

07

Электрolumинесценция в диапазоне 1.55–1.6 μm диодных структур с квантовыми точками на GaAs

© А.Е. Жуков, Б.В. Воловик, С.С. Михрин,
Н.А. Малеев, А.Ф. Цацульников, Е.В. Никитина,
И.Н. Каяндер, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов

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

Поступило в Редакцию 24 апреля 2001 г.

Диодные структуры на подложках GaAs с активной областью на основе латерально-связанных квантовых точек InAs, сформированных методом низкотемпературной молекулярно-пучковой эпитаксии, демонстрируют электрolumинесценцию на длине волны 1.55–1.6 μm при температуре 20–260 К.

В последнее время большое внимание уделяется разработке длинноволновых лазерных источников диапазонов длин волн 1.3 и 1.55 μm для применений в линиях волоконно-оптической связи, способных заменить существующие торцевые лазерные диоды на основе материалов InGaAsP/InP [1]. Особый интерес представляют исследования в области создания поверхностно-излучающих лазеров на подложках GaAs. В случае использования материалов на GaAs относительно легко сформировать высокодобротный микрорезонатор, используя распределенные брэгговские зеркала Al(Ga)As/GaAs или Al(Ga)O/GaAs. Главной проблемой, однако, остается выбор материала и режимов эпитаксиального роста активной области, способной излучать в указанных диапазонах длин волн, поскольку хорошо отработанная технология квантовых ям InGaAs не позволяет продвинуться далее 1.2 μm .

Основными подходами, применяемыми для продвижения в область больших длин волн на GaAs, остается применение азотсодержащих структур InGaAsN и квантовых точек (КТ) In(Ga)As. В диапазоне 1.3 μm на основе обеих технологий продемонстрированы монолитные поверхностно-излучающие лазеры, работающие в непрерывном одномодовом режиме при комнатной температуре с выходными мощностями 550 μW (InGaAsN, 1.284 μm [2]), 650 μW (InAs/InGaAs КТ, 1.305 μm [3]) и 750 μW (InGaAsN, 1.269 μm [4]).

В то же время в диапазоне $1.55 \mu\text{m}$ достигнутые успехи существенно менее значительны. С использованием азотсодержащих соединений была продемонстрирована фотолюминесценция при комнатной температуре на длине волны $1.52 \mu\text{m}$ в структурах с квантовыми точками InGaAsN [5] и квантовыми ямами GaAsSbN [6], а также лазерная генерация в диодной структуре с квантовыми ямами InGaAsN [7]. Однако в последнем случае пороговая плотность тока составила 47 kA/cm^2 , что, вероятно, является следствием низкого качества сильнонапряженных квантовых ям $\text{GaIn}_{0.38}\text{AsN}_{0.05}$, имеющих высокое содержание азота. Использование квантовых точек InAs, осажденных при низких температурах ($320\text{--}350^\circ\text{C}$), также позволяет существенно увеличить оптический диапазон, достижимый на GaAs. В работе [8] наблюдалась фотолюминесценция на длинах волн $1.65\text{--}1.72 \mu\text{m}$ при комнатной температуре, однако сообщений об электролюминесценции в подобных структурах до настоящего времени не было.

В настоящей работе впервые продемонстрирована электролюминесценция в диапазоне $1.55\text{--}1.6 \mu\text{m}$ из структур на GaAs с активной областью, не содержащей азот.

В качестве активной области нами были использованы массивы самоорганизующихся квантовых точек InAs, формируемые методом молекулярно-пучковой эпитаксии при температуре подложки 320°C . Как было показано [8], в случае низкотемпературного осаждения InAs в дополнение к пространственно-изолированным островкам (квантовым точкам), излучающим на длине волны $1\text{--}1.1 \mu\text{m}$, формируются конгломераты островков, объединенных в плоскости интерфейса. Эти так называемые латерально-связанные квантовые точки (laterally associated quantum dots, LAQDs) ответственны за появление в спектрах фотолюминесценции длинноволновой полосы с максимумом на $1.55\text{--}1.75 \mu\text{m}$ в зависимости от режимов осаждения (количество осажденного InAs и температура подложки).

Рост осуществлялся в установке молекулярно-пучковой эпитаксии Riber 32P с твердотельными источниками. Активная область на основе 5 слоев низкотемпературных КТ, разделенных прослойками GaAs толщиной 50 nm , была ограничена легированными ($5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) слоями $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, служащими для инжекции носителей заряда. Вплавные контакты формировали к подложке GaAs *n*-типа и прикрывающему слою GaAs *p*-типа. Электролюминесценция диодных структур была исследована в диапазоне температур $20\text{--}260 \text{ K}$ при возбуждении импульсами тока

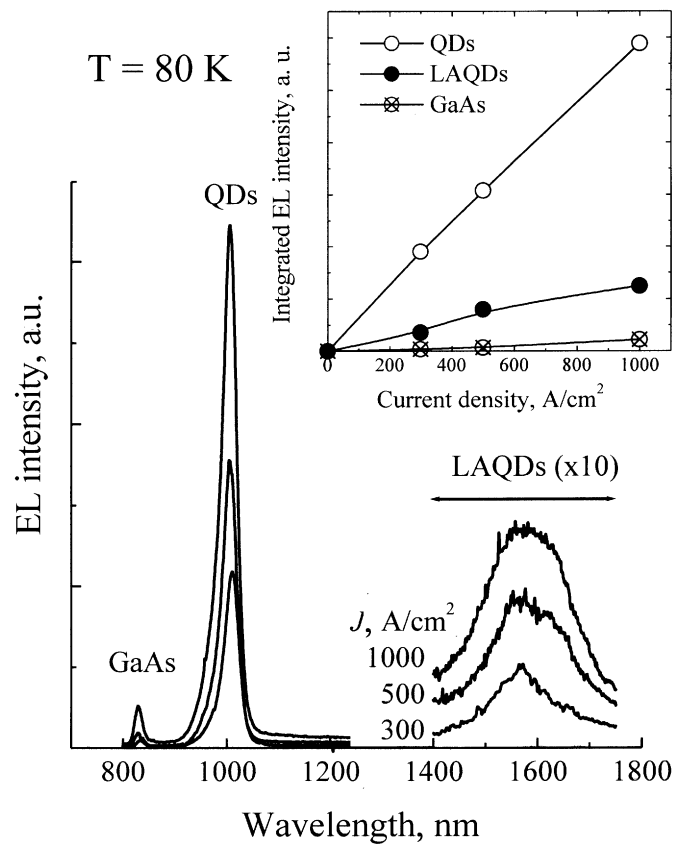


Рис. 1. Спектры электролюминесценции при температуре 80 К, записанные при различных плотностях тока. Линии, обусловленные излучением из матрицы GaAs, пространственно-изолированных и латерально-связанных квантовых точек, обозначены GaAs, QD и LAQD соответственно. На вставке приведена зависимость интегральной интенсивности этих линий от плотности тока.

частотой 5 kHz и длительностью 0.3 μs . Излучение детектировалось охлаждаемым Ge фотодиодом (North Coast).

На рис. 1 представлены спектры электролюминесценции, снятые при 80 К при различных плотностях тока накачки. В спектрах наблю-

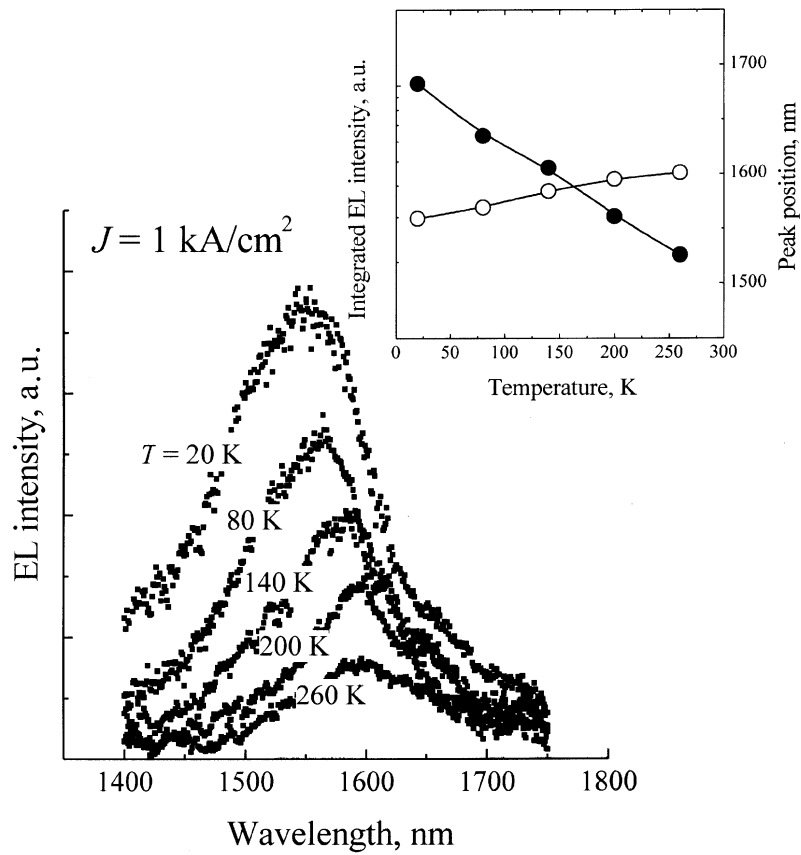


Рис. 2. Спектры электролюминесценции в диапазоне излучения латерально-связанных квантовых точек при плотности тока 1 kA/cm^2 , записанные при различной температуре наблюдения. На вставке приведены зависимости интегральной интенсивности и положения максимума линии от температуры.

даются три полосы излучения на длинах волн 800–850, 900–1100 и 1400–1750 nm, обусловленные соответственно рекомбинацией носителей в матрице GaAs, пространственно-изолированных КТ и латерально-связанных КТ. Максимум линии излучения латерально-связанных КТ

при этой температуре наблюдения находится на 1.57 мкм. Интегральные интенсивности электрoлюминесценции в указанных спектральных диапазонах в зависимости от плотности тока накачки приведены на вставке к рис. 1. Линия пространственно-изолированных КТ доминирует в спектрах, превосходя линию латерально-связанных КТ примерно в 5 раз по интегральной интенсивности. Мы полагаем, что это обусловлено различием в поверхностной плотности этих типов КТ ($5 \cdot 10^{10}$ и $1-2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ соответственно). Интенсивность линии 1.57 мкм латерально-связанных КТ возрастает практически линейно с увеличением тока накачки во всем исследованном диапазоне плотностей тока (до 1 кА/см^2).

Спектры электрoлюминесценции в диапазоне излучения латерально-связанных КТ, записанные при различных температурах наблюдения (20–260 К) и постоянной плотности тока накачки (1 кА/см^2) приведены на рис. 2. Интегральная интенсивность линии латерально-связанных КТ экспоненциально падает с увеличением температуры, а положение максимума линии закономерно сдвигается в сторону длинных волн. Полная ширина линии электрoлюминесценции на половине высоты составляет приблизительно 120 nm и практически не зависит от температуры наблюдения. Это указывает на разброс размеров КТ как на основную причину уширения линии электрoлюминесценции латерально-связанных КТ.

Максимальная температура, при которой линия электрoлюминесценции латерально-связанных КТ заметно превышала уровень шумов измерительной установки, составила 260 К. При этом максимум находился на длине волны 1.6 мкм. Насколько нам известно, это является наибольшей длиной волны излучения ближнего ИК диапазона для всех типов структур на GaAs, использующих токовую инжекцию.

Таким образом, продемонстрирована возможность существенно увеличить длину волны излучения, достижимую в структурах на GaAs, использующих прямую токовую накачку. Линия электрoлюминесценции латерально-связанных квантовых точек InAs, сформированных низкотемпературным осаждением, наблюдается вплоть до 260 К в диапазоне длин волн 1.55–1.6 мкм. Несмотря на преобладание в спектрах электрoлюминесценции коротковолновой линии пространственно-изолированных КТ, активная область подобных структур перспективна для использования в вертикально-излучающих лазерах и светодиодах диапазона 1.55 мкм, поскольку излучение может быть селективно усилено (подавлено) оптическим микрорезонатором.

Работа выполнялась при поддержке программы "Физика твердотельных наноструктур" (проект 99–2014), проекта РФФИ (00–02–17006-а) и программы NanOp.

Список литературы

- [1] *Ustinov V.M., Zhukov A.E.* // *Semicond. Sci. Technol.* 2000. V. 15. R41–R54.
- [2] *Steinle G., Riechert H., Egorov A.Yu.* // *Electron Lett.* 2001. V. 37 (2). P. 93–94.
- [3] *Lott J., Ledentsov N., Ustinov V.M., Maleev N.A., Zhukov A., Kovsh A.R., Maximov M.V., Volovik B.V., Alferov Zh.I., Bimberg D.* // *IEEE LEOS 13th Annual Meeting.* 13–16 November 2000. Rio Grande, Puerto Rico. IEEE catalog number: OCH37080. 2000. P. 304–305.
- [4] *Jackson A.W., Naone R.L., Dalberth M.J., Smith J.M., Malone K.J., Kisker D.W., Klem J.F., Choquette K.D., Serkland D.K., Geib K.M.* // *Electron. Lett.* 2001. V. 37 (6). P. 355–356.
- [5] *Sopanen M., Xin H.P., Tu C.W.* // *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 76 (8). P. 994–996.
- [6] *Ungaro G., Le Roux G., Teissier R., Harmand J.C.* // *Electron. Lett.* 1999. V. 35 (15). P. 1246–1248.
- [7] *Fischer M., Reinhardt M., Forchel A.* // *Electron. Lett.* 2000. V. 36 (14). P. 1208–1209.
- [8] *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.