

# Гетероэпитаксиальные структуры $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ на градиентных буферных слоях $\text{GaInSb}$ и $\text{AlGaInSb}$

© Р.Р. Гусейнов<sup>1</sup>, В.А. Танрывердиев<sup>1</sup>, G. Kipshidze<sup>2</sup>, Е.Н. Алиева<sup>1</sup>,  
Х.В. Алигулиева<sup>1</sup>, Н.А. Абдуллаев<sup>1,¶</sup>, Н.Т. Мамедов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Национальной академии наук Азербайджана,  
AZ-1143 Баку, Азербайджан

<sup>2</sup> Stony Brook University, Stony Brook,  
New York 11794, USA

¶ E-mail: gela.kishidze@stonybrook.edu, abnadir@mail.ru

(Получена 7 сентября 2016 г. Принята к печати 19 сентября 2016 г.)

Получены нерелаксированные слои твердого раствора  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $x = 0.43$  и  $0.38$ ) методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием градиентных буферных слоев  $\text{GaInSb}$  и  $\text{AlGaInSb}$ . Высокое качество полученных тонких пленок подтверждается результатами исследований высокоразрешающей рентгеновской дифракции и микро-рамановского рассеяния. Выявлен двухмодовый тип перестройки фононных спектров твердых растворов  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ .

DOI: 10.21883/FTP.2017.04.44351.8401

## 1. Введение

Узкозонные полупроводники являются важнейшими востребованными материалами при конструировании фотоэлектронных приборов для научных и различных практических применений. Твердые растворы на основе антимонида  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ , которые могут поглощать и излучать свет в технологически важной области спектра от 2 до  $> 10$  мкм, являются оптимальными полупроводниками для удовлетворения этого спроса. Например, с помощью инфракрасных (ИК) лазеров как элементов полупроводниковых газоанализаторов осуществляют химический контроль выбросов в атмосферу, так как в диапазоне длин волн 2–5 мкм лежат полосы поглощения многих вредных (токсичных) промышленных газов. Если учесть, что окна прозрачности атмосферы лежат в диапазоне длин волн 3.5–5 и 8–13 мкм, полупроводниковые лазеры на основе твердых растворов  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ , очевидно, могут найти широкое практическое применение в области телекоммуникации и локации. Широкое применение находят ИК лазеры в различных областях человеческой деятельности — в биологии, медицине, в создании бытовых приборов, оборонной промышленности и т. д.

Перспективы получения высокого значения времени жизни неосновных носителей заряда и отсутствие принципиального ограничения на длину диффузии дырок делают антимониды группы III–V перспективными материалами для инфракрасной технологии, не требующими дополнительного охлаждения. Эти материалы могут быть использованы для разработки диодных лазеров, светоизлучающих диодов, фотоприемников, тепловизоров, насыщающихся поглотителей, модуляторов, фильтров и т. д.

Основным сдерживающим фактором для получения и широкого применения тонкопленочных фотоэлектронных устройств на основе твердых растворов  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  является отсутствие подложек с близкими величина-

ми постоянной решетки. Различие постоянных решетки получаемой пленки  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  и подложки является причиной возникновения напряжений и деформаций в пленке, приводящих к созданию большой плотности дислокаций, влияющих в свою очередь на основные физические параметры и стабильность работы фотоэлектронных устройств. Таким образом, целью работы являлось получение и всесторонние физические исследования метаморфных тонких пленок твердого раствора  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ , свободных от внутренних напряжений и дислокаций, с шириной фундаментальной запрещенной зоны в диапазоне 100–350 мэВ.

## 2. Получение эпитаксиальной структуры $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$

Как известно, ширина запрещенной зоны полупроводникового соединения  $\text{InAs}$  составляет  $E_g = 407.4$  мэВ, а  $\text{InSb}$  —  $E_g = 227.3$  мэВ при температуре 77 К [1]. В твердых растворах  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  ширина запрещенной зоны плавно меняется, уменьшаясь с увеличением содержания атомов Sb. Самым интересным является то, что при концентрациях атомов Sb, близких к 50% ( $x = 0.5$ ), ширина запрещенной зоны может быть меньше, чем даже в  $\text{InSb}$ , и достигает 100 мэВ [2,3]. Согласно [2,3], зависимость ширины запрещенной зоны от состава хорошо описывается соотношением

$$E_g(\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x) = (1-x)E_g(\text{InAs}) + xE_g(\text{InSb}) - x(1-x)C, \quad (1)$$

где подгоночный параметр  $C = 0.67-0.87$  эВ зависит от структурного совершенства образцов и температуры [4].

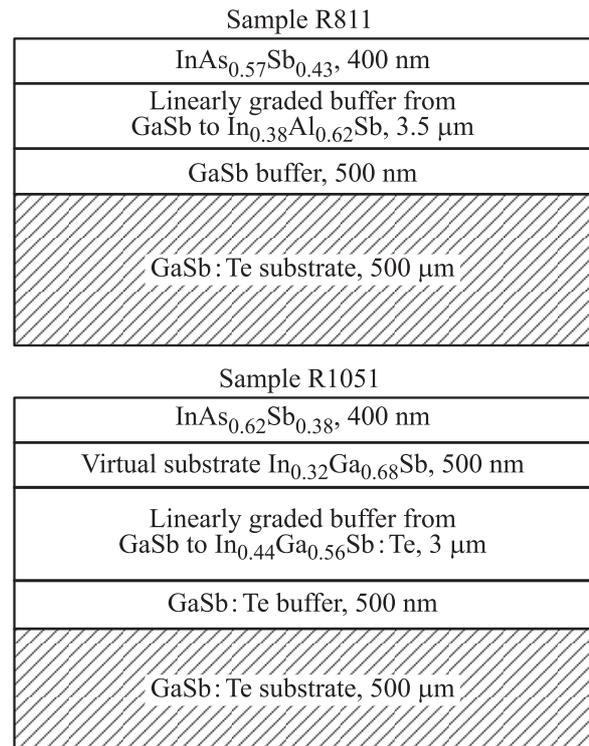
В технологии получения высококачественных тонких пленок, свободных от внутренних напряжений и дисло-

каций, важную роль играет выбор подложки, на которой будет происходить рост пленки. При этом важную роль приобретает соответствие постоянной решетки верхнего слоя подложки постоянной решетки выращиваемой пленки. Получение таких микроструктур является само по себе уникальной и сложной технологической задачей, решаемой за счет использования специальных режимов молекулярной эпитаксии переходного буферного слоя, релаксация напряжения в котором происходит преимущественно путем образования дислокаций несоответствия, локализованных в области интерфейса.

Рост составов с постоянными решетками, не соответствующими материалу выбранных подложек, приводит к механическим напряжениям и накоплению энергии деформации, которая в конечном счете релаксирует через пластическую деформацию. Таким образом формируются дислокации несоответствия. При этом сегменты вводимых дислокаций проходят через растущий эпитаксиальный слой и образуют так называемые пронизывающие дислокации. Наличие дислокаций в эпитаксиальном слое существенно ухудшает характеристики слоя, делая практически невозможным использование таких структур для создания электронных или оптических приборов.

Альтернативный метод, основанный на росте ступенчато-градиентных слоев, был предложен авторами [5,6]. Эти ступенчато-градиентные слои являются буфером между получаемой пленкой  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  и подложкой. Несоответствие в буферном слое постепенно увеличивается от нуля до заданного значения на определенном расстоянии. Расчеты показывают, что верхняя часть ступенчато-градиентного буфера должна оставаться бездислокационной [6]. В упрощенной модели это способствует скольжению по первичным плоскостям скольжения (111), уменьшая таким образом количество пронизывающих дислокаций, необходимых для релаксации напряжений. Объем распределения дислокаций несоответствия минимизирует скопления и делает натяжение более равномерным. Эти качественные соображения уже реализованы в материалах SiGe, GaInAs, GaInP и эффективность градиентных буферных слоев наглядно показана [5].

Нами были использованы высококачественные ориентированные подложки GaSb фирмы WaferTech LLC. Постоянные решетки GaSb и InSb равны 6.096 и 6.479 Å соответственно [1], т.е. имеется несоответствие > 6%. Это несоответствие для эпитаксии псевдоморфных твердых растворов  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  постепенно устранялось применением композиционных ступенчатых метаморфических буферных слоев (Al,Ga,In)(As,Sb). Молекулярно-лучевая эпитаксия пленок проводилась на установке Veeco molecular beam epitaxy system Gen-930. Композиция градуированной буферной зоны AlGaInSb подбиралась на принципах, описанных в [6]. Температура подложки при росте буферной зоны менялась в диапазоне 460–520°C. При эпитаксиальном росте состава  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  температура подложки составляла ~ 415°C.



**Рис. 1.** Состав и толщины слоев гетероэпитаксиальных структур с твердыми растворами  $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$  (образец R811) и  $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$  (образец R1051).

Скорость роста была ~ 1 мкм/ч. Характеристики (состав и толщины слоев) полученных многослойных эпитаксиальных гетероструктур содержащих твердые растворы с  $x = 0.43$  (образец R811) и  $x = 0.38$  (образец R1051), приведены на рис. 1.

Из данных просвечивающей электронной микроскопии следует, что дислокации несоответствия в основном возникают в нижней области буферного слоя на границе с подложкой GaSb и локализованы в области ~ (1.5–2) мкм [7].

### 3. Рентгеновская дифракция

Как известно, полупроводниковые соединения группы  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  кристаллизуются в решетке типа сфалерита, или цинковой обманки (ZnS). Одни атомы (безразлично  $\text{A}^{\text{III}}$  или  $\text{B}^{\text{V}}$ ) занимают вершины и центры граней элементарной кубической ячейки, в то время как атомы другого вида — центры 4 (из 8) октантов. Таким образом, структура  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  подобна структуре алмаза, с той лишь разницей, что в объеме элементарной ячейки размещены атомы иного вида, чем в вершинах и на гранях ее. Каждый атом в объеме ячейки связан с 4 атомами иного сорта так же, как в структуре алмаза. Связи эти ковалентные, полярные. На одну элементарную ячейку приходится 8 атомов.

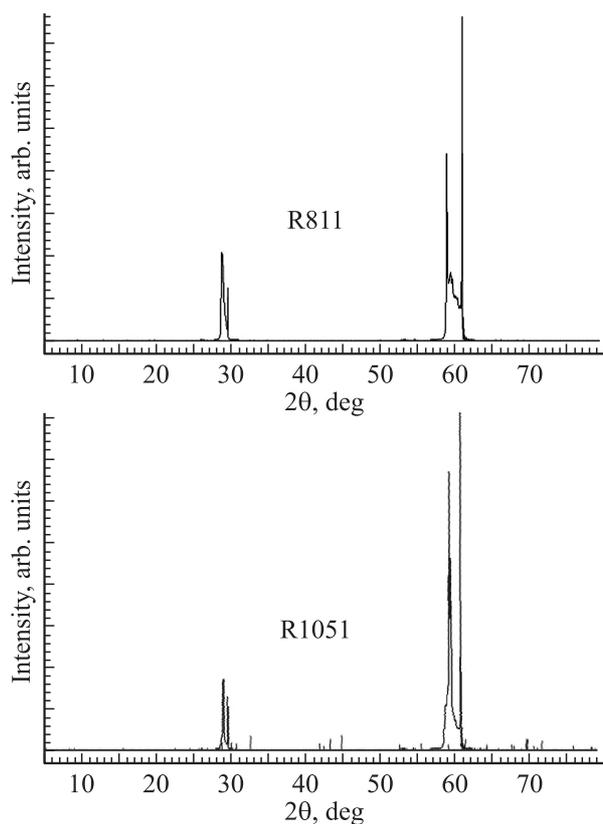


Рис. 2. Рентгеновская дифракция от образцов R811 ( $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ ) и R1051 ( $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ ).

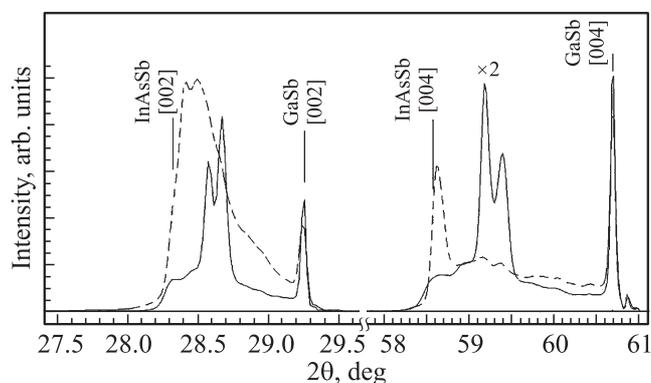


Рис. 3. Рентгеновская дифракция от образцов R811 (штриховая линия) и R1051 (сплошная линия).

### 3.1. $2\theta$ -сканирование

На рис. 2 представлены результаты исследования рентгеновской дифракции от образцов R811 ( $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ ) и R1051 ( $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ ). Хорошо видны, как для образца R811, так и для образца R1051, рефлексы [002] и [004] от верхнего слоя  $\text{InAsSb}$  и рефлексы [002] и [004] от подложки  $\text{GaSb}$ . Уширение между линиями обусловлено вкладом в рентгеновскую дифракцию буферной зоны с близкими постоянными решетками. На рис. 3 в увеличенном масштабе приведены

результаты  $2\theta$ -сканирования для обоих составов, R811 ( $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ ) и R1051 ( $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ ), штриховой и сплошной линиями соответственно. Хорошо заметно, что изменение  $x$  в  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  совсем не влияет, как и должно быть, на положение рефлексов [002] и [004] от подложки  $\text{GaSb}$ , в то время как положение и интенсивности рефлексов от составов  $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$  и  $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$  заметно изменяются. Надо отметить, что реперные рефлексы [002] и [004] на рис. 3 приведены только для состава  $\text{InAs}_{0.5}\text{Sb}_{0.5}$ , имеющегося в базе данных, они смещены несколько левее максимумов пиков. С уменьшением в составе твердого раствора количества атомов сурьмы ( $\text{Sb}$ ) наряду с изменением интенсивности рефлексов происходит смещение положения пиков рефлексов в сторону больших углов, что свидетельствует об уменьшении постоянной решетки. Действительно, атомы сурьмы в сравнении с атомами мышьяка ( $\text{As}$ ) обладают большим радиусом и при уменьшении их относительного количества в твердом растворе естественно ожидать уменьшения постоянной решетки. Это также согласуется с выполнением правила Вегарта.

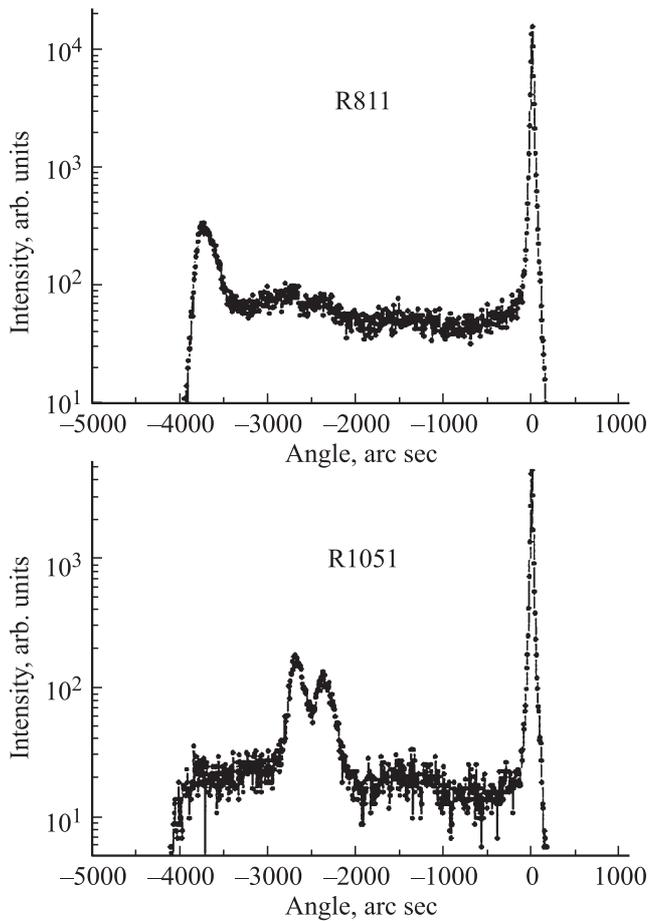
### 3.2. Кривые качания

Наиболее распространенным методом определения механических напряжений, а также степени релаксации решетки в многослойных системах является высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия. При рассмотрении брэгговской дифракции в кристалле малое количество плоскостей дает очень широкий пик в угловом распределении интенсивности, соответственно большое количество плоскостей — узкий пик, приближающийся к характерному для объемного кристалла.

В многослойных структурах наличие нескольких слоев с различными межплоскостными расстояниями приводит к наблюдению в кривых качания несколько близко лежащих широких пиков в угловом распределении интенсивности для заданного рефлекса. На рис. 4 приведены кривые качания для рефлекса [004]. Сканирование производилось с шагом  $\sim 7''$ . Узкий дифракционный пик соответствует толстой однородной подложке  $\text{GaSb}$ . Для образца R811 наблюдается один уширенный пик, обусловленный соответствием параметров решетки верхнего слоя буфера  $\text{In}_{0.38}\text{Al}_{0.62}$  и рабочего слоя  $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ . На дифракционной картине образца R1051 наблюдаются два уширенных пика, различающихся по углу на  $\sim 300''$ , что, в свою очередь, обусловлено слабым различием параметров решетки верхнего слоя буфера  $\text{In}_{0.32}\text{Al}_{0.68}$  и рабочего слоя  $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ .

### 3.3. Карты обратного пространства

Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия очень эффективна, однако корректное определение степени релаксации в буферных слоях стандартными методами рентгеноструктурного анализа (на основе съемки кривых дифракционного отражения) осложняется

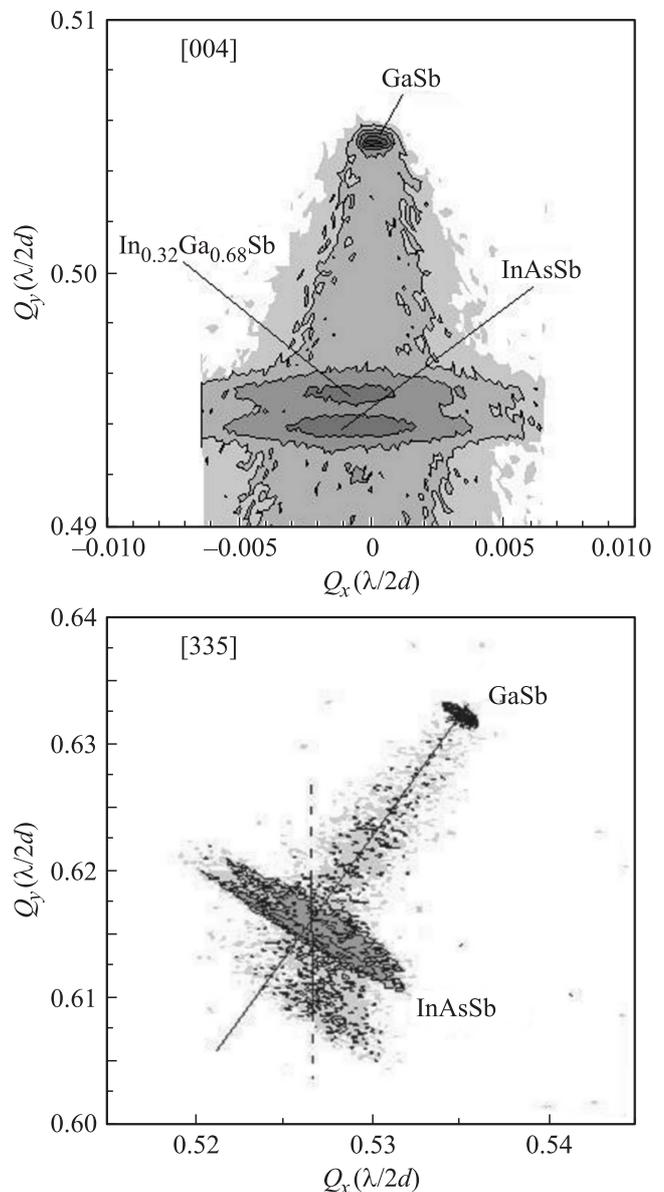


**Рис. 4.** Кривые качания для рефлекса [004] образцов R811 ( $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ ) и R1051 ( $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ ).

многослойностью и сложностью архитектуры гетероструктуры. Сложность архитектуры многослойной гетероструктуры заключается в образовании между слоями углов наклона, которые зачастую имеют также и компоненту кручения. Такое сложное в кристаллографическом отношении устройство гетероструктуры требует построения карт обратного пространства, которые позволяют путем качественного сравнения определить также и степень совершенства слоя. Следует отметить, что корректное построение карт обратного пространства требует больших временных затрат работы рентгеновского дифрактометра и значительных усилий. Поэтому зачастую в рентгенографических исследованиях многослойных гетероструктур с использованием этого метода ограничиваются получением качественной информации, сочетая симметричную и асимметричную съемки.

На рис. 5 представлены карты распределения интенсивности дифрагированного излучения в  $q$ -пространстве вокруг симметричного узла [004] и асимметричного узла [335] для образца R1051. По положению интерференционных максимумов на карте узлов [004] и [335] из известных формул определены параметры кристаллической решетки в направлении роста ( $a_{\perp}$ ) и в

плоскости роста ( $a_{\parallel}$ ). Основным достоинством построения карт обратного пространства является возможность определения релаксации параметров кристаллической решетки эпитаксиальных слоев к параметру подложки в гетероструктурах. Оно основано на том, что интенсивность рассеяния от нерелаксированных полностью напряженных эпитаксиальных гетероструктур распределена в плоскости рассеяния в направлении, параллельном нормали к поверхности. В этом же направлении могут быть расположены дополнительные рефлексы — центры отражения от отдельных слоев, толщиные осцилляции, а также узлы, соответствующие дифракции от сверхрешеток. На рис. 5 для симметричной съемки вокруг узла [004] хорошо заметны центры отражения не только от подложки GaSb, но также от виртуальной подложки



**Рис. 5.** Карты обратного  $q$ -пространства, полученные вокруг узлов [004] и [335] для образца R1051.

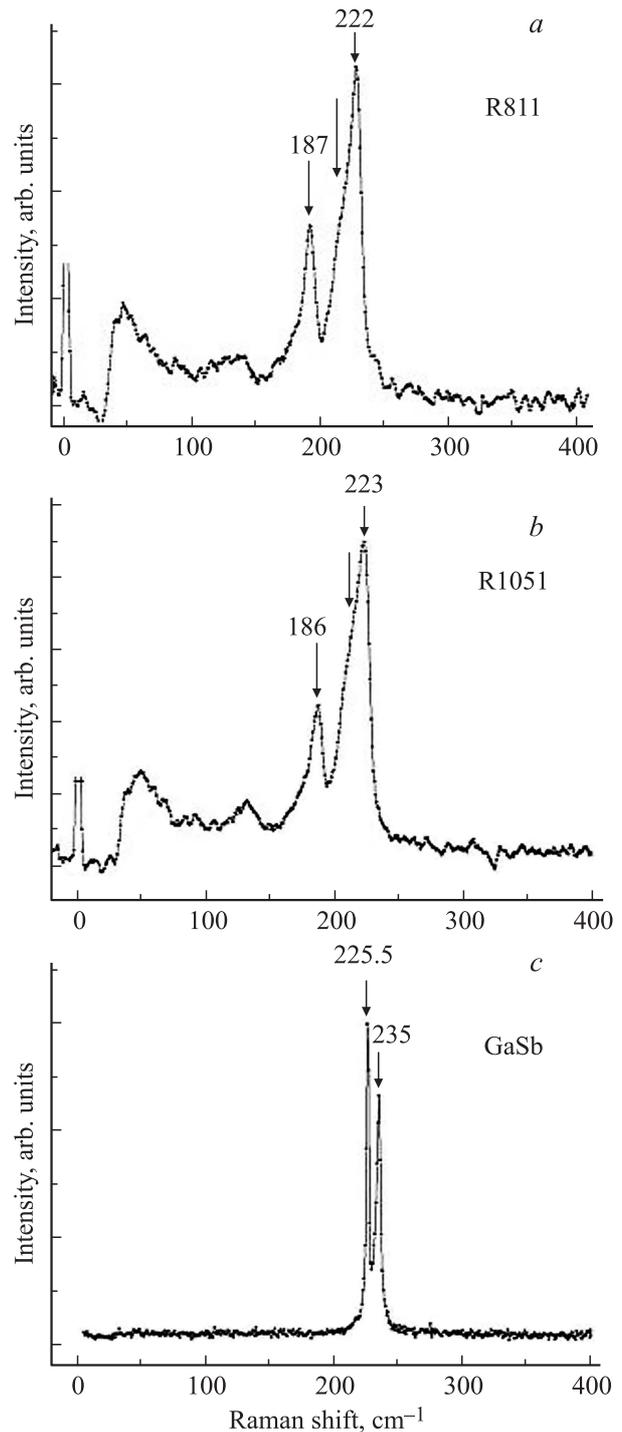
$\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{Sb}$  и эпитаксиального слоя  $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$  при  $Q_y = 0.494$  и  $0.496$ , что соответствует на кривых качания (рис. 4)  $\sim 300''$ . Релаксация отображается на картах распределения интенсивности вокруг узлов обратной решетки, соответствующих асимметричным брэгговским отражениям. Для полностью релаксированной структуры узлы — центры отражения отдельных слоев — должны лежать вдоль вектора дифракции. При частичной релаксации они занимают некоторое промежуточное положение. На рис. 5 для асимметричной съемки вокруг узла  $[335]$  хорошо видна почти полная релаксация напряжений при росте эпитаксиальной гетероструктуры от подложки  $\text{GaSb}$  до верхней части буферного слоя (сплошная линия) и псевдоморфный рост верхней части буферного слоя и эпитаксиального слоя  $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$  (вертикальная штриховая линия).

#### 4. Комбинационное рассеяние света

Хорошо известно, что для кристаллов группы  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  с кубической решеткой характерны два активных в комбинационном рассеянии света (КРС) фонона: продольный оптический (ЛО) и поперечный оптический (ТО). Согласно [8], в объемных монокристаллах  $\text{InAs}$  частота ЛО-фонона равна  $242\text{ см}^{-1}$ , а ТО-фонона —  $220\text{ см}^{-1}$ , в  $\text{InSb}$  частота ЛО-фонона равна  $193\text{ см}^{-1}$ , а ТО-фонона —  $185\text{ см}^{-1}$ .

Нами были проведены исследования комбинационного рассеяния света в гетероэпитаксиальных структурах R811 (со слоем  $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ ) и R1051 (со слоем  $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ ) на конфокальном рамановском микроспектрометре „Nanofinder 30“ (Tokyo Instr., Japan). Исследования проводились в геометрии обратного рассеяния. В качестве источника возбуждающего света использовался лазер  $\text{YAG:Nd}$  с длиной волны излучения на второй гармонике  $\lambda = 532\text{ нм}$ . Приемником излучения служила охлаждаемая CCD-камера ( $-70^\circ\text{C}$ ), работающая в режиме счета фотонов, время экспозиции обычно составляло 5 мин, мощность падающего на образец излучения  $7\text{--}9\text{ мВт}$ , диаметр луча  $\sim 4\text{ мкм}$ . В спектрометре использовалась дифракционная решетка  $1800\text{ штрихов/мм}$ , точность определения спектрального положения линий была не хуже  $0.5\text{ см}^{-1}$ .

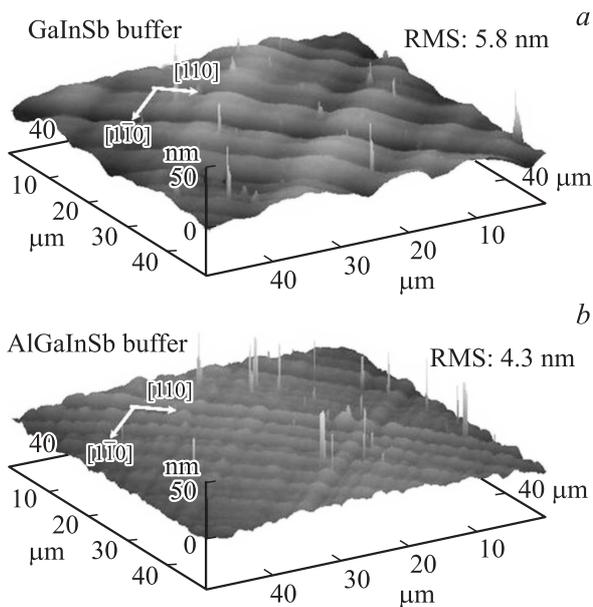
Глубина проникновения лазерного излучения и, следовательно, эффективная глубина анализа при рамановском рассеянии могут быть определены из соотношения  $\lambda/2\pi k$ , где  $k$  — коэффициент экстинкции. Для излучения лазера с длиной волны  $\lambda = 532\text{ нм}$  при анализе системы  $\text{InAsSb}$  такая глубина составляет с учетом данных по коэффициенту экстинкции для  $\text{InAs}$  и  $\text{InSb}$  [9] до  $\sim 100\text{ нм}$ . Это дает право говорить о том, что, используя данную длину волны лазера для рамановского рассеяния, мы получим информацию лишь от верхнего слоя исследуемого многослойного покрытия. Согласно правилам отбора, получаемым из анализа тензоров рамановского рассеяния для кристаллов с алмазной струк-



**Рис. 6.** Спектры комбинационного рассеяния света от образцов R811 (a), R1051 (b) и подложки GaSb (c).

турой при обратном рассеянии от поверхности (100), могут наблюдаться только продольные оптические (ЛО) фононы, а появление поперечных оптических (ТО) фононов запрещено.

Высокая однородность полученных гетероэпитаксиальных структур была подтверждена данными исследований спектров микро-КРС путем сканирования ла-



**Рис. 7.** Результаты исследований в атомно-силовом микроскопе рельефа поверхности гетероэпитаксиальных структур, выращенных на буферах GaInSb (a) и AlGaInSb (b). Указаны значения среднеквадратичной шероховатости RMS.

зерным лучом по поверхности структуры (площадью  $100 \times 100$  мкм) в режиме картирования. На рис. 6 представлены спектры комбинационного рассеяния в режиме обратного рассеяния при комнатной температуре. Очевидно, что для твердого раствора  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  характерен двухмодовый тип перестройки фоновых спектров. В работе [10] по данным исследований комбинационного рассеяния света на тонких пленках твердого раствора  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ), выращенных на подложках GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии, также было установлено двухмодовое поведение оптических фононов. На рис. 6 хорошо наблюдаются несколько фоновых полос. Это разрешенная правилами отбора для данной геометрии рассеяния интенсивная фоновая полоса на частотах  $187 \text{ см}^{-1}$  ( $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ ) или  $186 \text{ см}^{-1}$  ( $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ ), соответствующая продольному оптическому фонону в InSb (InSb-like LO) и асимметричная широкая фоновая полоса на частотах  $222 \text{ см}^{-1}$  ( $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ ) или  $223 \text{ см}^{-1}$  ( $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ ), представляющая собой наложение двух полос от оптических продольных и поперечных фононов в InAs (InAs-like LO и InAs-like TO). Наблюдение запрещенной в данной геометрии рамановских исследований полосы TO-фононов является, по-видимому, следствием нарушения симметрии кристаллической решетки эпитаксиальной пленки вследствие разупорядочений в кристаллической решетке твердого раствора и небольшого отклонения от геометрии обратного рассеяния. Необходимо отметить высокое качество объемной подложки GaSb, характеризующееся узкими спектральными линиями с полуширинами линий  $\sim 3 \text{ см}^{-1}$  (рис. 6, c). Положения частот соответствуют

активным в КРС LO- ( $235 \text{ см}^{-1}$ ) и TO- ( $226 \text{ см}^{-1}$ ) фононам в GaSb [8].

Видно, что при уменьшении в  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  количества атомов Sb (образец R1051) фоновая полоса  $222 \text{ см}^{-1}$  смещается в стороны больших частот, т.е. частот КРС-активных фононов, характерных для InAs. Природа наблюдаемых менее интенсивных широких полос при  $\sim 140 \text{ см}^{-1}$  не установлена, и требуются дополнительные исследования.

В работе [10] экспериментально установлено, что частоты LO- и TO-фононов (в  $\text{см}^{-1}$ ) в зависимости от состава (от  $x$  в твердом растворе  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ) меняются линейно следующим образом: частота InAs-like LO  $\nu_{L1} = 238 - 32x$ ; частота InAs-like TO  $\nu_{T1} = 219 - 27x$ ; частота InSb-like LO  $\nu_{L2} = 177 + 12x$ . Для исследованных нами твердых растворов с  $x = 0.43$  (R811) и  $0.38$  (R1051) значения частот удовлетворительно согласуются.

## 5. Исследование морфологии поверхности с помощью сканирующей атомной микроскопии

Исследования рельефа поверхности эпитаксиальных слоев  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  были проведены на атомно-силовом микроскопе марки AIST-NT (Tokyo Instr., Japan). Исследования образцов проводились в полуконтактном резонансном режиме.

Как видно из рис. 7, поверхность эпитаксиальных слоев очень гладкая, среднеквадратичная шероховатость в пределах 4–6 нм. Структура, выращенная на буфере GaInSb, имеет более шероховатую поверхность, чем структура, выращенная на буфере AlGaInSb.

## 6. Заключение

Совместный анализ экспериментальных данных, полученных методами высокоразрешающей рентгеновской дифракции, сканирующей силовой микроскопии, рамановского рассеяния, показал, что полученные твердые растворы  $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$  и  $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$  растут когерентно на градиентных буферных слоях AlGaInSb и GaInSb соответственно. Полученные гетероэпитаксиальные структуры имеют хорошее структурное качество, что прослеживается по форме симметричных и асимметричных рефлексов в обратном пространстве. Высокая однородность полученных гетероэпитаксиальных структур была подтверждена данными исследований спектров микро-КРС. Данные конфокальной рамановской спектроскопии также свидетельствуют о двухмодовом типе перестройки фоновых спектров твердых растворов  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ .

В следующей работе предполагается опубликовать результаты оптических исследований полученных гетероэпитаксиальных структур методом спектральной эллипсометрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке US National Science Foundation (Grant No DMR1160843) и Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской Республики (грант EIF-2013-9(15)-46/06/1).

Авторы благодарны G.L. Belenky за плодотворные обсуждения и всемерную поддержку при выполнении данной работы.

## Список литературы

- [1] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. *J. Appl. Phys.*, **89**, 5815 (2001).
- [2] Z.M. Fang, K.Y. Ma, D.H. Jaw, R.M. Cohen, G.B. Stringfellow. *J. Appl. Phys.*, **67**, 7034 (1990).
- [3] M.Y. Yen, R. People, K.W. Wecht, A.Y. Cho. *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 489 (1988).
- [4] S.P. Svensson, W.L. Sarney, H. Hier, Y. Lin, D. Wang, D. Donetsky, L. Shterengas, G. Kipshidze, G.L. Belenky. *Phys. Rev. B*, **86**, 245205 (2012).
- [5] E.A. Fitzgerald, Y.H. Xie, M.L. Green, D. Brasen, A.R. Kortan, J. Michel, Y.J. Mii, B.E. Weir. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 811 (1991).
- [6] J. Tersoff. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 693 (1993).
- [7] G.L. Belenky, D. Donetsky, G. Kipshidze, D. Wang, L. Shterengas, W.L. Sarney, S.P. Svensson. *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 141116 (2011).
- [8] M. Razeghi. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, **23**, 149 (2003).
- [9] D.E. Aspnes, A.A. Studna. *Phys. Rev. B*, **27**, 985 (1983).
- [10] Y.B. Li, S.S. Dosandjh, I.T. Ferguson, A.G. Norman, A.G. de Oliveyra, R.A. Stradling, R. Zallen. *Semicond. Sci. Technol.*, **7**, 567 (1992).

Редактор Л.В. Шаронова

## $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ heteroepitaxial structures on $\text{GaInSb}$ and $\text{AlGaInSb}$ compositionally graded buffer layers

R.R. Guseynov<sup>1</sup>, V.A. Tanriverdiyev<sup>1</sup>, G. Kipshidze<sup>2</sup>,  
Y.N. Aliyeva<sup>1</sup>, Kh.V. Aliguliyeva<sup>1</sup>, N.A. Abdullayev<sup>1</sup>,  
N.T. Mamedov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics,  
National Academy of Sciences of Azerbaijan,  
AZ-1143 Baku, Azerbaijan

<sup>2</sup> Stony Brook University, Stony Brook,  
New York 11794, USA

**Abstract** Unrelaxed  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  layers ( $x = 0.43$  and  $0.38$ ) with lattice constants up to 2% larger than that of  $\text{GaSb}$  substrates were grown by molecular beam epitaxy on  $\text{GaInSb}$  and  $\text{AlGaInSb}$  compositionally graded buffer layers. The high quality of the thin films obtained is confirmed by the results of high-resolution X-ray diffraction and micro-Raman scattering studies. Raman studies revealed two-mode type of reconstruction of the phonon spectra of  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  solid solutions.