

06;07

Электролюминесценция квантово-размерных структур на основе гетеропереходов II типа InAs/GaSb

© К.Д. Моисеев, Б.Я. Мельцер, В.А. Соловьев, С.В. Иванов,
М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев, П.С. Копьев

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

Поступило в Редакцию 10 февраля 1998 г.

Исследованы электролюминесцентные свойства квантово-размерных диодных структур на основе разьединенных гетеропереходов II типа в системе InAs/GaSb, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках InAs. Электролюминесценция наблюдалась в спектральном диапазоне 3–4 μm при $T = 77$ К. Обнаружено существование полос излучения, обусловленных рекомбинационными переходами с участием электронов с уровней размерного квантования как из самосогласованных квантовых ям на гетерогранице II типа InAs/GaSb, так и из прямоугольных квантовых ям в короткопериодных сверхрешетках.

В последние годы в ряде научных центров проводятся исследования полупроводниковых лазерных диодов для среднего ИК-диапазона (3–5 μm) на основе узкозонных соединений A^3B^5 [1–4]. Важными областями применения таких лазеров являются экологический мониторинг и лазерная спектроскопия высокого разрешения. Для создания длинноволновых лазеров, работающих вблизи комнатной температуры, большое внимание уделяется поиску как новых физических подходов к конструированию таких лазеров, так и новых перспективных материалов. Одними из наиболее перспективных для этих целей являются ”разьединенные” гетеропереходы II типа и квантово-размерные структуры на основе системы GaSb/InAs, полученные как методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [5], так и методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [6]. О первых результатах по исследованию фото-электролюминесценции в одиночных квантовых ямах, выращенных методом МПЭ, сообщалось в [7].

Данная работа посвящена исследованию электролюминесцентных свойств структур с квантовыми ямами (КЯ) и короткопериодными сверхрешетками (КПСР) на основе разьединенных гетеропереходов II типа InAs/GaSb.

Исследуемые структуры были выращены методом МПЭ на подложках p -InAs (100) при температуре 500°C. Скорость роста для GaSb составляла 100 Å/min, а для InAs — 20 Å/min. Известно, что в структурах с КЯ в системе (Al, Ga)Sb/InAs тип химической связи на гетерогранице оказывает значительное влияние на электрические и оптические характеристики КЯ [8], причем наилучшие характеристики имеют структуры с InSb-подобным интерфейсом, т.е. когда InAs слой заканчивается атомами индия, в то время как Al(Ga)Sb слой начинается с атомов сурьмы. Ранее нами на основе термодинамического анализа МПЭ роста напряженных структур Al(Ga)Sb/InAs как с InSb-, так и с Al(Ga)As-подобными интерфейсами были установлены оптимальные условия формирования гетерограниц, полностью свободных от связей типа Al-As или Ga-As [9]. В данной работе InSb-подобная гетерограница формировалась на всех интерфейсах путем выращивания одного монослоя InSb при десятикратном превышении потока атомов Sb над потоком атомов In на поверхности роста.

Были исследованы электролюминесцентные свойства двух типов структур, условно именуемых в дальнейшем структурами типа СД1 и типа СД2 (рис. 1). Активная область светодиодов типа СД1 представляла собой трехпериодную 500 Å-InAs/100 Å-GaSb гетероструктуру, помещенную между двумя контактными сильнолегированными p - и n -слоями арсенида индия (n , $p \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ при $T = 300 \text{ K}$) (рис. 1, *a*). Для активной области использовались преднамеренно нелегированные слои GaSb ($p \sim 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 300 K) и слаболегированные Ve слои InAs ($p \sim 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 300 K). Светодиоды типа СД2 представляли собой трехпериодную КПСР 50 Å-InAs/50 Å-GaSb на основе преднамеренно нелегированных слоев, помещенную также между сильнолегированными p^+ - и n -слоями InAs. Однако в этом случае для улучшения электронного ограничения InAs/GaSb КПСР была зажата широкозонными слоями AlSb толщиной 100 Å (рис. 1, *b*).

Светодиодные структуры были приготовлены методом стандартной фотолитографии по технологии мезодиодов с диаметром мезы $d = 300 \mu\text{m}$ и диаметром контакта $50 \mu\text{m}$. Измерения электролюминесценции (ЭЛ) проводились при температуре $T = 77 \text{ K}$. Спектры

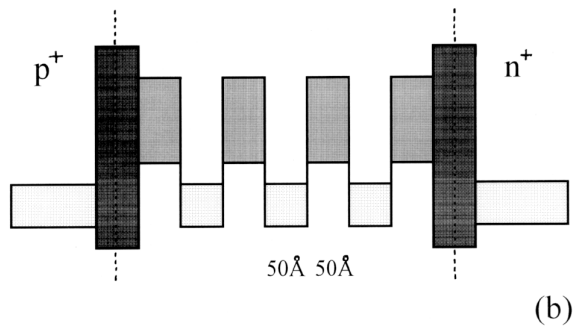
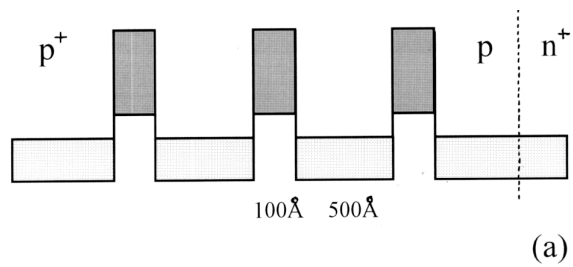


Рис. 1. Схематические зонные диаграммы светоизлучающих диодов на основе гетероструктур типа СД1 (а) и типа СД2 (b).

ЭЛ регистрировались с помощью решеточного монохроматора МДР-4 с решеткой 150 line/mm методом синхронного детектирования. В качестве приемника использовался фоторезистор InSb, охлаждаемый жидким азотом. Исследования ЭЛ проводились в импульсном режиме с длительностью импульсов в диапазоне 100 ns–2.5 μ s и частотой повторения $f = 10^5$ Hz.

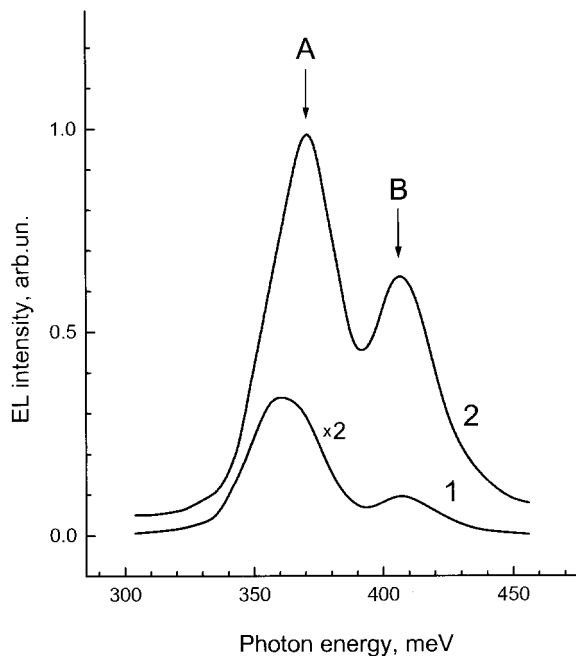


Рис. 2. Спектры электролюминесценции гетероструктур типа СД1 при различных токах накачки: 1 — 80 мА; 2 — 200 мА.

При приложении внешнего смещения к структурам типа СД1 наблюдалась электролюминесценция в спектральном диапазоне 3–4 μm при $T = 77\text{ K}$. Излучение возникало при напряжении прямого смещения начиная с $U \sim 0.6\text{ V}$. При этом спектры ЭЛ содержали две четко выраженные полосы с максимумами излучения $h\nu_A = 360\text{ meV}$ ($\lambda_A = 3.44\ \mu\text{m}$) и $h\nu_B = 408\text{ meV}$ ($\lambda_B = 3.04\ \mu\text{m}$) и полушириной 25 meV (рис. 2). Как видно из рисунка, длинноволновая полоса излучения А в спектрах ЭЛ была более интенсивной по сравнению с коротковолновой полосой В, и при больших токах наблюдалось лишь незначительное перераспределение интенсивности между полосами. Кроме того, при увеличении внешнего смещения ($U > 0.8\text{ V}$) наблюдался "голубой" сдвиг по энергии максимума полосы А на 13 meV ($h\nu_A = 373\text{ meV}$), при этом энергетическое положение полосы В не изменялось. Следует

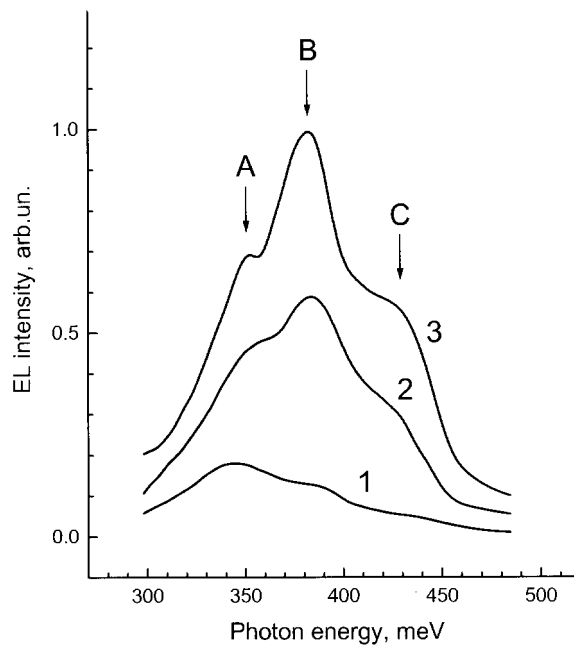


Рис. 3. Спектры электролюминесценции гетероструктур типа СД2 при различных токах накачки: 1 — 50 мА; 2 — 100 мА; 3 — 200 мА.

отметить, что энергия максимума полосы $Ah\nu_A = 360\text{--}373\text{ meV}$ меньше ширины запрещенной зоны полупроводников, составляющих исследуемую гетероструктуру ($E_{g\text{InAs}} = 410\text{ meV}$ и $E_{g\text{GaSb}} = 805\text{ meV}$ при 77 К).

Существование такой длинноволновой полосы излучения А в спектре ЭЛ, а также наблюдаемое "голубое" смещение ее при увеличении тока накачки, мы связываем с непрямыми (туннельными) излучательными переходами на гетерогранице II типа GaSb/InAs. При этом электроны, локализованные на уровне размерного квантования в яме со стороны InAs, рекомбинируют с тяжелыми дырками в GaSb. Подобное поведение полос излучения в спектрах ЭЛ наблюдалось нами ранее на разьединенной одиночной изотипной гетероструктуре $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$, выращенной методом ЖФЭ [10].

При подаче прямого смещения на структуру типа СД2 излучение наблюдалось, так же как и в случае структур типа СД1, начиная с напряжения $U \sim 0.6$ В. При начальном смещении и небольших токах накачки в спектре ЭЛ доминировала полоса излучения с энергией максимума $h\nu = 339$ меВ ($3.65 \mu\text{m}$) и полушириной $\Delta h\nu = 60$ меВ. При дальнейшем увеличении смещения на структуре ($U > 0.8$ В) спектр ЭЛ состоял уже из трех полос с энергиями максимумов $h\nu_A = 357$ меВ ($3.47 \mu\text{m}$), $h\nu_B = 377$ меВ ($3.29 \mu\text{m}$) и $h\nu_C = 428$ меВ ($2.90 \mu\text{m}$) (рис. 3). При больших токах накачки (напряжениях смещения на структуре $U > 1.0$ В) интенсивность полос B и C значительно возрастала по сравнению с интенсивностью полосы A , кроме того, полоса B по интенсивности доминировала в спектре ЭЛ.

Существование трех полос в спектре ЭЛ структур типа СД2 мы связываем с излучательными переходами электронов с трехкратно расщепленного уровня в InAs/GaSb КПСР на уровни локализации тяжелых дырок. Волновые функции электронов в исследуемой КПСР могут перекрываться, что позволяет предположить наличие единого расщепленного состояния электронов, тогда как дырки локализованы на изолированных уровнях в квантовых ямах. Полосы излучения A и B мы связываем с переходами электронов с двух нижних расщепленных электронных уровней на первый дырочный уровень. Тогда как полоса излучения C в спектре ЭЛ, по нашему мнению, представляет собой суперпозицию двух излучательных переходов: с верхнего расщепленного электронного уровня на первый дырочный уровень и с нижнего расщепленного на второй дырочный уровень. Эти результаты находятся в хорошем соответствии с расчетами энергетических уровней для одиночных квантовых ям ($E_e = 290$ меВ для электронов в квантовой яме InAs и $E_h^1 = 50$ меВ для дырок в квантовой яме GaSb) [11].

Таким образом, методом МПЭ были выращены на подложках InAs квантово-размерные диодные структуры на основе разьединенных гетеропереходов II типа в системе InAs/GaSb, в которых наблюдалась электrolюминесценция в спектральном диапазоне $3\text{--}4 \mu\text{m}$ при $T = 77$ К. Обнаружено существование полос излучения, обусловленных рекомбинационными переходами с участием электронов с уровней размерного квантования как из самосогласованных КЯ на гетерогранице II типа InAs/GaSb, так и из прямоугольных КЯ в КПСР. Это открывает возможность использования таких структур в качестве активной области длинноволнового лазера нового типа, работающего в среднем ИК-диапазоне.

Авторы выражают благодарность Г.Г. Зегря за полезное обсуждение результатов.

Работа была выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, программ Министерства науки РФ "Физика твердотельных наноструктур" и "Оптика лазеров", а также грантами INTAS 94-1172 и РФФИ-ДФЖ 96-02-00236 G.

Список литературы

- [1] *Yakovlev Yu.P., Danilova T.N., Imenkov A.N., Mikhailova M.P., Moiseev K.D., Ershov O.G., Sherstnev V.V.* // Proc. of the 23 ISCS. St. Petersburg, September 28-30, 1996. P. 551.
- [2] *Choi H.K., Turner G.W., Kurt S.R.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65 (18). P. 2251.
- [3] *Zhang Y.H.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66 (2). P. 118.
- [4] *Lin C.H., Yang R.O., Zhang D., Murry S.J., Pei S.S., Allerman A.A., Kurts S.R.* // Electr. Lett. 1997. V. 33 (7). P. 598.
- [5] *Михайлова М.П., Моисеев К.Д., Ершов О.Г., Яковлев Ю.П.* // ФТП. 1996. Т. 30 (6). С. 985.
- [6] *Baranov A.N., Bertru N., Cumina Y., Boissier G., Alibert C., Joullie A.* // Appl. Phys. Lett. 1997. (to be published).
- [7] *Ivanov S.V., Kurinkiev B.K., Ledentsov N.N., Meltser B.Ya., Monakhov A.A., Rogachev A.A., Shaposhnikov S.V., Kop'ev P.S.* // Workbook of 6th International Conference on Modulated Semiconductor Structures. Garmish-Partenkirchen, 1993. P. 1047; *Kop'ev P.S., Meltser B.Ya., Ivanov S.V., Rogachev A.A., Shaposhnikov S.V.* // Proc. of the VIII International Conference on Molecular Beam Epitaxy. Osaka, 1994. P. 542.
- [8] *Tuttle G., Kroemer H., English J.H.* // Appl. Phys. 1990; V. 67. P. 3032; *Wang P.D., Ledentsov N.N., Sotomayor Torres C.M., Ivanov S.V., Meltser B.Ya., Kop'ev P.S.* // Solid State Communications. 1994. V. 91 (5). P. 361.
- [9] *Neklyudov P.V., Ivanov S.V., Meltser B.Ya., Kop'ev P.S.* // Semiconductors 1997. V. 31 (10). P. 1067.
- [10] *Mikhailova M.P., Zegrya G.G., Moiseev K.D., Yakovlev Yu.P.* // Solid State Electronics. 1996. V. 40 (1-8). P. 673.
- [11] *Bastard G.* // Phys. Rev. B. 1981. V. 24. P. 5693.