

УДК 621.3.049.77

МИКРОРЕЗОНАТОР ДЛЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОДИНОЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

© И. А. ДЕРЕБЕЗОВ^{1,2}, А. В. ГАЙСЛЕР¹, А. Ю. МИРОНОВ¹, В. А. ГАЙСЛЕР¹

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86

Разработана конструкция и методика изготовления микрорезонатора на основе полупроводникового брэгговского отражателя и микролинзы, формируемой в процессе селективного окисления градиентного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Конструкция микрорезонатора обеспечивает высокую внешнюю квантовую эффективность вывода излучения (до 70 %) и высокую эффективность ввода излучения в оптическое волокно. Микрорезонатор может быть использован для создания излучателей одиночных фотонов и излучателей фотонных пар, запутанных по поляризации, на основе одиночных полупроводниковых квантовых точек.

Ключевые слова: полупроводниковые квантовые точки, микрорезонаторы, излучатели одиночных фотонов, излучатели фотонных пар.

DOI: 10.15372/AUT20210510

Введение. Излучатели одиночных фотонов (ИОФ) и излучатели фотонных пар (ИФП), запутанных по поляризации, являются ключевыми элементами разрабатываемых квантовых оптических информационных систем и систем квантовой криптографии [1, 2]. Один из перспективных вариантов практической реализации данных излучателей — использование самоорганизованных полупроводниковых квантовых точек (КТ) [3–7]. На основе одиночных полупроводниковых КТ разрабатываются эффективные полностью твердотельные ИОФ как с оптической, так и с токовой накачкой [8–10]. Одиночные КТ могут быть и излучателем пар запутанных фотонов, что происходит в процессе каскадной рекомбинации биэкситона и экситона в случае, если экситонные состояния вырождены по энергии или же их расщепление ΔE_{FS} не превышает естественной ширины экситонных уровней $\Gamma_x = \hbar/\tau_x$, где τ_x — время жизни экситона [7, 11–14]. В этом случае излучается пара фотонов, запутанных по поляризации [7, 11].

В последние годы исследования в этой области сосредоточены на поисках оптимальных способов получения и позиционирования квантовых точек, на разработке микрорезонаторов, обеспечивающих максимальную внешнюю квантовую эффективность и минимальную расходимость излучения [5–10]. В данной работе описана конструкция и методика изготовления микрорезонатора на основе полупроводникового брэгговского отражателя и микролинзы, формируемой в процессе селективного окисления градиентного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Конструкция микрорезонатора обеспечивает высокую внешнюю квантовую эффективность вывода излучения (до 70 %) и высокую эффективность ввода излучения в оптическое волокно. Микрорезонатор может быть использован для создания излучателей одиночных фотонов и излучателей фотонных пар на основе одиночных полупроводниковых КТ в широкой спектральной области (0,8–1,55 мкм).

Конструкция и характеристики микрорезонатора. Внешняя квантовая эффективность излучателя η_{external} определяется произведением двух множителей:

$$\eta_{\text{external}} = \eta_{\text{internal}} \cdot \eta_{\text{extraction}} \cdot \quad (1)$$

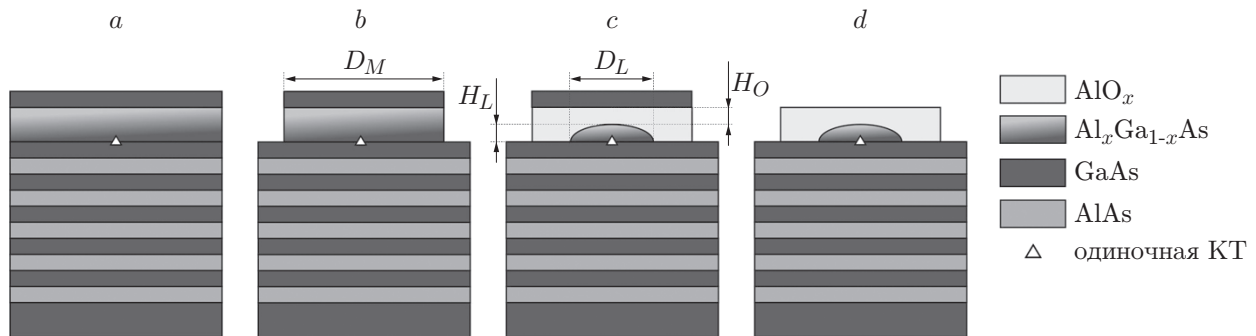


Рис. 1. Стадии изготовления микрорезонатора: исходная структура (а), цилиндрическая меза диаметра D_M (b), структура после процесса селективного окисления градиентного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (c), полностью завершённая структура после удаления защитного слоя GaAs (d)

В совершенных бездефектных полупроводниковых КТ первый сомножитель — внутренняя квантовая эффективность — может достигать $\eta_{\text{internal}} \approx 1$ [4–7]. Таким образом, величина внешней квантовой эффективности ИОФ, ИФП определяется значением коэффициента вывода излучения $\eta_{\text{extraction}}$. При разработке микрорезонатора его конструкция оптимизировалась в целях достижения максимального значения $\eta_{\text{external}} \approx \eta_{\text{extraction}}$. Исходная полупроводниковая структура, используемая для формирования микрорезонатора, выращивается методом молекулярно-лучевой эпитаксии и содержит следующие основные элементы (рис. 1): распределённый брэгговский отражатель (РБО) на основе $\lambda/4$ слоёв GaAs и AlAs, слой InGaAs квантовых точек, слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ переменного состава, подлежащий селективному латеральному окислению, слой GaAs, блокирующий вертикальное окисление градиентного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Распределённый брэгговский отражатель обеспечивает коэффициент отражения на уровне $R \approx 0,99$ для требуемой спектральной области. Однако даже при наличии такого РБО внешняя квантовая эффективность излучателя будет составлять лишь единицы процентов, что задаётся эффектом полного внутреннего отражения (ПВО). Радикальным способом увеличения внешней квантовой эффективности резонатора является формирование микролинзы на его поверхности, что существенно снижает влияние эффекта ПВО.

Основной целью данной работы является оптимизация параметров отдельных слоёв полной излучающей структуры для достижения максимальных значений внешней квантовой эффективности вывода излучения и эффективности ввода излучения в оптическое волокно, а дизайн структуры возможен для реализации излучателей в широком спектральном диапазоне.

В данной работе предлагается методика формирования микролинзы на поверхности излучателя, в основе которой лежит процесс селективного окисления слоёв $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Процесс окисления осуществляется в парах H_2O при $T = 400\text{--}450$ °С, при этом формируется стабильный слой окисла AlO_x . Оксидные слои AlO_x используются в качестве токовой и оптической апертур при изготовлении полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором и в ряде других приборов микроэлектроники [15–18]. Процесс окисления $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ носит ярко выраженный селективный характер, скорость процесса окисления резко падает с уменьшением состава по алюминию x . Так, согласно [16] скорость окисления твёрдого раствора $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$ ($x = 0,9$) на два порядка меньше скорости окисления бинарного AlAs ($x = 1$). Это позволяет при окислении слоёв $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ переменного состава получать необходимые профили, в частности микролинзы (рис. 1). На рис. 1 представлены основ-

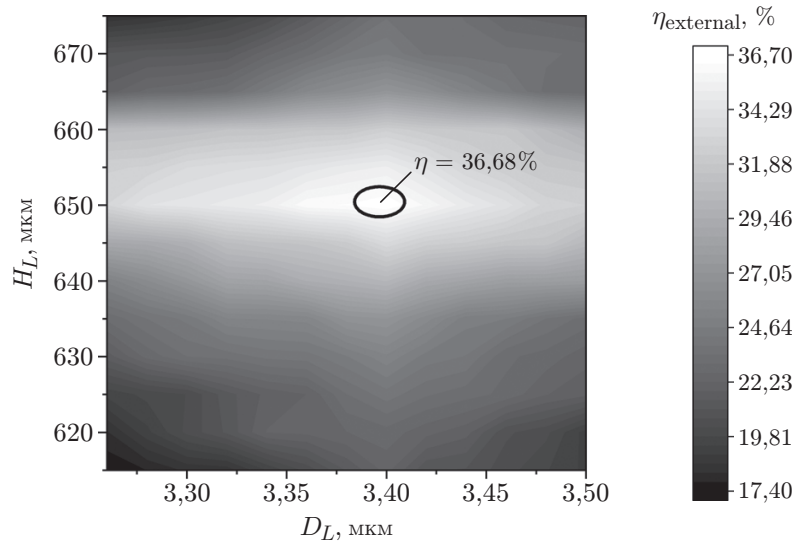


Рис. 2. Зависимость параметра внешней квантовой эффективности η_{external} от диаметра линзы D_L и её высоты H_L

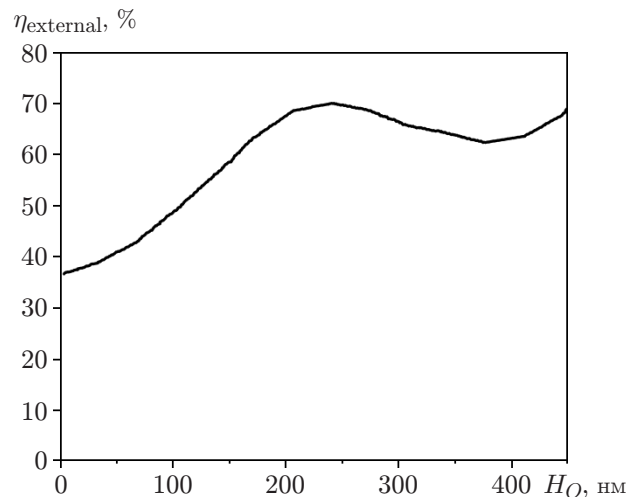


Рис. 3. Зависимость параметра внешней квантовой эффективности η_{external} от толщины AlO_x слоя H_O

ные этапы изготовления микрорезонатора. На исходной структуре (рис. 1, *a*) формируется цилиндрическая меза диаметром D_M (рис. 1, *b*). После чего проводится латеральное селективное окисление слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ переменного состава. В окисляемом слое задаётся градиент по составу от значения $x \approx 0,95$ до $x = 1$. Верхняя часть слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ прокисляется полностью, нижние уровни — частично. При этом формируется микролинза с диаметром основания D_L и высотой H_L , образованная неокисленными участками слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (рис. 1, *c*). Слой окисла AlO_x толщиной H_O , находящийся над микролинзой, выполняет роль просветляющего покрытия. Последний этап изготовления микрорезонатора заключается в удалении верхнего слоя GaAs , который использовался для защиты слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ от вертикального окисления (рис. 1, *d*).

Расчёт характеристик микрорезонатора проводился методом конечных разностей во временной области с использованием программы МЕЕР [19]. Квантовая точка задавалась как точечный дипольный источник. Далее представлены результаты расчётов характе-

ристик микрорезонатора, оптимизированного для спектральной области 1,3 мкм. Микрорезонатор содержит РБО, образованный 25 периодами чередующихся $\lambda/4$ слоёв GaAs и AlAs, что обеспечивает на заданной длине волны коэффициент отражения $R > 0,99$.

Рис. 2 содержит результаты расчётов параметра внешней квантовой эффективности η_{external} для микролинз $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ различного размера, расчёты проводились без учёта просветляющего слоя AlO_x . На рисунке видно, что оптимальный размер микролинзы $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ составляет $D_L = 3,4$ мкм и $H_L = 0,65$ мкм, при этом достигается наибольшее значение внешней квантовой эффективности $\eta_{\text{external}} = 36$ %.

На рис. 3 приведены результаты расчёта η_{external} микрорезонатора с микролинзой указанного размера для различных толщин AlO_x слоя H_O . Оксидный слой AlO_x эффективно выполняет функцию просветляющего покрытия, параметр внешней квантовой эффективности значительно возрастает и достигает максимума $\eta_{\text{external}} = 70$ % при толщине $H_O \approx 240$ нм.

Проведена оценка параметра эффективности ввода излучения в оптическое волокно η_{fiber} . Для одномодового оптического волокна с $NA = 0,35$ эффективность ввода составляет $\eta_{\text{fiber}} = 25$ %.

Заключение. Таким образом, разработана конструкция и методика изготовления микрорезонатора на основе полупроводникового брэгговского отражателя и микролинзы, формируемой в процессе селективного окисления градиентного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Конструкция микрорезонатора обеспечивает высокую внешнюю квантовую эффективность вывода излучения (до 70 %) и высокую эффективность ввода излучения в оптическое волокно. Микрорезонатор может быть использован для создания излучателей одиночных фотонов и излучателей фотонных пар, запутанных по поляризации, на основе одиночных полупроводниковых квантовых точек.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-72-10056).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H.** Quantum cryptography // Rev. Modern Phys. 2002. **74**, N 1. P. 145–195.
2. **Bouwmeester D., Ekert A. K., Zeilinger A.** The Physics of Quantum Information. Berlin: Springer, 2000. 314 p.
3. **Bimberg D., Grundmann M., Ledentsov N.** Quantum Dot Heterostructures. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 328 p.
4. **Semiconductor Nanostructures** /Ed. D. Bimberg. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 357 p.
5. **Single Quantum Dots, Fundamentals, Applications and New Concepts** /Ed. P. Michler. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 347 p.
6. **Self-Assembled Quantum Dots** /Ed. Z. M. Wang. N. Y.: Springer Science+Business Media, LLC, 2008. 463 p.
7. **Single Semiconductor Quantum Dots** /Ed. P. Michler. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 389 p.
8. **Lochmann A., Stock E., Schulz O. et al.** Electrically driven single quantum dot polarised single photon emitter // Electron. Lett. 2009. **45**, N 13. P. 566–567.
9. **Bimberg D., Stock E., Lochmann A. et al.** Quantum dots for single — and entangled — photon emitters // IEEE Photon. Journ. 2009. **1**, N 1. P. 58–68.
10. **Heindel T., Kessler C., Rau M. et al.** Quantum key distribution using quantum dot single — photon emitting diodes in the red and near infrared spectral range // New Journ. Phys. 2012. **14**. 083001.

11. **Benson O., Santori C., Pelton M., Yamamoto Y.** Regulated and entangled photons from a single quantum dot // Phys. Rev. Lett. 2000. **84**, N 11. P. 2513–2516.
12. **Stevenson R. M., Young R. J., Atkinson P. et al.** A semiconductor source of triggered entangled photon pairs // Nature. 2006. **439**. P. 179–182.
13. **Mohan A., Felici M., Gallo P. et al.** Polarization-entangled photons produced with high-symmetry site-controlled quantum dots // Nature Photon. 2010. **4**. P. 302–306.
14. **Stevenson R. M., Salter C. L., Nilsson J. et al.** Indistinguishable entangled photons generated by a light-emitting diode // Phys. Rev. Lett. 2012. **108**, N 4. 040503.
15. **Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Design, Fabrication, Characterization and Application** /Eds. C. W. Wilmsen, H. Temkin, L. Coldren. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 455 p.
16. **Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Technology and Applications** /Eds. J. Cheng, N. K. Dutta. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2000. 323 p.
17. **Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Devices** /Eds. H. E. Li, K. Iga. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 386 p.
18. **VCSELS: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers** /Ed. R. Michalzik. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 558 p.
19. **Oskooi A., Roundy D., Ibanescu M. et al.** MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method // Comput. Phys. Commun. 2010. **181**. P. 687–702.

Поступила в редакцию 22.04.2021

После доработки 10.05.2021

Принята к публикации 10.05.2021
