

06:07

Суперлюминесценция в двойной гетероструктуре AlGaAsSb/InGaAsSb/AlGaAsSb

© К.Д. Моисеев, М.П. Михайлова, О.В. Андрейчук,
Б.Е. Саморуков, Ю.П. Яковлев

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

Поступило в Редакцию 5 февраля 1997 г.

Впервые наблюдалась интенсивная электролюминесценция в двойной гетероструктуре AlGaAsSb/In_{0.9}Ga_{0.1}As_{0.89}Sb_{0.21}/AlGaAsSb в спектральном диапазоне длин волн 3–4 мкм при $T = 77$ К. Исследуемая структура была выращена на подложке GaSb методом жидкофазовой эпитаксии. Энергия фотона в максимуме узкой полосы излучения с полушириной 9–10 мэВ составляла $h\nu = 387$ мэВ и на 60 мэВ превышала ширину запрещенной зоны узкозонного твердого раствора InGaAsSb ($E_g = 326$ мэВ), что связывается с особенностями инверсной заселенности активной области гетероструктуры при приложении внешнего смещения.

В последние годы возрос интерес к созданию лазеров среднего инфракрасного диапазона (3–4 мкм) на основе соединений A^3B^5 [1–4]. Это связано с широкими возможностями использования таких приборов для задач диодной лазерной спектроскопии и экологического мониторинга [5]. Для этих целей необходимы лазеры, работающие при комнатной температуре. До настоящего времени предельная рабочая температура ИК-лазеров, созданных на базе твердых растворов InAs различными методами (жидкофазная и молекулярно-пучковая эпитаксии или выращивание из металлоорганических соединений) и излучающих в диапазоне длин волн 3–4 мкм, не превышает 180–200 К в импульсном и 110 К в непрерывном режимах накачки [1,2,4]. Основными факторами, ограничивающими работу длинноволновых лазеров при комнатной температуре, являются безызлучательная Оже-рекомбинация и утечки носителей через гетерограницу вследствие слабого электронного и дырочного ограничений. С этой целью, например, были предприняты усилия по увеличению высоты барьера в зоне проводимости на гетерогранице с активной областью, используя в качестве ограничительных

слоев твердые растворы AlAsSb с большой шириной запрещенной зоны, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии [6].

В настоящей работе мы впервые сообщаем о наблюдении электролюминесценции в спектральном диапазоне длин волн 3–4 мкм в двойной гетероструктуре AlGaAsSb/InGa_{0.1}AsSb_{0.21}/AlGaAsSb, выращенной методом жидкофазной эпитаксии.

Двойная гетероструктура была выращена на подложке *p*-GaSb (100). В качестве активного слоя был выбран узкозонный твердый раствор с большим содержанием арсенида индия In_{0.9}Ga_{0.1}As_{0.89}Sb_{0.21}, а в качестве накрывающих слоев — твердый раствор Al_{0.34}Ga_{0.66}As_{0.03}Sb_{0.97}, который обеспечивает хорошее электронное ограничение для носителей заряда за счет большого разрыва в зоне проводимости с узкозонным слоем InGaAsSb в активной области ($\Delta E_c \sim 1.0$ эВ). Следует отметить, что такая гетероструктура была выращена методом жидко-фазной эпитаксии впервые. До настоящего времени выращивание узкозонных твердых растворов на широкозонных слоях с большим содержанием Al и Ga методом жидко-фазной эпитаксии представляло определенные трудности из-за сложности согласования между собой обоих материалов. Эпитаксиальные слои, составляющие двойную гетероструктуру на основе твердых растворов с составами, изопериодными подложке GaSb и обогащенными InAs и AlSb, резко отличаются друг от друга по физическим постоянным. Прежде всего это относится к коэффициентам теплового расширения. По нашим оценкам, коэффициент теплового расширения для твердых растворов, обогащенных GaSb, почти в 2 раза больше, чем для твердых растворов, обогащенных InAs. Во-вторых, неограниченная растворимость GaSb в расплавах, обогащенных индием, делает невозможным отработку и уточнение диаграмм фазового равновесия методом насыщения из источника для разреза твердых растворов In(Ga)AsSb с большим содержанием InAs, изопериодных GaSb.

Выбор узкозонного четверного твердого раствора In_{0.9}Ga_{0.1}As_{0.89}Sb_{0.21} был обусловлен тем, что его наращивание на подложку GaSb проще, чем твердых растворов, не содержащих галлий (например, InAs_{0.9}Sb_{0.1}). Используя метод расчета фазовых диаграмм, предложенный в [7], нам удалось преодолеть указанные выше трудности и получить слои твердого раствора In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y с рассогласованием по параметру постоянной решетки не хуже $2.5 \cdot 10^{-3}$ при $T = 300$ К в диапазоне составов

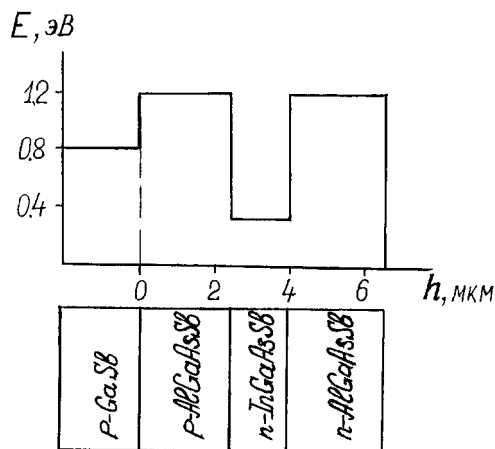


Рис. 1. Послойное изображение двойной гетероструктуры $p\text{-AlGaAsSb}/n\text{-InGaAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$, изопериодной подложке GaSb.

($0.01 < x < 0.1$, $y = x + 0.12$). Рассогласование для постоянных решеток ограничительных слоев $\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ и подложки GaSb составляло около $\Delta a/a \sim 4\text{--}8 \cdot 10^{-4}$ ($T = 300\text{ K}$). Толщины эпитаксиальных слоев составляли $0.8\text{--}1.2\ \mu\text{m}$ для твердого раствора $\text{In}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.89}\text{Sb}_{0.21}$ и $2.5\ \mu\text{m}$ для твердых растворов $\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$. Концентрации носителей заряда в ограничительных слоях были порядка $n, p \sim 5 \cdot 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$, а в нелегированном слое $n\text{-In}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.89}\text{Sb}_{0.21}$ концентрация электронов достигала $1 \cdot 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ при $T = 77\text{ K}$. Исследуемая структура схематически представлена на рис. 1. Ширина запрещенной зоны узкозонного твердого раствора по данным фотолюминесценции составляла $E_g = 326\ \text{мэВ}$ ($T = 77\text{ K}$).

Методом стандартной фотолитографии были изготовлены полосковые лазерные структуры с шириной полоска $60\text{--}90\ \mu\text{m}$ и длиной резонатора $L = 300\text{--}500\ \mu\text{m}$. Омические контакты к p и n слоям были получены напылением из сплавов Au/Zn и Au/Te соответственно, с последующим вжиганием их в атмосфере водорода. Исследования электролюминесценции проводились при температуре $T = 77\text{ K}$ с помощью решеточного монохроматора МДР-4 с решеткой $300\ \text{штр/мм}$

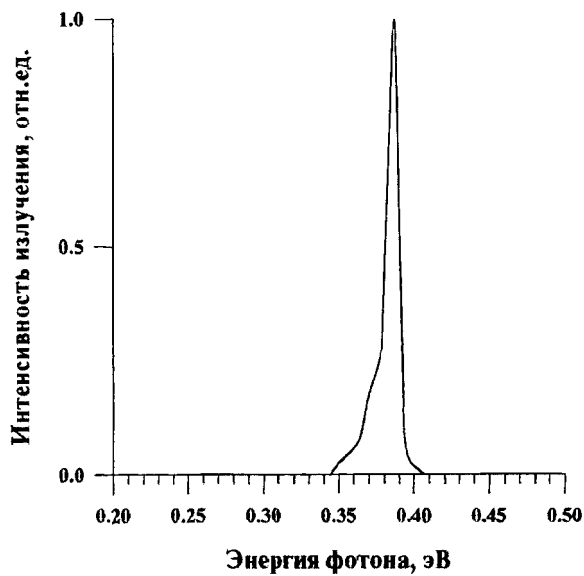


Рис. 2. Спектр электролюминесценции двойной гетероструктуры $p\text{-AlGaAsSb}/n\text{-InGaAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ при прямом смещении при $T = 77$ К.

методом синхронного детектирования. Сигнал регистрировался приемником на основе фотосопротивления InSb, охлаждаемого жидким азотом. Измерения проводились в импульсном режиме с длительностью импульса $\tau = 2.5$ мкс и частотой повторения $f = 10^5$ Гц.

Интенсивная электролюминесценция в исследуемых структурах $p\text{-AlGaAsSb}/n\text{-InGaAsSb}/n\text{-AlGaAsSb}$ наблюдалась в спектральном диапазоне длин волн 3–4 мкм (рис. 2). При этом спектры электролюминесценции состояли из одной узкой полосы с энергией фотона в максимуме излучения $h\nu = 387$ мэВ. Полуширина пика излучения составляла $\Delta h\nu = 9\text{--}10$ мэВ. Профиль наблюдаемой полосы излучения был асимметричен и имел резкий край со стороны больших энергий фотона. Интенсивность электролюминесценции в исследуемых двойных гетероструктурах была сравнима с интенсивностью на пороге генерации обычного диодного лазера на узкозонных твердых растворах арсенида индия, излучающего в этом же спектральном диапазоне длин волн.

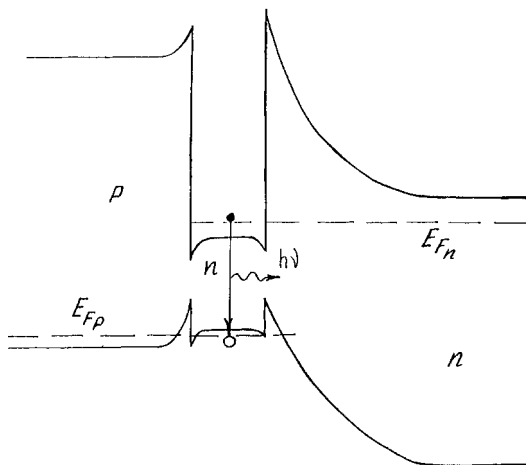


Рис. 3. Схематическое изображение зонной энергетической диаграммы двойной гетероструктуры $p\text{-AlGaAsSb}/n\text{-InGaAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ при прямом смещении при $T = 77\text{ K}$.

Отметим некоторые особенности наблюдаемого в эксперименте излучения. Излучение возникало пороговым образом при подаче прямого смещения на образец начиная с напряжения $U > 0.8\text{ В}$. Максимум полосы излучения превышал по энергии на 60 мэВ ширину запрещенной зоны узкозонного твердого раствора $\text{In}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.79}\text{Sb}_{0.2}$ ($E_g = 326\text{ мэВ}$ при $T = 77\text{ K}$), но был много меньше ширины запрещенной зоны широкозонных ограничительных слоев $\text{Al}_{0.34}\text{GaAs}_{0.03}\text{Sb}$ ($E_g = 1.214\text{ эВ}$ при $T = 77\text{ K}$). Следует особо подчеркнуть, что электролюминесценция в исследуемых образцах наблюдалась только при больших длительностях импульсов токов накачки ($\tau = 2.5\text{ мс}$) и отсутствовала при меньших длительностях.

Для объяснения полученных экспериментальных результатов обратимся к зонной энергетической диаграмме исследуемой двойной гетероструктуры при приложении прямого смещения схематически представленной на рис. 3. Как видно из рисунка, на гетерогранице между n -активным и p -накрывающим слоем существует потенциальный барьер для электронов. Между активным слоем и накрывающим слоем n -типа существует также большой потенциальный барьер для электронов бла-

годаря большому разрыву в зоне проводимости для твердых растворов $\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ и $\text{In}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.89}\text{Sb}_{0.21}$, который увеличивает напряжение включения и последовательное сопротивление всей структуры за счет образования n - n -гетерограницы. При этом на стороне широкозонного полупроводника образуется обедненная область объемного заряда, а со стороны узкозонного материала — обогащенный n^+ -слой. С другой стороны, большой встроенный потенциал на n - n -гетерогранице ограничивает дырки в активном слое двойной гетероструктуры.

При увеличении напряжения смещения за счет инжекции носителей заряда из p и n эмиттерных областей двойной гетероструктуры p - $\text{AlGaAsSb}/n$ - $\text{InGaAsSb}/n$ - AlGaAsSb в активной области создается эффективная инверсная заселенность. При этом квазиуровни Ферми для электронов и дырок располагаются в зоне проводимости и валентной зоне узкозонного слоя. Такая зонная энергетическая диаграмма объясняет тот факт, что наблюдаемое значение энергии фотона в максимуме полосы излучения больше, чем ширина запрещенной зоны твердого раствора InGaAsSb .

Увеличение плотности токов накачки через образец в нашем случае не привело к дальнейшему сужению полосы излучения и выходу в когерентный режим. По нашему мнению, это связано с недостаточным оптическим ограничением в исследуемой структуре. Использование дополнительных широкозонных ограничительных слоев, например GaSb или GaInAsSb , позволит создать лучшее удержание волны и получить когерентное длинноволновое излучение в такой структуре.

Таким образом, получены первые результаты по созданию методом жидко-фазной эпитаксии изопериодной двойной гетероструктуры p - $\text{AlGaAsSb}/n$ - $\text{InGaAsSb}/n$ - AlGaAsSb на подложке GaSb с большим электронным ограничением. Была достигнута суперлюминесценция в такой гетероструктуре и исследованы ее электролюминесцентные свойства, а также показана ее перспективность для создания лазеров для спектрального диапазона 3–4 мкм.

Авторы благодарят А.М. Монахова за полезные обсуждения.

Работа частично поддержана в рамках программы Миннауки России "Физика твердотельных наноструктур", проект N.1-077/4, а также Европейским отделением аэрокосмических исследований и разработок США (EOARD), контракт N. F61708-96-W0078.

Список литературы

- [1] *Choi H.K., Eglash S.J., Turner G.W.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 812–814.
- [2] *Данилова Т.Н., Ершов О.Г., Именков А.Н., Степанов М.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 1995. Т. 30. С. 1265–1271.
- [3] *Hasenberg T.C., Cost A., Miles R.* et al. // Electr. Lett. 1995. V. 31. P. 275–276.
- [4] *Yakovlev Yu.P., Moiseev K.D., Mikhailova M.P., Ershov O.G., Zegrya G.G.* Technical Digest CLEO-96, Anaheim, USA, June 2–7, 1996. P. 170–171.
- [5] *Nadezhdinski A., Prokhorov A.M.* // Proc. SPIE. 1992. V. 1724. P. 2–64.
- [6] *Choi H.K., Turner G.W., Liao Z.L.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 2251–2253.
- [7] *Баранов А.Н., Литвак А.М., Моисеев К.Д., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П.* // ЖПХ. 1994. Т. 67. С. 1956–1964.