

06.2;12

Фотолюминесценция в системе InGaAs/GaAs с квантовыми точками и квантовыми ямами в диапазоне длин волн $1.55\ \mu\text{m}$

© А.А. Тонких, В.А. Егоров, Н.К. Поляков, Г.Э. Цырлин,
Н.В. Крыжановская, Д.С. Сизов, В.М. Устинов

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

Поступило в Редакцию 20 декабря 2001 г.

Продемонстрирована возможность получения длинноволновой фотолюминесценции (до $1.65\ \mu\text{m}$ при комнатной температуре) от гетероструктур InGaAs/GaAs, полученных методом низкотемпературной молекулярно-пучковой эпитаксии на основе двух подходов: выращивание InAs квантовых точек при малой скорости роста и выращивание квантовой ямы $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ в условиях избытка элементов III группы.

Создание лазерных диодов с длиной волны генерации $1.55\ \mu\text{m}$, соответствующей минимуму поглощения сигнала, является актуальной задачей для их применения в глобальных волоконно-оптических линиях связи. К настоящему времени предложены несколько подходов для решения этой задачи, которые в основном заключаются в выращивании полупроводниковых соединений A^3B^5 на подложках фосфида индия. Традиционный подход заключается в использовании системы InGaAsP/InP с квантовыми ямами (КЯ). В работе [1] авторы получили фотолюминесценцию в диапазоне $1.55\ \mu\text{m}$ от структур с InAs квантовыми точками (КТ), выращенных на буферном слое InAlAs, согласованном по параметру решетки с подложкой InP. Однако подобные устройства обладают рядом существенных недостатков: невысокая температурная стабильность, сложности в создании вертикально-излучающих лазеров, а также относительная дороговизна InP подложек. Существуют и альтернативные по отношению к InP технологии. Так, в [2] авторы используют квантовые ямы GaAsSbN, выращенные на подложке GaAs. В последнем случае концентрации азота были 1 и 2.5%, что позволило

достичь диапазона $1.3 \mu\text{m}$ (для 1%N) и $1.55 \mu\text{m}$ (для 2.5%N). Кроме того, существует подход, в котором полупроводниковый материал легируется резкоземельными элементами. В [3] авторы демонстрируют электролюминесценцию на длине волны $1.55 \mu\text{m}$ из легированного эрбием GaN.

Тем не менее большой интерес представляет поиск новых путей создания структур, пригодных для приборного применения. В работе [4] авторы продемонстрировали возможность получения длинноволнового излучения ($\sim 1.7 \mu\text{m}$) от структур с латерально-совмещенными квантовыми точками (ЛСКТ) InAs/GaAs , выращенными при низкой ($\sim 320\text{--}350^\circ\text{C}$) температуре подложки. В данной работе мы предлагаем модификацию данного метода, основанную на низкой скорости осаждения InAs, что должно повысить кристаллографическое качество структуры, сохранив длинноволновое излучение в требуемом диапазоне $1.55 \mu\text{m}$. Кроме того, нами был исследован альтернативный метод, позволяющий достичь этого диапазона длин волн, — выращивание $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ квантовых ям при низкой температуре подложки и невысокой скорости роста, проводившееся в условиях избытка элементов III группы.

Ростовые эксперименты проводились на установке молекулярно-пучковой эпитаксии ЭП1203 на полуизолирующих сингулярных подложках GaAs (100). В образцах первого типа активная область формировалась осаждением слоя InAs эффективной толщиной 3 монослоя (МС), выращенного при низкой скорости напыления InAs (0.01 МС/с), температура подложки в начальный момент осаждения составляла 350°C . Процесс осаждения InAs КТ контролировался с помощью системы регистрации и анализа картин дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) [5]. Динамика изменения картин ДБЭО показала, что характерный для режима роста по механизму Странски-Крастанова резкий переход от линейчатой картины дифракции к точечной, соответствующей островковому росту, наблюдался после напыления слоя InAs толщиной порядка 1.8 МС. Для второго типа образцов активная область состояла из квантовой ямы $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$, толщина которой изменялась для различных структур от 20 до 50 \AA . Характерной особенностью роста было то, что переход к островковому росту на картинах ДБЭО не наблюдался; это свидетельствовало о том, что рост проводился в планарном режиме. Температура подложки при выращивании активной области составляла 350°C . Рост активной области производился в условиях избытка элементов III группы, остаточное давление паров

As₄ было на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ Pa. Для предотвращения испарения индия из InGaAs слоя для каждого типа структур выращивался слой GaAs толщиной 20 Å непосредственно после формирования активной области при той же температуре подложки. Далее температура подложки повышалась и проводилось выращивание слоя GaAs толщиной 200 Å.

Для предотвращения транспорта неравновесных носителей при проведении оптических исследований в приповерхностную область и в область подложки активная область ограничивалась с обеих сторон короткопериодными сверхрешетками Al_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs (5 пар, 25Å/25Å). Сверху структура покрывалась слоем GaAs толщиной 5 nm. Для буферной области, сверхрешеток и верхнего слоя GaAs температура роста составляла 600°C. Фотолюминесценция возбуждалась Ar⁺-лазером ($\lambda = 514.5$ nm, плотность возбуждения ~ 100 W/cm²). Излучение детектировалось охлаждаемым Ge фотодиодом.

На рис. 1 представлены ФЛ спектры от двух структур с КТ, выращенными при низкой температуре. Различие между ними заключалось

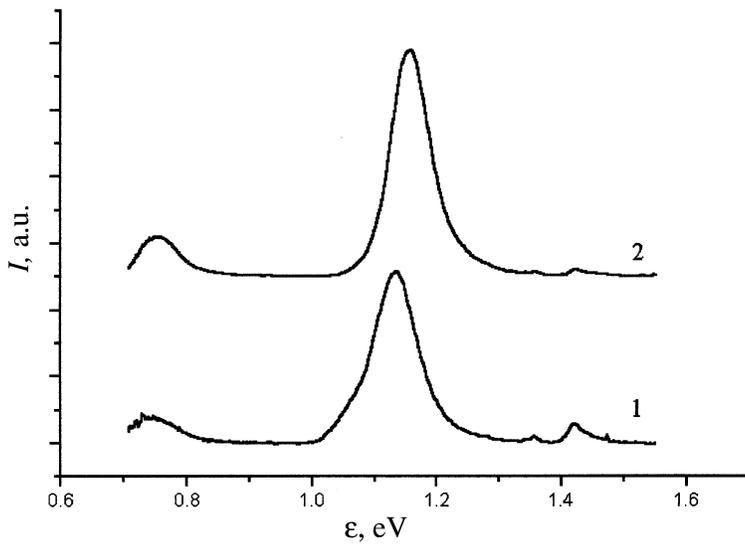


Рис. 1. Спектры ФЛ для структуры с низкотемпературными КТ InAs при температуре наблюдения 300 К: 1 — 3МС InAs, осажденные на низкой скорости роста, с понижением температуры подложки от 350 до 320°C; 2 — 3МС InAs, осажденные на низкой скорости роста без понижения температуры подложки.

в технологии осаждения InAs. В первом образце осаждение InAs сопровождалось понижением ростовой температуры подложки от 350 до 320°C, во втором случае температура подложки была постоянной при осаждении InAs и составляла 350°C. В спектрах образцов отчетливо видны две линии. Первая линия в области 1.15 eV соответствует фотолуминесценции от КТ достаточно малого размера. Наблюдения за картиной ДБЭО подтверждают факт образования КТ. Отметим, что КТ подобного рода обычно получают осаждением InAs при температуре подложки 480–500°C [6]. Вторая, длинноволновая, линия в спектре соответствует излучению от латерально-связанных квантовых точек, описанных ранее в [4]. Предложенная нами модификация низкотемпературного метода выращивания позволила получить от подобных структур ФЛ с интенсивностью длинноволнового пика, сравнимой с интенсивностью пика от обычных КТ при комнатной температуре. На наш взгляд, это происходит благодаря использованию низкой ~ 0.01 МС/с скорости роста, повышающей кристаллографическое качество структуры.

На рис. 2 представлены ФЛ спектры от структур с КЯ, выращенными при температуре 350°C. В образцах 1, 2 и 3 количество осажденного InGaAs было 20, 30 и 50 Å соответственно. В процессе роста мы наблюдали изменения в картинах ДБЭО. Во всех образцах при осаждении InGaAs спектр картин ДБЭО оставался линейчатым при уменьшении интенсивности основных рефлексов, реконструкция поверхности изменялась с (2×2) на (3×1) , что соответствует, по-видимому, образованию корругированной структуры на поверхности, характерной для гетероэпитаксиального роста в системе InGaAs/GaAs [7]. Во время осаждения 20 Å GaAs на слой InGaAs при той же температуре в образцах 1 и 2 наблюдалась фасеточная картина дифракции. Мы связываем этот эффект с появлением в поверхностном слое островков InGaAs. Подтверждением этого предположения является наличие пика ФЛ в области 1.15 eV. Образец 3 также демонстрирует широкую линию ФЛ в этом диапазоне длин волн, однако наблюдения за ДБЭО не обнаружили характерного перехода от послойного к островковому росту. Возможно, этим можно объяснить тот факт, что интенсивность ФЛ в коротковолновом пике меньше, чем в длинноволновом пике. Интересной особенностью образцов 2 и 3 является наличие длинноволнового пика в области $1.6 \mu\text{m}$. Появление этого пика мы относим к структурам, которые получаются в результате трансформации, за счет поверхностных напряжений, первоначального слоя $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$.

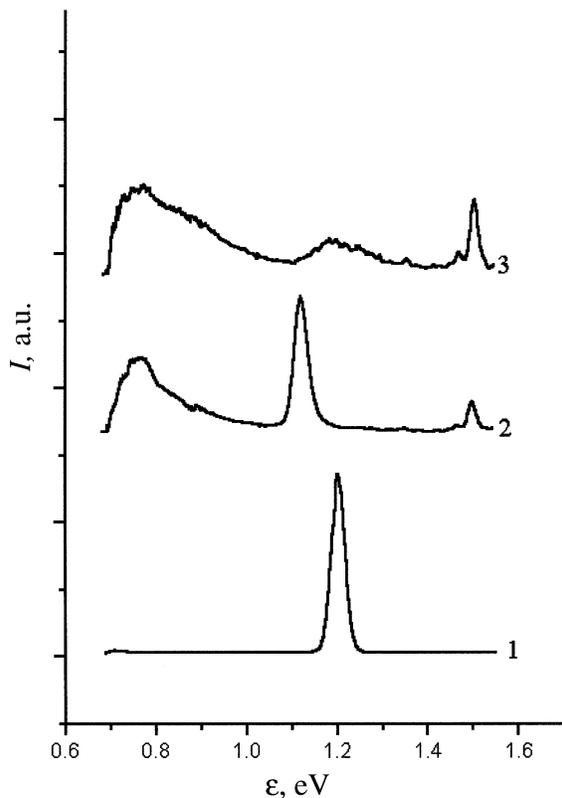


Рис. 2. Спектры ФЛ для структуры с $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ квантовыми ямами при температуре наблюдения 77 К: 1 — 20 Å $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$, 2 — 30 Å $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$, 3 — 50 Å $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$.

Таким образом, нами продемонстрирована возможность получения ФЛ излучения в диапазоне длин волн 1.5–1.65 μm при комнатной температуре от структур с квантовыми точками и квантовыми ямами в системе $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ при использовании методики низкотемпературного выращивания слоев активной области. Детальное исследование подобных структур методами трансмиссионной электронной микроскопии будет проведено в ближайшее время.

В.А. Егоров и А.А. Тонких благодарят администрацию С.-Петербурга (гранты молодых ученых № МО1–2.4К–494 и МО1–2.4Д–495).

Данная работа выполнена при частичной поддержке научной программы "Физика твердотельных наноструктур".

Список литературы

- [1] *Li Y.F., Ye X.L., Xu B., Liu F.Q., Ding D., Jiang W.H., Sun Z.Z., Zhang Y.C., Liu H.Y., Wang G.Z.* // J. Cryst. Growth. 2000. V. 218. P. 451–454.
- [2] *Harmand J.C., Ungaro G., Ramos J., Rao E.V.K., Saint-Girons, Teissier R., Le Roux, Largeau L., Patriarche* // J. Cryst. Growth. 2001. V. 227–228. P. 553–557.
- [3] *Shen H., Pamulapati J., Taysing M., Wood M.C., Lareau R.T., Ervin M.H., Mackenzie J.D., Abernathy C.R., Peatron S.J., Ren F., Zavada J.M.* // Solid-State Electronics. 1999. V. 43. P. 1231–1234.
- [4] *Maximov M.V., Tsatsul'nikov A.F., Volovik B.V., Bedarev D.A., Egorov A.Yu., Zhukov A.E., Kovsh A.R., Bert N.A., Ustinov V.M., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Bimberg D., Soshnikov I.P., Werner P.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75 (16). P. 2347–2349.
- [5] *Петров В.Н., Демидов В.Н., Корнеева Н.П., Поляков Н.К., Цырлин Г.Э.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 5. С. 97–101.
- [6] *Цырлин Г.Э., Корнеева Н.П., Демидов В.Н., Поляков Н.К., Петров В.Н., Леденцов Н.Н.* // ФТП. 1997. Т. 31. № 10. С. 1230–1233.
- [7] *Guryanov G.M., Girlin G.E., Golubok A.O., Tipisev S.Y., Ledentsov N.N., Shchukin V.A., Grundmann M., Bimberg D., Alferov Z.I.* // Surf. Sci. 1996. P. 352–354, 646–650.