируется минимальное количество дефектов и сами слои имеют приемлемую однородность толщины. Поэтому для выявления закономерности влияния условий переключения подачи газов на толщину переходных слоев In(GaAs)Sb при фиксированной температуре роста была выбрана температура 500 °C.

Помимо оценки плотности дефектов по результатам ПЭМ-исследований были проведены измерения толщины отдельных слоев InAs, GaSb и толщины интерфейсных слоев In(GaAs)Sb между InAs/GaSb (рис. 2, b). Скорости роста слоев InAs, GaSb (рис. 2, a) были оценены по толщине слоев.

Из рис. 2, a видно, что скорость роста слоев InAs в диапазоне температур 480–540 °C остается постоянной. Однако скорость роста слоев для GaSb зависит от температуры роста и с увеличением последней возрастает в 6 раз. Такое поведение скорости роста, вероятно, связано с увеличением эффективности пиролитического разложения TMSb с 13% при 480 °C до 90% при 540 °C [8], что в свою очередь приводит к увеличению соотношения TMSb/TEGa с 2.9 до 20.3.

Из зависимости, представленной на рис. 2, b, можно видеть, что толщины интерфейсных слоев между InAs/GaSb от температуры роста практически не зависят. И при синхронной подаче обоих реагентов на толщину интерфейсных слоев оказывает влияние направление переключения роста слоев. Меньшая толщина интерфейсного слоя между InAs/GaSb в данном эксперименте была получена для направления переключения роста с GaSb на InAs и составила 1.2–1.4 nm, что близко к значению толщины интерфейсного слоя, полученному в работе [7]. Возможно, образование более толстых интерфейсных слоев In(GaAs)Sb при направлении переключения роста InAs → GaSb связано с повышенной скоростью роста бинарных слоев GaSb.

Для выявления закономерностей влияния условий переключения подачи газов на толщину переходных слоев In(GaAs)Sb была выращена структура аналогичного дизайна (четыре группы по два слоя InAs в GaSb) при температуре роста 500 °C. При росте разных групп слоев использовались различные задержки при переключении реагентов. Так же как и выше, измерялись толщины переходных слоев In(GaAs)Sb, оценивалась однородность толщины слоев InAs и GaSb, учитывалась плотность возникающих протяженных дефектов.

На рис. 3 построена зависимость толщины интерфейсного слоя от последовательности подачи реагентов и направления переключения роста. Светлыми квадратами отмечена последовательность GaSb → InAs: после роста GaSb подавался стабилизационный поток TMSb в течение 2–10 s, далее следовала продувка водородом в течение 30 s, а затем рост слоя InAs начинали с введения в реактор AsH₃ в течение 2–10 s с последующей подачей TMIIn. Темными квадратами отмечена последовательность InAs → GaSb: после роста InAs подавался стабилизационный поток AsH₃ в течение 2–10 s, далее следовала продувка водородом в течение 30 s, а затем рост слоя GaSb начинали с введения в реактор TMSb на 2–10 s раньше TEGa.

Минимальная толщина интерфейсного слоя наблюдалась для направления переключения роста GaSb → InAs и подачи AsH₃ на 2 s раньше TMIIn. Как видно из рис. 3, увеличение времени упреждения подачи элемента

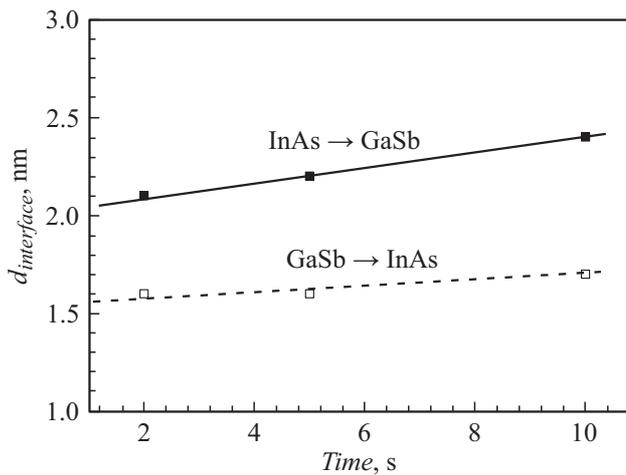


Рис. 3. Зависимость толщины интерфейсного слоя от направления переключения роста и времени упреждения подачи реагентов относительно друг друга.

V группы в обеих последовательностях приводило к увеличению интерфейсного слоя. Следует отметить, что направление переключения роста InAs→GaSb более чувствительно ко времени упреждения подачи элемента V группы относительно элемента III группы, что выражается в увеличении толщины интерфейсного слоя с 2.1 nm при упреждении на 2 s до 2.4 nm при упреждении на 10 s.

Проведенные исследования показали, что толщина интерфейсных слоев In(GaAs)Sb на границе бинарных слоев InAs/GaSb практически не зависит от температуры роста. Тем не менее оптимальная температура роста на установке AIX-200 находится в диапазоне 500–520°C, так как при такой температуре в слоях генерируется наименьшая плотность протяженных дефектов. Основное влияние на толщину интерфейсных слоев In(GaAs)Sb оказывает направление переключения газов-источников реагентов. Наименьшая толщина 1.2–1.4 nm была зарегистрирована для направления переключения роста с GaSb на InAs при подаче AsH₃ всего на 2 s раньше TMin.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C.H. Grein, P.M. Young, H. Ehrenreich, *Appl. Phys. Lett.*, **61** (24), 2905 (1992). DOI: 10.1063/1.108480
- [2] D.L. Smith, C. Mailhot, *J. Appl. Phys.*, **62** (6), 2545 (1987). DOI: 10.1063/1.339468
- [3] M. Razeghi, B.-M. Nguyen, *Rep. Prog. Phys.*, **77**, 082401 (2014). DOI: 10.1088/0034-4885/77/8/082401
- [4] A. Rogalski, P. Martyniuk, M. Kopytko, *Appl. Phys. Rev.*, **4** (3), 031304 (2017). DOI: 10.1063/1.4999077
- [5] J. Wu, Z. Xu, J. Chen, L. He, *Infrared Phys. Technol.*, **92**, 18 (2018). DOI: 10.1016/j.infrared.2018.05.004

- [6] M.K. Hudait, M. Clavel, P.S. Goley, Y. Xie, J.J. Heremans, Y. Jiang, Z. Jiang, D. Smirnov, G.D. Sanders, C.J. Stanton, *Mater. Adv.*, **1** (5), 1099 (2020). DOI: 10.1039/D0MA00046A
- [7] X. Li, J. Cui, Y. Zhao, Q. Wu, Y. Teng, X. Hao, Y. Chen, J. Liu, H. Zhu, Y. Huang, Y. Yao, *J. Appl. Phys.*, **127** (4), 045305 (2020). DOI: 10.1063/1.5115269
- [8] G.B. Stringfellow, *Organometallic vapor-phase epitaxy*, 2nd ed. (Academic Press, London–N.Y., 1999), p. 260.