

08

Влияние сульфидной пассивации на люминесценцию микродисков с квантовыми ямами и квантовыми точками

© Н.В. Крыжановская^{1,2}, М.В. Лебедев³, Т.В. Львова³,
Ю.В. Кудашова¹, И.И. Шостак¹, Э.И. Моисеев^{1,2},
А.Е. Жуков^{1,2,4}, М.В. Максимов^{1,2,3}, М.М. Кулагина³,
А.М. Надточий¹, С.И. Трошков³, А.А. Блохин², М.А. Бобров³

¹ Санкт-Петербургский Академический университет —
научно-образовательный центр нанотехнологий РАН

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

⁴ Санкт-Петербургский научный центр РАН

E-mail: kryj@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 10 февраля 2015 г.

Была использована сульфидная пассивация для уменьшения скорости поверхностной безызлучательной рекомбинации в микродисковых мезах на основе гетероструктур (AlGaIn)As/GaAs, активная область которых была сформирована либо из 10 квантовых ям GaAs/AlAs, либо из одного слоя квантовых точек InAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As. Показано, что пассивация приводит к существенному возрастанию интенсивности фотолюминесценции во всех типах мезаструктур.

Интерес к созданию компактных оптических излучателей с активной областью на основе наноструктур различной размерности (квантовые точки, квантовые ямы) обусловлен их перспективностью для создания элементов быстродействующих систем оптической передачи и обработки информации на плате. Обладающие осевой симметрией полупроводниковые микрорезонаторы (микродиски и микрокольца) позволяют реализовать режим лазерной генерации даже в тех случаях, когда диаметр резонатора составляет лишь несколько микрон. Однако из-за близости замкнутой моды резонатора к его боковой поверхности в таких резонаторах остро стоит проблема подавления поверхностной рекомбинации. Известно, что система материалов GaInAsP/InP

характеризуется низкой скоростью поверхностной рекомбинации [1], однако лазеры на ее основе не обладают температурной стабильностью характеристик, достаточной для работы на интегральной плате, где рабочая температура может достигать 85°C. В то же время рекордные значения по температурной стабильности характеристик лазеров полосковой конструкции принадлежат лазерам на основе арсенида галлия с квантовыми точками в качестве активной области [2]. Хотя структуры на основе AlGaInAs/GaAs, как правило, характеризуются высокой скоростью поверхностной рекомбинации [3], в структурах с квантовыми точками InAs/InGaAs вклад безызлучательной рекомбинации на боковых стенках подавлен благодаря глубокой локализации носителей заряда в квантовых точках [4]. Недавно в кольцевых микролазерах диаметром 2 μm на основе квантовых точек InAs/InGaAs нами была продемонстрирована возможность генерации через основное состояние вплоть до 100°C [5].

Поскольку оптическое усиление, которое может быть достигнуто на основном оптическом переходе квантовых точек (так называемое „насыщенное усиление“), ограничено из-за конечного числа самих квантовых точек, то при дальнейшем уменьшении размера резонатора и/или увеличении температуры происходит нежелательный переход к генерации через возбужденные уровни квантовых точек. В лазерах с активной областью на основе квантовых ям эффект насыщения не столь выражен [6]. Использование активной области на основе квантовых ям, вероятно, позволит избежать проблемы насыщения усиления при предельной миниатюризации микролазеров на основе GaAs. Однако латеральный транспорт носителей в квантовых ямах не ограничен, и вклад безызлучательной рекомбинации на боковых поверхностях резонатора при уменьшении его размера становится существенным. Известно, что сульфидная пассивация структур в ряде случаев приводит к подавлению безызлучательной рекомбинации на боковой поверхности. Так, например, обработка микродисковых структур AlGaAs/GaAs в водном растворе сульфида аммония позволила обеспечить лазерную генерацию в этих структурах [7,8], причем защита сульфидированных структур слоем нитрида кремния привела к повышению их срока службы. Однако информации по исследованию сульфидной пассивации мез малого размера, сформированных из гетероструктур на основе GaAs с квантовыми точками InAs/InGaAs или с квантовыми ямами GaAs, в литературе нет.

В данной работе нами проведено исследование интенсивности фотолуминесценции (ФЛ) мез микродисковой геометрии диаметром от 2 до 6 μm до и после сульфидной пассивации. В качестве активной области использовались либо 10 квантовых ям GaAs/AlAs, либо 1 слой квантовых точек InAs/InGaAs. Получено существенное возрастание интенсивности ФЛ мез (в структурах с квантовыми ямами до 35 раз) после пассивации.

Эпитаксиальные структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующих подложках GaAs (100). Для исследования влияния пассивации поверхности мез на подавление безызлучательной рекомбинации были использованы структуры 2 типов, обозначенные нами как структура MQW и структура QD. В качестве активной области в структуре MQW служат 10 квантовых ям GaAs толщиной 10 nm, разделенных барьерами AlAs той же толщины. В качестве активной области в структуре QD служит один слой квантовых точек InAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As, помещенных в матрицу GaAs. Квантовые точки формировались по механизму Странского–Крастанова осаждением 2.5 монослоев InAs с последующим зарастиванием слоем In_{0.15}Ga_{0.85}As толщиной 5 nm. Типичная плотность таких точек составляет $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, что соответствует среднему расстоянию между точками в слое около 45 nm. В обеих структурах для ограничения носителей со стороны подложки и поверхности осаждались барьерные слои Al_{0.25}Ga_{0.75}As толщиной более 50 nm. Сверху структура покрывалась тонким слоем GaAs толщиной 10 nm. Схематическое изображение структур MQW и QD приведено на рис. 1. Отметим, что оптическое ограничение со стороны подложки в исследуемых структурах отсутствовало, так что достижение режима лазерной генерации было невозможно.

Микродисковые мезы различного диаметра (от 2 до 6 μm) были сформированы с помощью фотолитографии и химического травления в растворе HBr : K₂Cr₂O₇ : CH₃COOH. Травление проводилось до подложки GaAs, так что глубина травления заведомо превышала глубину залегания активной области в образцах. Пассивация структур производилась в 1 М водного раствора сульфида натрия (Na₂S : 9H₂O). Структуры обрабатывались в растворе примерно 4 min, после чего извлекались из раствора, промывались водой и высушивались на воздухе.

Исследования микрофотолуминесценции (мкФЛ, англ. μPL) проводились при накачке YAG:Nd-лазером, работающим в непрерывном

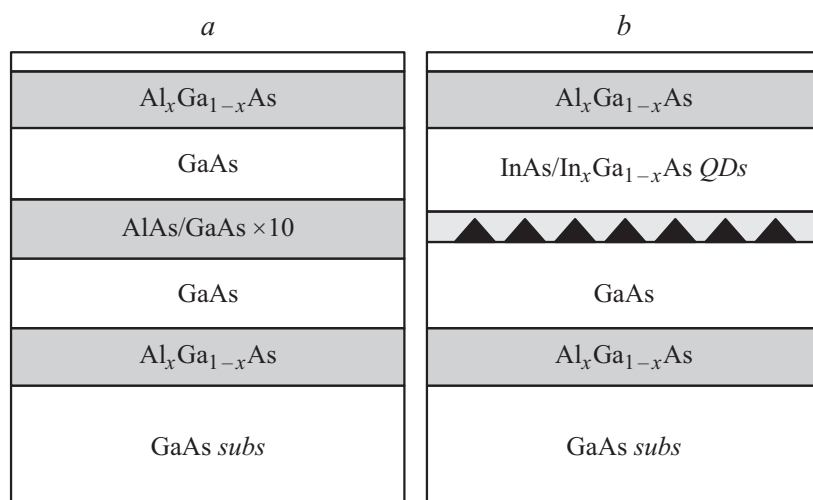


Рис. 1. Схематическое изображение последовательности эпитаксиальных слоев в структурах MQW (*a*) и QD (*b*).

режиме на длине волны 527 nm. Мощность лазера была около 1 mW. Лазерный луч фокусировался в пятно диаметром до 1 μm с помощью объектива Olympus LMPlan IR × 100 NA0.8. Этот же объектив использовался для сбора сигнала от образца. Детектирование проводилось с помощью монохроматора FHR 1000 и многоканального охлаждаемого фотодетектора InGaAs Horiba Symphony (разрешение 0.05 nm).

Данные сканирующей электронной микроскопии показывают, что сульфидная пассивация не приводит к существенному изменению геометрии мез (рис. 2). Характерные спектры мкФЛ мез, полученные при комнатной температуре от мез, сформированных из структур MQW и QD, до и после пассивации, представлены на рис. 3. Вследствие низкой добротности, вызванной отсутствием вертикального оптического ограничения, в спектрах не проявляются особенности, связанные с модовой структурой резонатора. Длина волны максимума спектра излучения структуры MQW 850 nm. Длина волны максимума спектра мкФЛ, соответствующая основному переходу в квантовых точках структуры QD, составляла 1280 nm. В результате пассивации интегральная интен-

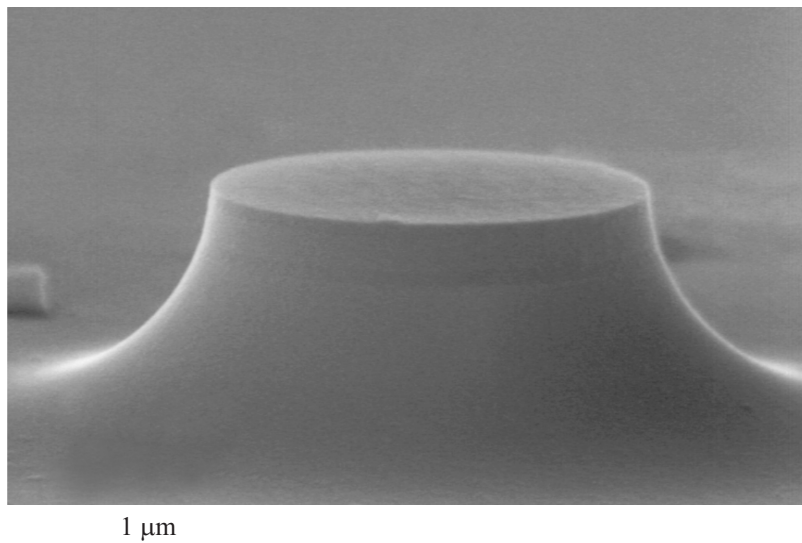


Рис. 2. Полученные методом сканирующей электронной микроскопии микрофотографии мезы диаметром $2.8\ \mu\text{m}$ для структуры QD после пассивации в водном растворе сульфида натрия.

сивность мкФЛ существенно возросла. Так, в приведенном на рис. 3 примере для мезы MQW диаметром $3.7\ \mu\text{m}$ интенсивность выросла в 35 раз, а у мезы QD диаметром $3.9\ \mu\text{m}$ в 3 раза.

На рис. 4 представлены нормированные зависимости интегральной интенсивности мкФЛ от диаметра мез для обоих типов структур до и после пассивации. За единичный уровень сигнала принята интенсивность мкФЛ исходных эпитаксиальных структур MQW и QD, т.е. структур, на которых не проводилось травление мез. Как видно, после формирования мез интенсивность люминесценции в структурах обоих типов уменьшается тем сильнее, чем меньше диаметр мезы, вследствие усиления вклада безызлучательной рекомбинации на боковой поверхности мезы. При этом в структуре с квантовыми точками уменьшение составило от 1.6 раза (в дисках диаметром $D = 6\ \mu\text{m}$) до 9 раз ($D = 2\ \mu\text{m}$). В случае же квантовых ям падение интенсивности было существенно более значительным и составило от 15.6 до 92 раз

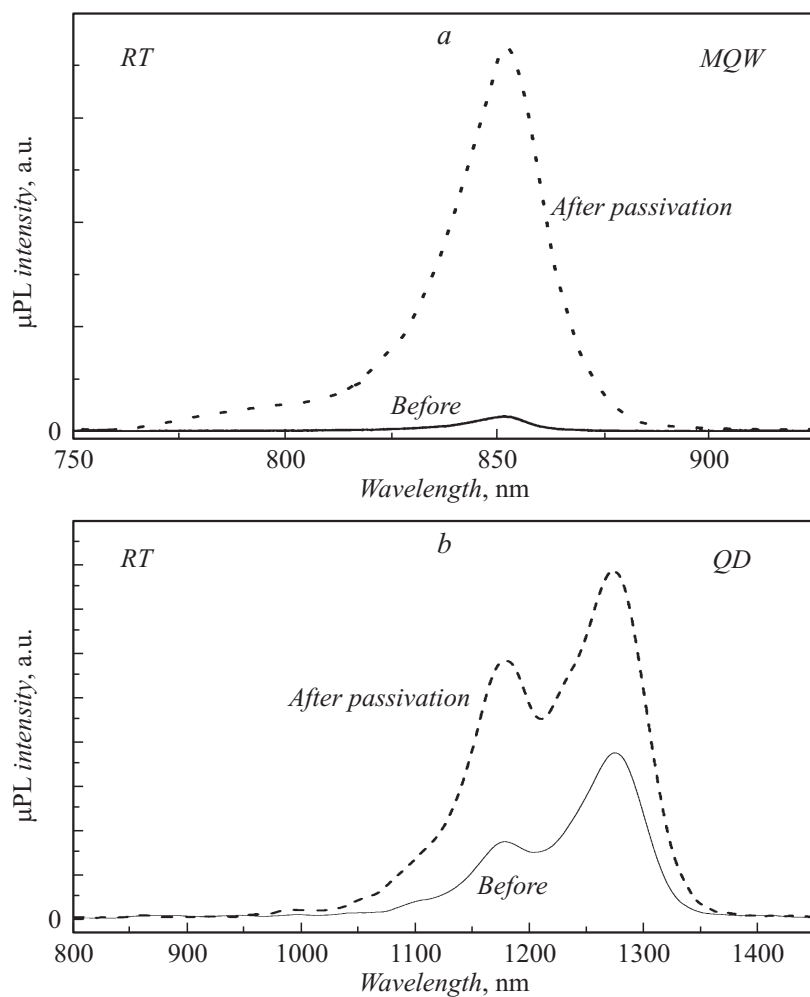


Рис. 3. Спектры мкФЛ, полученные при комнатной температуре от мезы диаметром $3.7\ \mu\text{m}$ структуры MQW (a) и мезы диаметром $3.9\ \mu\text{m}$ структуры QD (b).

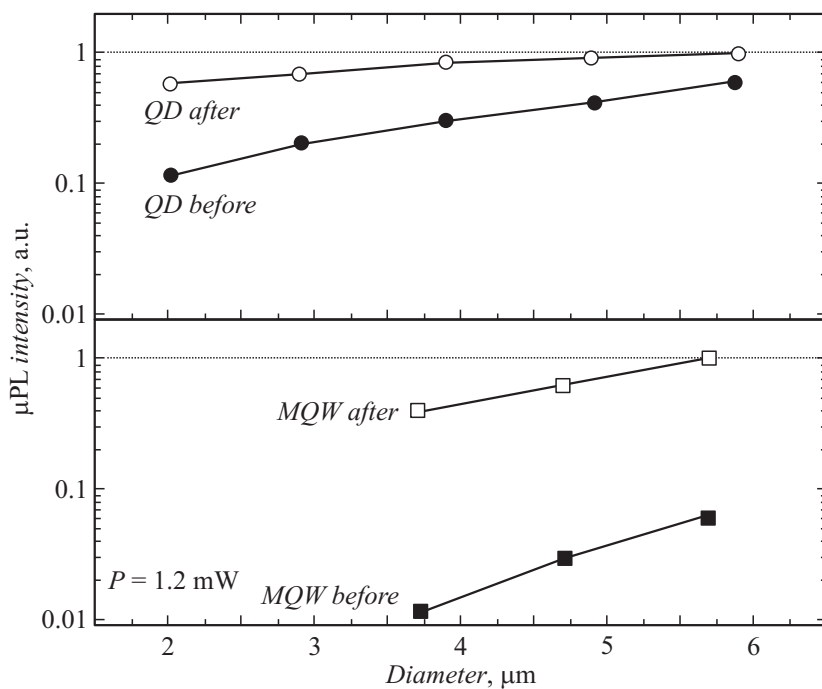


Рис. 4. Зависимости интегральной интенсивности мкФЛ от диаметра мезы для структуры с квантовыми ямами GaAs/AlAs (квадраты) и для структуры с квантовыми точками (круги) до (сплошные символы) и после (открытые символы) пассивации. Интенсивность нормирована на уровень сигнала от исходных эпитаксиальных структур до травления.

в зависимости от диаметра мезы от 5.7 до 3.7 μm . Данное различие является следствием эффективной локализации носителей заряда в квантовых точках. Для использованных в данной работе квантовых точек, обладающих достаточно высокой энергией локализации, большая часть носителей находится в точках, а концентрация носителей в смачивающем слое и матрице GaAs мала. Соответственно мала доля носителей, которые могут диффундировать к боковым стенкам мезы. Известно, что коэффициент диффузии в структурах с квантовыми ямами существенно больше, чем в структурах с квантовыми точками.

Например, в работе [9] оценена длина диффузии $\sim 2.7 \mu\text{m}$ для структур с квантовыми ямами InGaAs/GaAs и $\sim 0.1 \mu\text{m}$ в случае квантовых точек InAs.

В результате пассивации поверхности наблюдается почти полное восстановление интенсивности излучения микродисков с квантовыми точками до 100% для $D \sim 6 \mu\text{m}$ и до 60% для $D \sim 2 \mu\text{m}$. В структурах с квантовыми ямами восстановление до уровня более 60% происходит в микродисках наибольшего диаметра (4.7–5.7 μm). Даже в микродиске с квантовыми ямами диаметром $\sim 3.7 \mu\text{m}$ интегральная интенсивность после пассивации возросла в 35 раз и составила около 40% от уровня исходной эпитаксиальной структуры.

Итак, использованная в данной работе сульфидная пассивация привела к существенному возрастанию интенсивности фотолюминесценции микродисковых мез диаметром от 2 до 6 μm на основе квантовых точек и квантовых ям в системе материалов (AlGaIn)As/GaAs. Этот результат позволяет говорить об уменьшении поверхностной безызлучательной рекомбинации в случае пассивированных микродисковых мез. Показано, что эффект пассивации более сильно проявляется в случае образцов с квантовыми ямами, что обусловлено большей длиной диффузии и меньшей энергией локализации по сравнению с квантовыми точками.

Работа поддержана РФФИ (научные проекты № 15-02-03624, № 13-02-00540), программой ОНИТ РАН.

Список литературы

- [1] *Tamura M., Kojima T., Ando T., Nunoya N., Tamura Sh., Arai S.* // Japanese J. Appl. Phys. 1998. V. 37. P. 6569.
- [2] *Новиков И.И., Гордеев Н.Ю., Карачинский Л.Я., Максимов М.В., Шерняков Ю.М., Ковш А.Р., Крестников И.Л., Кожухов А.В., Михрин С.С., Леденцов Н.Н.* // ФТП. 2005. Т. 39. С. 502–506.
- [3] *Boroditsky M., Gontijo I., Jackson M., Vrijen R., Yablonovitch E., Krauss T., Cheng C.-C., Scherer A., Bhat R., Krames M.* // J. Appl. Phys. 2000. V. 87. P. 3497.
- [4] *Moore S.A., O'Faolain L., Maria Ana Cataluna, Flynn M.B., Kotlyar M.V., Krauss Th.F.* // IEEE Photonics Technology Letters. 2006. V. 18. P. 1861.
- [5] *Maximov M.M., Kryzhanovskaya N.V., Nadtochiy A.M., Moiseev E.I., Shostak I.I., Bogdanov A.A., Sadrieva Z.F., Zhukov A.E., Lipovskii A.A., Karpov D.V., Laukkanen J., Tommila J.* // Nanoscale Res. Lett. 2014. V. 9. P. 657.

- [6] *Semiconductors lasers: optics and photonics* / Ed. by Eli Kapon. London: Academic Press, 1999. 453 p.
- [7] Hobson W.S., Mohideen U., Pearton S.J., Slusher R.E., Ren F. // *Electron. Lett.* 1993. V. 29. P. 2199–2200.
- [8] Hobson W.S., Ren F., Mohideen U., Slusher R.E., Lamont Schnoes M., Pearton S.J. // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 1995. V. 13. P. 642–645.
- [9] Fiore A., Rossetti M., Alloing B., Paranthoen C., Chen J.X., Geelhaar L., Riechert H. // *Phys. Rev. B.* 2004. V. 70. P. 205311-1–205311-12.