

Исследование возможностей метода газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений для изготовления тонких слоев InAs/GaSb

© Р.В. Левин,¹ Б.В. Пушный,¹ И.В. Федоров,^{1,2} А.А. Усикова,¹ В.Н. Неведомский,¹ Н.Л. Баженов,¹
К.Д. Мынбаев,^{1,2} Н.В. Павлов,¹ Г.Г. Зегря¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: Lev@vpregroup.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 29 ноября 2018 г.

В окончательной редакции 29 ноября 2018 г.

Принято к публикации 10 апреля 2019 г.

Исследованы возможности метода газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСГФЭ) для изготовления структур с тонкими (1–2 nm) чередующимися слоями InAs/GaSb на подложке GaSb. Свойства структур были изучены методами просвечивающей электронной микроскопии и фото- и электролюминесценции. Было установлено, что при использованных условиях роста в активной области структур происходило формирование двух твердых растворов GaInAsSb различных составов. Для полученной системы было характерным излучение на длине волны 4.96 μm при температуре 77 К. Результаты работы демонстрируют новые возможности метода МОСГФЭ для инженерии запрещенной зоны полупроводниковых структур на основе InAs/GaSb, предназначенных для создания приборов оптоэлектроники, работающих в инфракрасном диапазоне длин волн.

Ключевые слова: узкозонные полупроводники A^{III}B^V, напряженные сверхрешетки, МОСГФЭ, электролюминесценция.

DOI: 10.21883/JTF.2019.10.48178.412-18

Введение

Полупроводниковые системы A^{III}B^V на базе соединений In, As, Ga и Sb в последнее время широко используются для создания приборов фото- и оптоэлектроники инфракрасного (ИК) диапазона. Многие годы основным материалом средневолнового (СВ, длины волн 2–6 μm) и длинноволнового (ДВ, 8–14 μm) ИК-диапазонов оставался твердый раствор HgCdTe, однако проблемы, связанные с неоднородностью по составу пластин большой площади и значительные токи утечек в приборных структурах, заставили искать ему альтернативу [1]. Приборы СВ ИК-диапазона с приемлемым качеством на основе узкозонных полупроводников A^{III}B^V могут быть изготовлены с использованием эпитаксиальных слоев бинарных соединений и их твердых растворов, однако для таких структур характерен ряд существенных недостатков, среди которых можно выделить высокую скорость безызлучательной (оже-) рекомбинации и сильную температурную зависимость параметров приборной структуры. Эти недостатки определяются фундаментальными причинами — спецификой зонной структуры рассматриваемых материалов и температурной зависимостью ширины запрещенной зоны E_g полупроводников, и не могут быть преодолены в структурах на основе „объемных“ материалов. Данные

проблемы, однако, могут быть частично решены в структурах со сверхрешетками (СР), где возможно как подавление оже-рекомбинации [2,3], так и получение слабой температурной зависимости „оптической“ E_g (см., например, [4–7]). При этом СР предоставляют возможности для создания различных структур даже большие, чем твердые растворы. Так, технология СР на базе гетеропереходов II-го типа InAs/GaSb путем изменения толщины слоев, составляющих активную область структур, позволяет создавать приборы с рабочей длиной волны от 3 до 30 μm [8–11], что делает такие структуры альтернативой традиционным материалам не только СВ, но и ДВ ИК-диапазонов. Кроме того, эффективная масса электронов в СР InAs/GaSb (0.02–0.03 m_0) существенно больше, чем в HgCdTe (0.009 m_0) с аналогичной величиной E_g в 0.1 eV, а значит, туннельные токи в приборных структурах на основе СР меньше [11].

Основным методом изготовления СР InAs/GaSb сейчас является молекулярно-лучевая эпитаксия, но данная технология оптимальна для исследовательских целей и мелкосерийного, но не массового производства. Промышленное изготовление полупроводниковых приборов, в том числе для приложений в области опто- и фотоэлектроники, традиционно производится методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСГФЭ). С учетом все возрастающих потребностей

в приборах оптоэлектроники СВ ИК диапазона (см., например, обзоры [11,12]), отработка и совершенствование технологии МОСГФЭ для структур на основе InAs/GaSb становится весьма актуальной, однако количество исследований в этой области пока ограничено [13–20]. Кроме того, до самого последнего времени исследования роста СР в системе InAs/GaSb методом МОСГФЭ проводились с выращиванием относительно толстых (толщиной более 5 nm) слоев [14–20]. В настоящей работе представлены результаты изготовления и характеристики системы из сверхтонких (толщиной менее 5 nm) слоев InAs/GaSb, выращенных МОСГФЭ.

Методика экспериментов

Структуры были изготовлены на подложках *n*-GaSb(001) (концентрация электронов при 300 К $n = (5-7) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) с использованием буферного слоя *n*-GaSb:Te (толщина $d = 0.5 \mu\text{m}$, $n = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Активная область структуры состояла из 20 чередующихся слоев InAs и GaSb с одинаковыми толщинами. Толщины слоев при росте для трех исследованных структур задавались как 0,5, 1 и 2 nm. Активная область покрывалась слоем *p*-GaSb:Si ($d = 1 \mu\text{m}$, концентрация дырок $p = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Схема структур представлена на рис. 1.

Структуры были изготовлены на установке МОСГФЭ AIX-200 (AIXTRON, Германия). Давление в реакторе составляло 76 mm Hg. Подложка во время роста вращалась со скоростью 100 rpm. В качестве газа-носителя использовался очищенный водород с точкой росы не хуже -100°C , суммарный поток через реактор составлял 5.5 l/min. Источниками элементов для роста были триметилиндий (TMIn), триэтилгаллий (TEGa), триметилсурьма (TMSb) и арсин (AsH_3). В качестве источников легирующих примесей использовали диэтилтеллур (DETe) (буферный слой) и силан (SiH_4) (прикрывающий слой). Слои InAs и GaSb преднамеренно не легировались. Температура выращивания буферного

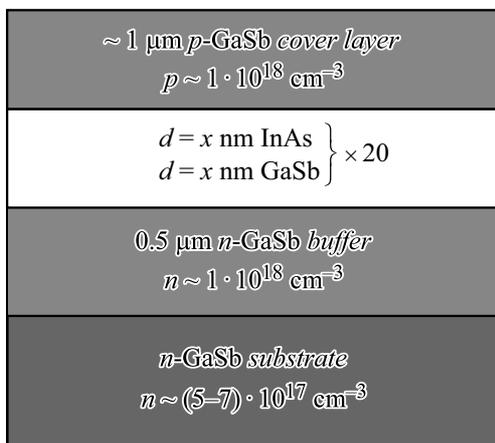


Рис. 1. Схема исследованных структур на основе InAs/GaSb.

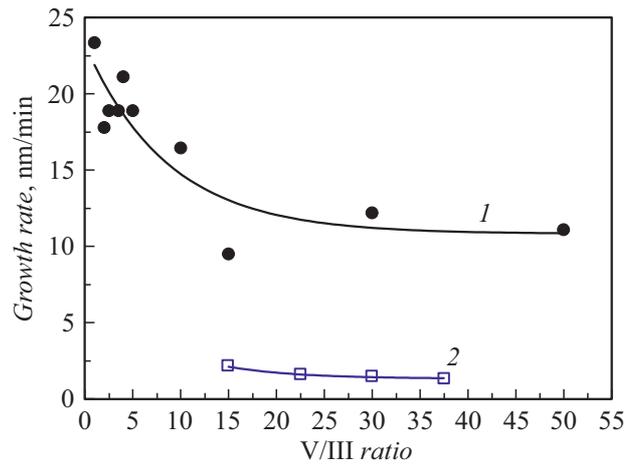


Рис. 2. Зависимости скоростей роста эпитаксиальных слоев GaSb на подложке GaSb от соотношения молярных потоков: $T_{growth} = 600^\circ\text{C}$, $F_{TEGa} = 2.9 \cdot 10^{-5} \text{ mol/min}$ (1) и $T_{growth} = 500^\circ\text{C}$, $F_{TEGa} = 5.4 \cdot 10^{-5} \text{ mol/min}$ (2). Символы — экспериментальные значения, кривые — их аппроксимации сплайном.

и прикрывающего слоя GaSb была $T_{growth} = 600^\circ\text{C}$, а активной области $T_{growth} = 500^\circ\text{C}$. При росте буферного и прикрывающего слоя GaSb соотношение элементов TMSb/TEGa составило 2, а слоев InAs и GaSb, — $\text{AsH}_3/\text{TMIn} = 124$ и $\text{TMSb/TEGa} = 22.5$ соответственно. Скорость роста для буферного и прикрывающего слоев GaSb составила $\sim 23 \text{ nm/min}$, для изготовления активной области скорость роста GaSb и InAs подбирали примерно одинаковой ($\sim 1.5 \text{ nm/min}$).

Для предотвращения роста на границах тонких слоев InAs и GaSb материала переменного состава их изготовление проводилось с прерыванием ростового процесса и продувкой реактора чистым водородом для полной смены газовой среды. Для всех слоев время прерывания составляло 10 s. Выращивание каждого слоя GaSb началось с подачи TEGa на 2 s раньше подачи TMSb, а рост каждого слоя InAs — с подачи AsH_3 на 2 s раньше подачи TMIn для предотвращения возможности роста InSb, предсказанного в работе [21]. Особенности выращивания слоев рассматриваемым методом описаны в патенте РФ [22]. Толщины слоев в системе определялись временем роста. Так, на рис. 2 приведена зависимость скорости роста эпитаксиальных слоев GaSb на подложке GaSb от соотношения молярных потоков, где F_{TEGa} — молярный поток TEGa. Из этой зависимости видно, что увеличение соотношения молярных потоков элементов V и III групп приводит к уменьшению скорости роста, причем в рассматриваемом диапазоне соотношения потоков для температуры роста 600°C скорость можно изменять в два раза.

Исследования микроструктуры образцов выполнялись методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM2100F с ускоряющим напряжением 200 kV в режиме темного поля. Образцы

для ПЭМ были подготовлены в поперечном сечении по общепринятой процедуре с использованием механической шлифовки и полировки с финишным утонением ламели путем распыления материала ионами Ar^+ с энергией $\sim 3 \text{ keV}$ под скользящим углом к поверхности. При исследовании в электронном микроскопе применялся режим дифракционного контраста в двулучевых условиях.

Для исследования электролюминесценции (ЭЛ) были изготовлены мезаструктуры диаметром $\sim 700 \mu\text{m}$. Омические контакты к структурам были получены термическим испарением в вакууме системы $\text{Cr}/\text{Au}-\text{Te}/\text{Au}$ (контакт к подложке $n\text{-GaSb}$) и $\text{Cr}/\text{Au}+\text{Ge}/\text{Au}$ (контакт к прикрывающему слою $p\text{-GaSb}$). Спектры ЭЛ записывались в диапазоне температур $T = 70\text{--}125 \text{ K}$ при импульсном возбуждении (частота 1 kHz , длительность импульса $1 \mu\text{s}$) с использованием автоматизированной установки на основе решеточного монохроматора МДР-23 и синхронного детектора. Спектры фотолюминесценции записывались в аналогичном режиме при возбуждении сигнала полупроводниковым лазером с длиной волны $1.03 \mu\text{m}$. В качестве детектора использовался охлаждаемый фотодиод на основе InSb .

Экспериментальные результаты

На рис. 3 представлены изображения ПЭМ исследованных образцов. В результате исследований ПЭМ было установлено, что образец *A* с толщиной слоев $\text{InAs}/\text{GaSb} < 1 \text{ nm}$ имел очень высокую плотность (более $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) протяженных дефектов в активной области структуры (рис. 3, *a*). Количество и плотность ($(1\text{--}2) \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$) дефектов в образце *B* с толщиной слоев $\text{InAs}/\text{GaSb} \sim 1 \text{ nm}$ была существенно ниже, чем у образца *a* (рис. 3, *b*). В образце *C* с толщиной слоев $\text{InAs}/\text{GaSb} \sim 2 \text{ nm}$ плотность дефектов была наименьшей (менее предела обнаружения в рассматриваемых условиях, $4 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$) (рис. 3, *c*).

На изображениях ПЭМ видно, что для всех образцов толщины слоев неоднородны как в латеральном направлении, так и „от слоя к слою“, а границы слоев имеют более темный контраст, чем GaSb и InAs . Это говорит об образовании на границах тонких переходных слоев InGaSb и/или GaAsSb .

Для образца *A* из-за высокой плотности структурных дефектов определить фактические толщины слоев оказалось сложно, можно было лишь оценить, что они составили менее 1 nm (рис. 3, *a*). На изображении ПЭМ поперечного среза образца *C* (рис. 3, *c*) структурных дефектов не наблюдается, но видно, что толщины слоев меняются как в латеральном направлении, так и от слоя к слою. Фактические толщины слоев по данным ПЭМ для данного образца составили $1.2\text{--}3.2 \text{ nm}$ при заданных 2 nm . Характерная картина изменения толщины слоев как в латеральном направлении, так и от слоя к слою наблюдалась и для образца *B*, где структурные дефекты

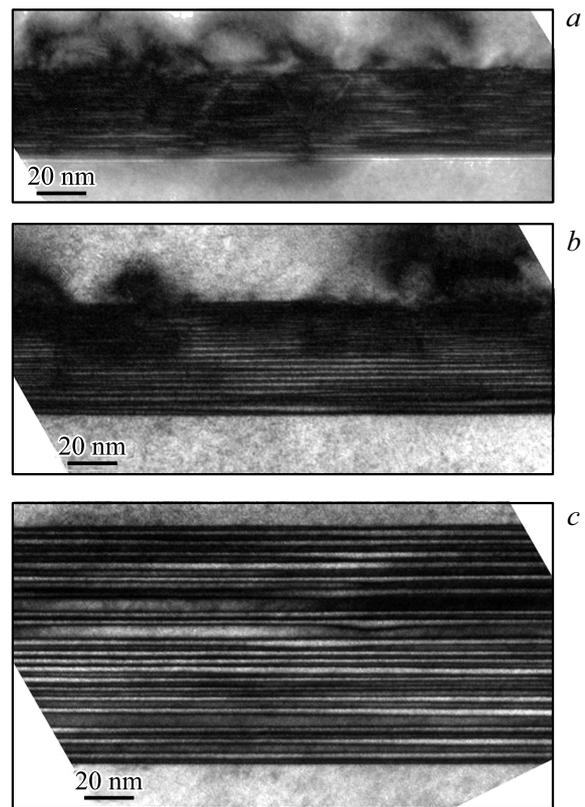


Рис. 3. Темнопольные изображения поперечного сечения (1–10) образцов, полученные в отражении с вектором дифракции $g = (002)$, чувствительным к изменениям химического состава: образец *A*, $d < 1 \text{ nm}$ (*a*); образец *B*, $d = 1 \text{ nm}$ (*b*); образец *C*, $d = 2 \text{ nm}$ (*c*).

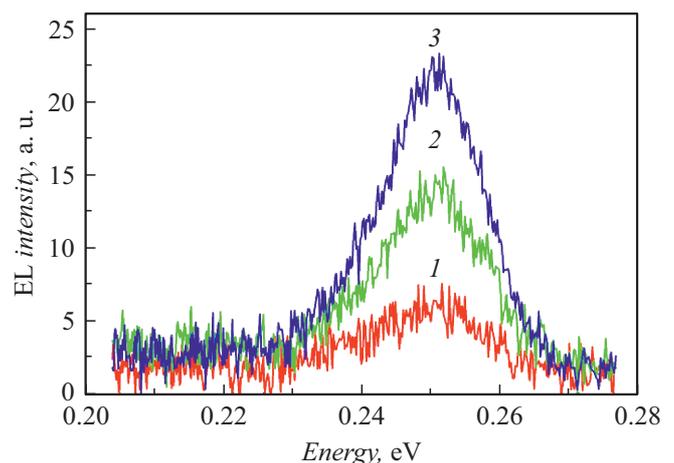


Рис. 4. Спектры ЭЛ образца *C* (при $T = 77 \text{ K}$) при различных токах возбуждения: 1 — 4, 2 — 6 и 3 — 8 А.

появлялись лишь в верхней части активной области (рис. 3, *b*).

На рис. 4 показаны спектры ЭЛ образца *C*, записанные при $T = 77 \text{ K}$ и токах возбуждения от 4 до 8 А в

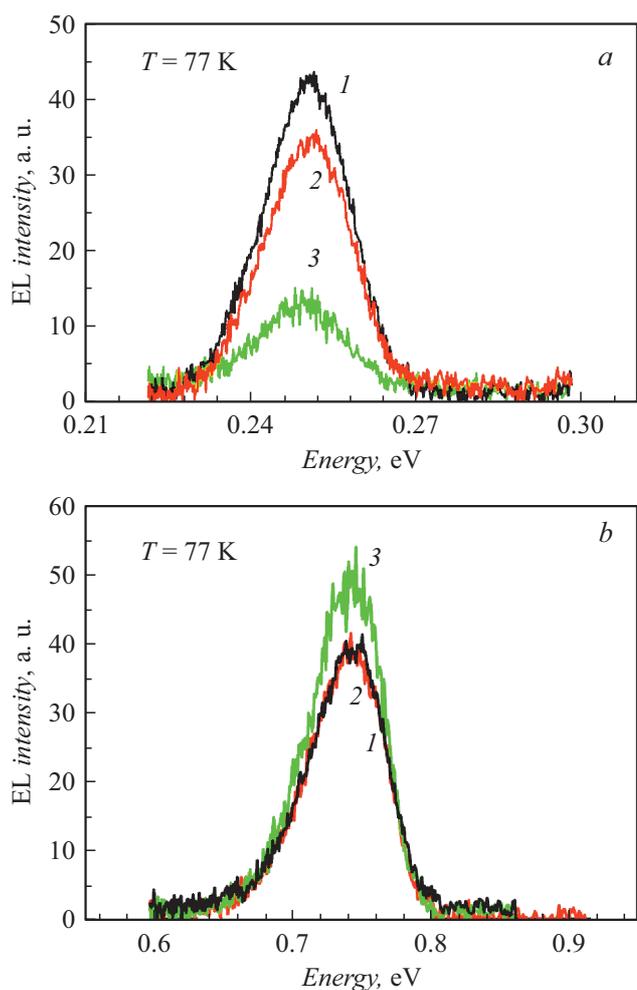


Рис. 5. Спектры ЭЛ образцов А (кривые 1), В (2) и С (3) ($T = 77\text{ K}$) в длинноволновой (а) и коротковолновой (б) областях ИК диапазона при токе возбуждения 8 А.

диапазоне энергий $\sim 0.2\text{--}0.3\text{ eV}$. На спектрах наблюдался явный максимум, соответствующий энергии 0.25 eV (длина волны $4.96\text{ }\mu\text{m}$). Видно, что при изменении тока возбуждения в рассматриваемых пределах не происходило видимого изменения ни положения максимума, ни формы линии ЭЛ.

На рис. 5,а представлены спектры ЭЛ всех трех структур, записанные при $T = 77\text{ K}$ в том же диапазоне энергий. Видно, что положение максимума ЭЛ оставалось неизменным вне зависимости от толщины слоев InAs/GaSb , формирующих активную область структуры. Полуширина пика ЭЛ при $T = 77\text{ K}$ составляла приблизительно 16 meV для всех исследованных образцов. Следует отметить, что с увеличением толщины слоев в активной области от образца к образцу интенсивность сигнала ЭЛ уменьшалась. Спектры фотолюминесценции всех трех структур (на рисунках не показаны) содержали аналогичные пики, причем положение их максимумов и полуширины при 77 K были такими же, как у пиков в спектрах ЭЛ.

На рис. 5, б представлены спектры ЭЛ всех трех образцов, записанные в коротковолновой области, в диапазоне энергий $0.45\text{--}0.90\text{ eV}$. Как видно, здесь для всех структур наблюдалась полоса ЭЛ с максимумом 0.74 eV , причем положение максимума и форма линии ЭЛ этой полосы были практически идентичными для всех образцов. Полуширина этой полосы при 77 K составила $\sim 60\text{ meV}$. Положение максимума и полуширина данной полосы ЭЛ при 77 K оказались идентичными таковым для спектральной линии фотолюминесценции подложек GaSb , использованных для выращивания структур. Таким образом, данную полосу ЭЛ можно однозначно приписать излучению из легированной теллуром подложки.

Полученная из экспериментов температурная зависимость положения длинноволнового пика ЭЛ для образца С в диапазоне температур $70\text{--}125\text{ K}$ хорошо аппроксимировалась линейной зависимостью и будет обсуждена ниже.

Обсуждение результатов

При анализе полученных экспериментальных данных обращает на себя внимание тот факт, что положение пика ЭЛ не зависело от толщины слоев, составляющих активную область (рис. 5,а). Это указывает на то, что при выращивании образцов не происходило формирования квантово-размерной структуры, поскольку, как известно, положение пика люминесценции СР зависит, в том числе и от толщины слоев, ее составляющих (см., например, работы [23,24]). Отсутствие формирования СР подтверждалось и тем, что на кривых рентгеновской дифракции от выращенных структур не наблюдалось соответствующих слоям СР рефлексов. Поскольку слои, составляющие изучаемую структуру, имели очень малую толщину, было естественно предположить, что в процессе роста произошла взаимная диффузия компонентов осаждаемых бинарных соединений, и образовался твердый раствор, как это происходит, например, при выращивании полупроводниковых твердых растворов методом МОСГФЭ с использованием технологии многослойного осаждения с взаимной диффузией [25].

Однако для адекватного объяснения наблюдаемых спектров ЭЛ следует предположить формирование в активной области структур сразу двух твердых растворов. Так, например, пик излучения с энергией 0.25 eV соответствует ширине запрещенной зоны твердого раствора $\text{InAs}_{0.775}\text{Sb}_{0.225}$. На рис. 6 представлены зависимости ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ от массовой доли у мышьяка при различных значениях массовой доли x галлия в диапазоне x от 0 до 0.08 (параметры материалов для расчета были взяты из работы [26]). Штриховой линией на рисунке показана линия, соответствующая энергии пика 0.25 eV , наблюдавшейся в эксперименте. Если предположить содержание в данном твердом растворе небольшого количества галлия (до значений массовой доли галлия $x = 8\%$,

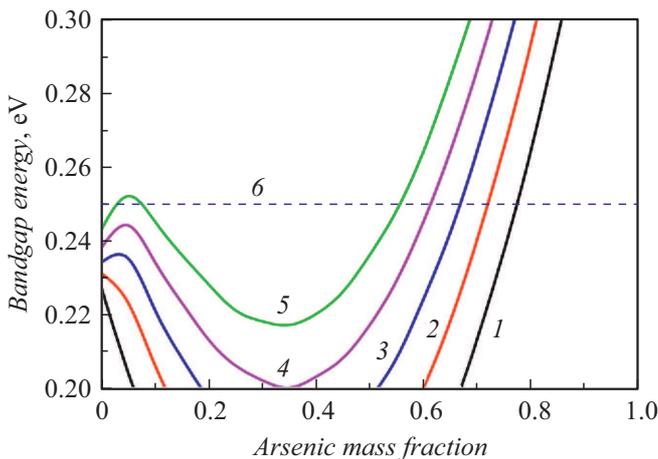


Рис. 6. Расчетные зависимости ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ от массовой доли у мышьяка при различных значениях массовой доли x галлия. x : 1 — 0, 2 — 0.02, 3 — 0.04, 4 — 0.06, 5 — 0.08, 6 — показана линия, соответствующая $E_g = 0.25$ eV.

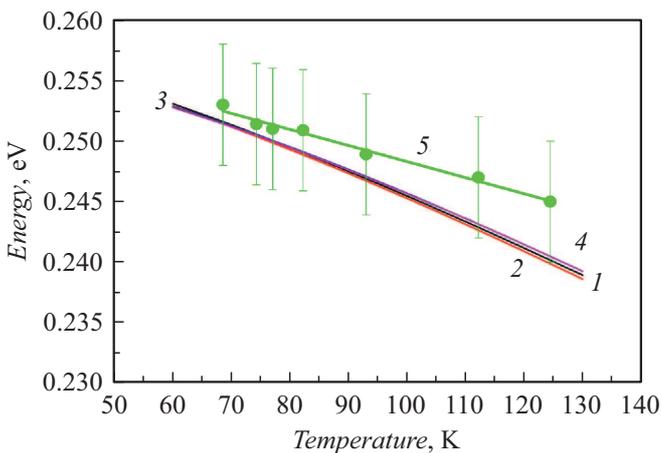


Рис. 7. Расчетные температурные зависимости ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ при различных значениях x и y : $x = 0$, $y = 0.225$ (кривая 1); $x = 0.08$, $y = 0.445$ (2); $x = 0.08$, $y = 0.93$ (3); $x = 0.08$, $y = 0.982$ (4). Символами показаны энергии пиков ЭЛ, полученные из эксперимента, кривая 5 — линейная аппроксимация экспериментальной зависимости этой энергии от температуры.

далее наступает область несмешиваемости), то начиная с $x = 7.5\%$, наблюдаемому пику будут соответствовать три различных состава. Например, для $x = 8\%$ данные составы будут иметь вид: $\text{Ga}_{0.08}\text{In}_{0.92}\text{As}_{0.555}\text{Sb}_{0.445}$, $\text{Ga}_{0.08}\text{In}_{0.92}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ и $\text{Ga}_{0.08}\text{In}_{0.92}\text{As}_{0.018}\text{Sb}_{0.982}$. В предположении, что области существования обоих образовавшихся твердых растворов имеют примерно одинаковый объем, составу первого раствора $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ будет соответствовать состав $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$. Составу $\text{InAs}_{0.775}\text{Sb}_{0.225}$ будет соответствовать $\text{GaAs}_{0.225}\text{Sb}_{0.775}$ с шириной запрещенной зоны 0.711 eV, что очень близко к энергии высокоэнергетического пика ЭЛ

(поэтому излучение такого твердого раствора может маскироваться люминесценцией из подложки). Составу $\text{Ga}_{0.08}\text{In}_{0.92}\text{As}_{0.555}\text{Sb}_{0.445}$ будет соответствовать $\text{Ga}_{0.92}\text{In}_{0.08}\text{As}_{0.445}\text{Sb}_{0.555}$ с $E_g = 0.785$ eV, что также близко к энергии высокоэнергетического пика ЭЛ. Двум другим составам соответствуют растворы, близкие к GaAs, со значением энергии, выходящим за пределы исследуемого спектрального диапазона. Также следует отметить, что всем четырем вариантам состава твердого раствора соответствует практически идентичное поведение зависимости $E_g(T)$. Эти зависимости приведены на рис. 7 вместе с энергиями пиков ЭЛ, полученными из экспериментов, и их линейной аппроксимацией. С учетом того что значение E_g , получаемое из данных экспериментов по люминесценции узкозонных полупроводников должно, строго говоря, определяться из расчетного спектра с подгонкой его высокоэнергетической части к экспериментальному и всегда несколько меньше энергии пика люминесценции [27], а также относительно невысокой точности определения величины энергии пика, можно считать согласие расчетных и экспериментальных данных удовлетворительным.

Таким образом, при выращивании тонких (толщиной 1–2 nm) чередующихся (20 периодов) слоев InAs/GaSb методом МОСГФЭ нами была обнаружена тенденция к одновременному образованию двух твердых растворов GaInAsSb различного состава. Формирования сверхрешеток в рассматриваемых условиях роста не происходило. В то же время изготовленная система характеризовалась устойчивым излучением при температуре 77 K на длине волны 4.96 μm . Полученные результаты демонстрируют новые возможности системы InAs/GaSb при инженерии запрещенной зоны полупроводниковых структур, предназначенных для работы в среднем ИК-диапазоне. Для получения рассматриваемой технологией СР с тонкими слоями материалов необходимо провести исследования по увеличению толщин слоев и минимизации толщин переходных областей на границах слоев.

Заключение

В работе представлены результаты исследования возможностей метода МОСГФЭ при изготовлении тонких слоев InAs/GaSb. Выращенные структуры со слоями InAs и GaSb равной толщины в 1–2 nm были охарактеризованы методами ПЭМ, фото- и электролюминесценции. Было установлено, что формирования сверхрешеток при использованных условиях роста не происходило, а слои образовывали два твердых раствора. Полученная система характеризовалась излучением на длине волны 4.96 μm с полушириной спектральной линии 16 meV при температуре 77 K. Результаты работы актуальны для развития метода МОСГФЭ для инженерии запрещенной зоны полупроводниковых структур InAs/GaSb, предназначенных для приборов ИК-диапазона длин волн.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Яговкиной М.А. за помощь в измерении образцов методом рентгеновской дифрактометрии. Исследования ПЭМ выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“, поддержанного Минобрнауки России (идентификатор проекта RFMEFI62117X0018).

Финансирование работы

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-08-01130-а. Исследования ПЭМ выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“, поддержанного Минобрнауки России (идентификатор проекта RFMEFI62117X0018).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Smith D.L., Mailhiot C.* // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62. P. 2545–2548.
- [2] *Youngdale E.R., Meyer J.R., Hoffman C.A., Bartoli F.J., Grein C.H., Young P.M., Ehrenreich H., Miles R.H., Chow D.H.* // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 64. P. 3160–3162.
- [3] *Zegrya G.G., Andreev A.D.* // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67. P. 2681–2683.
- [4] *Ning Z.-D., Liu S.-M., Luo S., Ren F., Wang F., Yang T., Liu F.-Q., Wang Z.-G., Zhao L.-C.* // Mater. Lett. 2016. Vol. 164. P. 213–216. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.10.140
- [5] *Keen J.A., Repiso E., Lu Q., Kesaria M., Marshall A.R.J., Krier A.* // Infr. Phys. Technol. 2018. Vol. 93. P. 375–380. DOI: 10.1016/j.infrared.2018.08.001
- [6] *Mynbaev K.D., Shilyaev A.V., Semakova A.A., Bykhanova E.V., Bazhenov N.L.* // Opto-Electron. Rev. 2017. Vol. 25. N 3. P. 209–214. DOI: 10.1016/j.opelre.2017.06.005
- [7] *Wu J., Xu Z., Chen J., He L.* // Infr. Phys. Technol. 2018. Vol. 92. P. 18–23. DOI: 10.1016/j.infrared.2018.05.004
- [8] *Cervera C., Ribet-Mohamed I., Taalat R., Perez J.P., Christol P., Rodriguez J.B.* // J. Electron. Mater. 2012. Vol. 41. P. 2714–2718. DOI: 10.1007/s11664-012-2035-4
- [9] *Gautam N., Kim H.S., Kuty M.N., Plis E., Dawson L.R., Krishna S.* // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 96. P. 231107. DOI: 10.1063/1.3446967
- [10] *Wei Y., Gin A., Razeghi M., Brown G.J.* // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 80. P. 3262–3264.
- [11] *Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M.* // Appl. Phys. Rev. 2017. Vol. 2. P. 031304. DOI: 10.1063/1.4999077
- [12] *Jung D., Bank S., Lee M.L., Wasserman D.* // J. Optics. 2017. Vol. 19. P. 123001. DOI: 10.1088/2040-8986/aa939b
- [13] *Li X., Zhao Y., Wu Q., Teng Y., Hao X., Huang Y.* // J. Cryst. Growth. 2018. Vol. 502. P. 71–75. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2018.09.003
- [14] *Huang Y., Ryou J.-H., Dupuis R.D., D'Costa V.R., Steenbergen E.H., Fan J., Zhang Y.-H., Petschke A., Mandl M., Chuang S.-L.* // J. Cryst. Growth. 2011. Vol. 314. P. 92–96. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2010.11.003
- [15] *Huang Y., Ryou J.-H., Dupuis R.D., Petschke A., Mandl M., Chuang S.-L.* // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 96. P. 251107. DOI: 10.1063/1.3456386
- [16] *Huang Y., Ryou J.-H., Dupuis R.D., Zuo D., Kesler B., Chuang S.-L., Hu H., Kim K.-H., Lu Y.T., Hsieh K.C., Zuo J.-M.* // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 99. P. 011109. DOI: 10.1063/1.3609240
- [17] *Chang Y., Wang T., Yin F., Wang J., Song Z., Wang Y., Yin J.* // Infr. Phys. Technol. 2011. Vol. 54. P. 478–481. DOI: 10.1016/j.infrared.2011.07.009
- [18] *Barletta P., Bulman G., Dezzi G., Venkatasubramanian R.* // Thin Sol. Films. 2012. Vol. 520. P. 2170–2172. DOI: 10.1016/j.tsf.2011.10.007
- [19] *Li L.-G., Liu S.-M., Luo S., Yang T., Wang L.-J., Liu F.-Q., Ye X.-L., Xu B., Wang Z.-G.* // Nanosc. Res. Lett. 2012. Vol. 7. P. 160–166. DOI: 10.1186/1556-276X-7-160
- [20] *Li L.-G., Liu S.-M., Luo S., Yang T., Wang L.-J., Liu J.-Q., Liu F.-Q., Ye X.-L., Xu B.* // J. Cryst. Growth. 2012. Vol. 359. P. 55–59. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2012.08.009
- [21] *Левин П.В., Усикова А.А., Неведомский В.Н., Баженов Н.Л., Мынбаев К.Д., Пушный Б.В., Зегря Г.Г.* // Тез. докл. XXV Междунар. научно-технической конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения (М., Россия, 2018.) Т. 1. С. 247.
- [22] Патент РФ № 2611692. Способ изготовления наногетероструктуры со сверхрешеткой / В.М. Андреев, П.В. Левин, Б.В. Пушный. 28.02.2017.
- [23] *Taalat R., Rodriguez J.-B., Delmas M., Christol Ph.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. P. 015101. DOI: 10.1088/0022-3727/47/1/015101
- [24] *Christol P., Delmas M., Rossignol R., Rodriguez J.B.* // Phys. Chem. Biophys. 2015. Vol. 5. P. 1000197. DOI: 10.4172/2161-0398.1000197
- [25] *Bevan M.J., Woodhouse K.T.* // J. Cryst. Growth. 1984. Vol. 68. N 1. P. 254–261.
- [26] *Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R.* // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89. P. 5815–5875.
- [27] *Mynbaev K.D., Bazhenov N.L., Semakova A.A., Chernyaev A.V., Kizhaev S.S., Stoyanov N.D., Bougrov V.E., Lipsanen H., Salikhov Kh.M.* // Infr. Phys. Technol. 2017. Vol. 85. P. 246–250. DOI: 10.1016/j.infrared.2017.07.003