

06

Твердые растворы AlInAsSb и AlGaInAsSb для барьерных слоев источников излучения спектрального диапазона $3\text{--}5\ \mu\text{m}$, полученные методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений

© В.И. Васильев, Г.С. Гагис, Р.В. Лёвин, Б.В. Пушный,
А.Г. Дерягин, В.И. Кучинский, М.Н. Мизеров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: galina.gagis@gmail.com

Поступило в Редакцию 27 мая 2012 г.

Исследованы процессы эпитаксиального роста твердых растворов $\text{Al}_u\text{Ga}_{1-u-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ и $\text{Al}_u\text{Ca}_{1-u}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$. Получены эпитаксиальные слои с составами $0.02 < u < 0.11$, $0.88 < x < 0.93$, $0.88 < y < 0.98$ на подложках InAs методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений при пониженном давлении (76 Torr) и отношении суммы парциальных давлений соединений с элементами пятой группы к таковой для соединений с элементами третьей группы $V/III = 3.6\text{--}6$. При несоответствии параметра решетки $1 \cdot 10^{-3}$ величины полуширин кривых рентгеновского дифракционного отражения для лучших образцов составляли: для подложек 15 arcsec, для слоев — 66 arcsec.

При создании источников излучения спектрального диапазона $3\text{--}5\ \mu\text{m}$ на основе полупроводниковых твердых растворов A^3B , наравне с квантово-каскадными лазерами и лазерами на основе сверхрешеток с w -образным профилем, все больший интерес вызывают приборные структуры с гетеропереходами первого типа. Такие структуры позволяют достичь высокой мощности (до 300 mW в непрерывном режиме) и низких пороговых токов (около $200\ \text{A}/\text{cm}^2$) при комнатной температуре [1].

При проектировании таких структур необходимо решать две проблемы: подбор материала активной области с высоким квантовым выходом люминесценции и создание эффективного ограничения световой волны и ограничения носителей заряда в активной области. Квантовый выход люминесценции зависит как от кристаллического совершенства, так и от зонной структуры полупроводников. Согласно мировой практике, наиболее подходящими материалами для излучающих слоев гетероструктур являются твердые растворы GaInAsSb [1], InAsSbP [2] и GaInAsPSb [3,4].

Гетероструктуры спектрального диапазона $2\text{--}3.4\ \mu\text{m}$ изготавливают на подложках GaSb , в качестве внешних ограничивающих слоев составного волновода используются $\text{Al}_u\text{Ga}_{1-u}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ($u \sim 0.9$, $y < 0.1$) [1,5,6].

В качестве внутренних ограничивающих слоев в волноводной области, обеспечивающих барьеры для электронов и дырок, при изготовлении лазеров спектрального диапазона $2\text{--}3\ \mu\text{m}$ используются твердые растворы $\text{Al}_u\text{Ga}_{1-u}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ($u = 0.2\text{--}0.3$, $y = 0.02\text{--}0.03$) [5].

Для лазеров спектрального диапазона $3\text{--}3.4\ \mu\text{m}$ квантовые ямы с гетеропереходом первого типа могут быть реализованы за счет внутренних ограничивающих слоев в волноводной области на основе пяттерных твердых растворов AlGaInAsSb [6].

Для спектрального диапазона $3.4\text{--}5\ \mu\text{m}$ лазерные структуры с гетеропереходами первого типа традиционно выращиваются на подложках InAs и представляют собой двойные гетероструктуры, волноводная область которых является сверхрешеткой либо объемным материалом InAsSb ; в качестве барьеров для носителей заряда используются твердые растворы InAsPSb , они же обеспечивают ограничение световой волны в активной области. Данные структуры демонстрируют высокие мощности при низких температурах, например в [7] при $80\ \text{K}$ для длины волны $3.2\ \mu\text{m}$ достигнута мощность $450\ \text{mW}$, а на длине волны $3.8\ \mu\text{m}$ — $94\ \text{mW}$ в непрерывном режиме. Однако у таких гетероструктур величины барьеров для электронов недостаточны для работы лазера при комнатной температуре.

Согласно нашим расчетам, проведенным на основе модели, описанной в [8], для источников излучения спектрального диапазона $3.4\text{--}5\ \mu\text{m}$, изготавливаемых на подложках InAs , оптимальные величины барьеров для носителей заряда в волноводной области могут быть получены с использованием твердых растворов $\text{Al}_{0.2}\text{In}_{0.8}\text{As}_{0.82}\text{Sb}_{0.18}$ в

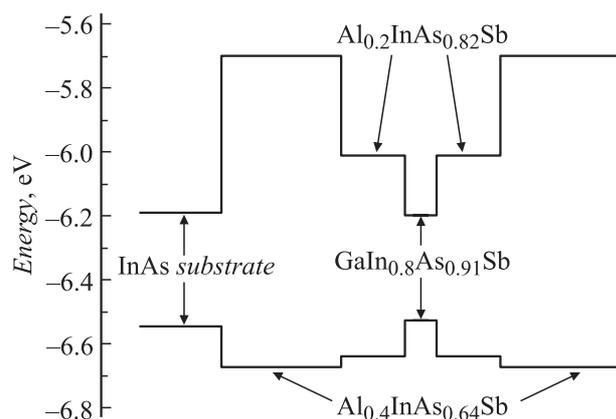


Рис. 1. Расчет зонной диаграммы лазерной гетероструктуры на длину волны $\lambda = 3.81 \mu\text{m}$.

качестве внутренних ограничивающих слоев в волноводной области. В качестве внешних ограничивающих слоев составного волновода при этом могут быть использованы как традиционные $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.16}\text{Sb}_{0.84}$, так и менее широкозонные $\text{Al}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{As}_{0.64}\text{Sb}_{0.36}$ (рис. 1), абсолютный скачок показателя преломления, рассчитанный по методике [9], при этом составит 0.03 и 0.02 соответственно.

Таким образом, согласно литературным и нашим расчетным данным, твердые растворы AlGaInAsSb и AlInAsSb , изопериодичные с InAs и GaAs , являются перспективными для изготовления гетероструктур спектрального диапазона $3.4\text{--}5 \mu\text{m}$. Данные твердые растворы обычно получают методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [1,6], работы по получению материалов AlGaInAsSb методом газовой эпитаксии из металлорганических соединений (ГФЭМОС) в основном связаны с использованием подложек InP [10].

В данной работе нами были получены твердые растворы AlInAsSb и AlGaInAsSb методом ГФЭМОС в атмосфере водорода на установке АИХ200 с горизонтальным реактором при температуре 600°C и пониженном давлении (76 Torr). В качестве соединений, поставляющих элементы третьей группы, использовались: триметилалюминий (ТМА1), триметилгаллий (ТГГа) и триметилиндий (ТМИн); пятой — триме-

Таблица 1. Основные свойства и режимы получения образцов AlGaInAsSb/InAs(100)

Номер образца	Состав эпитаксиального слоя	Парциальные давления веществ, Torr				НПР
		TMAI	TEGa	TMIIn	AsH ₃	
1	Al _{0.02} Ga _{0.05} InAsSb _{0.11}	$6.69 \cdot 10^{-4}$	$9.31 \cdot 10^{-4}$	$2.53 \cdot 10^{-2}$	$4.33 \cdot 10^{-2}$	$4.37 \cdot 10^{-3}$ $2.1 \cdot 10^{-3}$
2	Al _{0.02} Ga _{0.08} InAsSb _{0.09}	$2.68 \cdot 10^{-4}$	$1.55 \cdot 10^{-3}$	$2.53 \cdot 10^{-2}$	$4.52 \cdot 10^{-2}$	и $2.71 \cdot 10^{-3}$
3	Al _{0.05} Ga _{0.04} InAsSb _{0.10}	$1.34 \cdot 10^{-3}$	$9.31 \cdot 10^{-4}$	$2.47 \cdot 10^{-2}$	$4.33 \cdot 10^{-2}$	–
4	Al _{0.08} Ga _{0.04} InAsSb _{0.09}	$2.01 \cdot 10^{-3}$	$9.31 \cdot 10^{-4}$	$2.40 \cdot 10^{-2}$	$4.33 \cdot 10^{-2}$	$-5.97 \cdot 10^{-3}$ $2.0 \cdot 10^{-3}$
5	Al _{0.09} Ga _{0.03} InAsSb _{0.08}	$2.01 \cdot 10^{-3}$	$6.21 \cdot 10^{-4}$	$2.45 \cdot 10^{-2}$	$4.33 \cdot 10^{-2}$	и $2.54 \cdot 10^{-3}$

тилсурьма (TMSb) и разбавленный водородом до 10% арсин (AsH_3). Общий поток газовой смеси (водород + компоненты) через реактор во время эпитаксиального роста составлял 5.5 l/min. Эпитаксиальное осаждение осуществлялось 30 min, толщины полученных слоев составляли 1.8–2 μm . Условия, обеспечивающие предохранение подложки и полученных эпитаксиальных слоев от разрушения в результате испарения компонентов пятой группы при высоких температурах, а также методы диагностики полученных образцов описаны в нашей предыдущей работе [2].

Твердые растворы AlGaInAsSb были получены на подложках InAs(100), величины парциальных давлений компонентов TEGa, TMin, AsH_3 и TMSb выбирались на основе значений парциальных давлений, использованных нами ранее при получении GaInAsSb [2]. Величина V/III для всех образцов AlGaInAsSb составляла 3.6, парциальное давление TMSb — $5.28 \cdot 10^{-2}$ Torr. Основные свойства и режимы получения эпитаксиальных образцов AlGaInAsSb/InAs приведены в табл. 1.

У образцов с величинами несоответствия параметров решеток (НПР) $|f_{\perp}|$ более $4 \cdot 10^{-3}$ рентгеновские кривые дифракционного отражения (КДО) имели значения полуширины (full width at half maximum — FWHM): около 150 arcsec для эпитаксиальных слоев и около 50 arcsec для подложек. Фотолюминесценция (ФЛ) таких образцов имела интенсивность, недостаточную для регистрации даже при 4 К (образцы 1 и 4 в табл. 1).

У образцов 2 и 5 из табл. 1, имеющих FWHM КДО от подложек в пределах 20–22 arcsec, наблюдалось два интенсивных четко различающихся пика на КДО от слоя, что может свидетельствовать о наличии внутри эпитаксиального слоя отделенных резкими границами областей твердых растворов с разным химическим составом и разным параметром решетки.

При 4 К у образцов 2 и 5 из табл. 1 наблюдалась ФЛ с достаточной для регистрации интенсивностью, которая у содержащего меньшее количество алюминия образца 2 была в 2.5 раза выше, чем у образца 5. Полуширины пиков ФЛ составляли около 0.1 eV, максимумы интенсивности приходились на длины волн 2.6–2.8 μm .

КДО образца 3 из табл. 1 AlGaInAsSb/InAs указывает на наличие гетерограницы внутри эпитаксиального слоя, о резкости которой свидетельствуют толщинные осцилляции (рис. 2). Образование неоднородно-

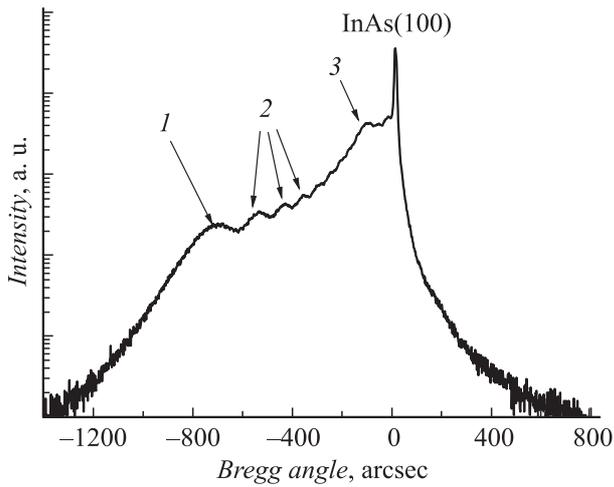


Рис. 2. КДО образца 3 из табл. 1: 1 — пик слоя с большим НПР, 2 — толщинные осцилляции, 3 — пик слоя с малым НПР.

стей в твердых растворах, содержащих алюминий, наблюдалось ранее в [10] при получении AlGaInAsSb на подложках InP .

При выращивании AlInAsSb на $\text{InAs}(100)$ нами были использованы два подхода при выборе параметров эпитаксиального роста. В первом случае за основу были взяты условия, при которых ранее нами были получены качественные слои InAsSb , демонстрировавшие ФЛ при комнатной температуре ($V/III = 22$, парциальное давление AsH_3 в 35 раз больше парциального давления TMSb). При этом наблюдалось эффективное встраивание Al в твердую фазу (образец 1 в табл. 2). Однако в выбранных условиях оказалось затруднительно управлять соотношением компонентов пятой группы в твердой фазе, поэтому для получения следующей серии образцов за основу были взяты условия роста, подобранные нами при получении эпитаксиальных слоев AlGaInAsSb . Управление составом растущих слоев и параметром их решетки осуществлялось за счет варьирования парциальных давлений TMin и AsH_3 . При малых величинах НПР $\|f_{\perp} < 1 \cdot 10^{-3}$ FWHM КДО для подложки составляло 15 arcsec, для слоя — 66 arcsec (рис. 3). Основные параметры полученных образцов AlInAsSb приведены в

Таблица 2. Основные свойства и режимы получения образцов AlInAsSb/InAs(100)

Номер образца	Состав эпитаксиального слоя	Парциальные давления веществ, Torr				V/III	НПР
		TMAI	TMIIn	AsH ₃	TMSb		
1	Al _{0.11} InAsSb _{0.02}	$6.69 \cdot 10^{-4}$	$1.18 \cdot 10^{-2}$	0.214	$6.16 \cdot 10^{-2}$	22.2	$-8.29 \cdot 10^{-3}$
2	Al _{0.06} InAsSb _{0.12}	$2.68 \cdot 10^{-3}$	$2.07 \cdot 10^{-2}$	$2.76 \cdot 10^{-2}$	$7.92 \cdot 10^{-2}$	4.6	$6.08 \cdot 10^{-3}$
3	Al _{0.07} InAsSb _{0.1}	$2.68 \cdot 10^{-3}$	$2.07 \cdot 10^{-2}$	$3.59 \cdot 10^{-2}$	$7.92 \cdot 10^{-2}$	4.9	$3.38 \cdot 10^{-3}$
4	Al _{0.1} InAsSb _{0.08}	$2.68 \cdot 10^{-3}$	$2.07 \cdot 10^{-2}$	$5.53 \cdot 10^{-2}$	$7.92 \cdot 10^{-2}$	5.8	$-3.45 \cdot 10^{-3}$
5	Al _{0.08} InAsSb _{0.09}	$2.68 \cdot 10^{-3}$	$1.65 \cdot 10^{-2}$	$3.59 \cdot 10^{-2}$	$7.92 \cdot 10^{-2}$	6	$9.52 \cdot 10^{-4}$

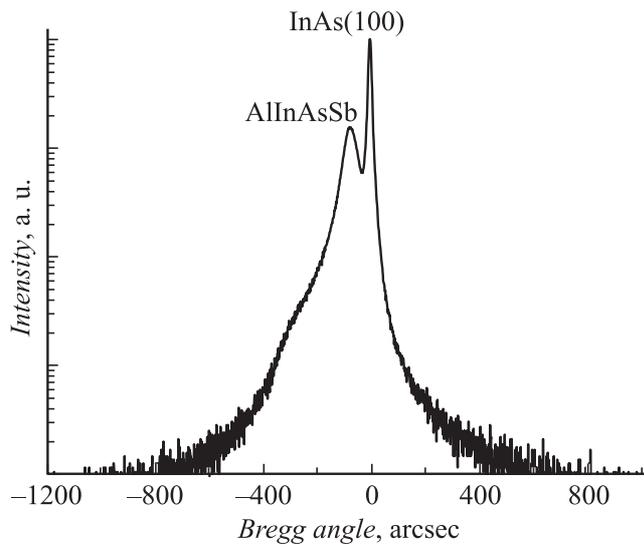


Рис. 3. КДО образца $\text{Al}_{0.08}\text{In}_{0.92}\text{As}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}/\text{InAs}$.

табл. 2. Ширина запрещенной зоны полученных образцов была оценена по положению максимума интенсивности в спектре ФЛ и при 77 К составляла 0.5–0.55 eV, полуширины пиков ФЛ при этом составляли около 0.1 eV.

Анализ полученных результатов показал, что обеспечить оптимальные условия для получения качественных эпитаксиальных слоев AlInAsSb и AlGaInAsSb значительно сложнее, чем для получения слоев, не содержащих алюминия. Величина парциального давления арсина существенно влияет на встраивание в твердую фазу алюминия, поэтому подбор режимов для получения однородных по толщине слоев требуемого состава вызывает определенные трудности. На данном этапе работы продемонстрирована возможность получения эпитаксиальных слоев AlGaInAsSb и AlInAsSb удовлетворительного кристаллического качества. Неоднородность внутри полученных слоев может быть связана с большим значением энтальпии образования AlAs по сравнению с таковым у других бинарных компонентов, образующих твердый раствор.

Авторы работы выражают свою глубокую благодарность коллегам из ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН: сотрудникам лаб. диагностики материалов и структур твердотельной электроники М.В. Байдаковой и М.А. Яговкиной за регистрацию КДО и Т.Б. Поповой и Я.В. Кузнецовой за измерение состава полученных образцов.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 09-08-00574-а.

Список литературы

- [1] *Shterengas L., Kipshidze G., Hosoda T.* et al. // *Electron. Lett.* 2009. V. 45. N 18. P. 942–943.
- [2] *Васильев В.И., Гагис Г.С., Левин Р.В.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 2012. Т. 38. В. 9. С. 23–30.
- [3] *Smirnov V.M., Betty P.J., Jones R.* et al. // *Stat. Sol. (a).* 2007. V. 204. N 4. P. 1047–1050.
- [4] *Gagis G.S., Vasil'ev V.I., Deryagin A.G.* et al. // *Semicond. Sci. Technol.* 2008. V. 23. P. 125 026 (6p.).
- [5] *Shterengas L., Belenky G., Kisin M.V., Donetsky D.* // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90. P. 011 119.
- [6] *Grau M., Lin C., Dier O.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. P. 241 104 (3p.).
- [7] *Lane B., Razeghi M.* // *J. Cryst. Growth,* 2000. V. 221. P. 679–682.
- [8] *Krijn M.P.C.M.* // *Semicond. Sci. Technol.* 1991. V. 6. P. 27–31.
- [9] *Adachi S.* // *J. Appl. Phys.* 1989. V. 66. N 12. P. 6030–6040.
- [10] *Jaw D.H., Chang J.R., Su Y.K.* // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. N 22. P. 3883–3885.