

УДК 621.3.049.77

ИЗЛУЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БРЭГГОВСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ

В. А. Гайслер, И. А. ДЕРЕБЕЗОВ, А. И. ТОРОПОВ, И. И. РЯБЦЕВ

Учреждение Российской академии наук

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13*

E-mail: derebezov@thermo.isp.nsc.ru

Представлен краткий обзор результатов разработки двух типов полупроводниковых излучателей на основе полупроводниковых брэгговских микрорезонаторов. Первый тип излучателя — это лазер с вертикальным резонатором на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Лазер демонстрирует устойчивый одномодовый режим генерации на длине волны 795 нм, что открывает перспективы его использования в миниатюрных атомных стандартах частоты на основе Rb^{87} . Второй тип — излучатель одиночных фотонов на основе полупроводниковых квантовых точек. Разработана конструкция такого излучателя на базе полупроводникового брэгговского микрорезонатора, обеспечивающая высокий уровень внешней квантовой эффективности излучателя (до 80 %) и высокое быстродействие за счёт эффекта Пурселла.

Ключевые слова: лазер с вертикальным резонатором, миниатюрный атомный стандарт частоты, излучатель одиночных фотонов.

Введение. В последние годы прогресс в развитии полупроводниковых излучателей в значительной степени определяется разработкой и созданием приборов на основе брэгговских микрорезонаторов. Лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР) являются ярким примером высших достижений в области оптоэлектроники. Рекордные результаты, полученные на ЛВР [1, 2] по параметрам: пороговый ток, частота токовой модуляции и расходимость излучения, открывают принципиально новые возможности по применению полупроводниковых излучателей и стимулируют дальнейшие исследования в этой области. В данной работе представлены результаты исследования генерационных характеристик ЛВР, пригодных для использования в миниатюрных атомных стандартах частоты нового поколения, имеющих предельную относительную нестабильность частоты порядка 10^{-10} – 10^{-12} .

Абсолютным пределом миниатюризации светоизлучающих приборов является разработка и создание излучателя одиночных фотонов (ИОФ). Эффективные ИОФ — важнейший элемент систем квантовой криптографии и квантовых вычислений, они также представляют большой интерес для создания прецизионного спектрального оборудования и эталонов оптической мощности [3, 4].

Цель данной работы — представить конструкцию ИОФ с токовой накачкой на основе одиночной InAs квантовой точки, заключённой в брэгговский микрорезонатор, который обеспечивает высокую внешнюю эффективность излучателя, а также увеличивает его быстродействие.

Конструкция и характеристики лазера с вертикальным резонатором. Конструкция ЛВР проектировалась исходя из требований, предъявляемых к излучателю для миниатюрного атомного стандарта частоты:

- 1) строго заданная длина волны (795 нм), соответствующая переходу $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ атомов Rb^{87} , и возможность точной подстройки длины волны лазера под данный резонанс;
- 2) линейно поляризованное излучение и устойчивый одномодовый режим генерации на фундаментальной продольной моде TEM_{00} ;

3) минимальные пороговые и рабочие токи (~ 1 мА) при выходной мощности в одномодовом режиме $\sim 0,1$ мВт.

Расчёт оптических характеристик разрабатываемого ЛВР производился с использованием одномерной модели характеристических матриц [5, 6] и строгой трёхмерной модели собственных мод SAMFR [7]. Лазер представляет собой многослойную полупроводниковую структуру на основе твёрдого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, включающую в общей сложности 1156 слоёв раствора различного состава. Два полупроводниковых брэгговских зеркала образуют резонатор лазера. Между зеркалами расположены полупроводниковые слои суммарной толщиной λ с активной областью лазера, содержащей три нелегированные $\text{Al}_{0,07}\text{Ga}_{0,93}\text{As}$ квантовые ямы, которые размещены вблизи максимума стоячей электромагнитной волны лазерного микрорезонатора. Инжекция носителей заряда в активную область осуществляется через верхнее выходное полупроводниковое зеркало p -типа легирования и нижнее зеркало n -типа легирования. В лазере используется оксидная апертура AlGaO_x , формирующаяся в процессе селективного окисления слоя $\text{Al}_{0,98}\text{Ga}_{0,02}\text{As}$ [8]. Кольцо окисла AlGaO_x располагается непосредственно над активной областью и обеспечивает эффективное токовое и оптическое ограничение в ЛВР. Размер апертуры A , задаваемый внутренним диаметром оксидного кольца, при проведении расчётов и в эксперименте варьировался в интервале от 1 до 10 мкм с шагом 1 мкм.

Моделирование характеристик ЛВР показало, что устойчивый одномодовый режим работы будут демонстрировать ЛВР с диаметром оксидной апертуры $A \leq 5$ мкм.

Исходная лазерная структура выращивалась на установке молекулярно-лучевой эпитаксии "Riber C21" (Франция) на подложках n -GaAs ориентации (001) диаметром 76 мм. Выращиванию полной лазерной структуры предшествовали тщательные калибровки скоростей роста слоёв $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, обеспечивающие точность задания толщин слоёв не хуже 1 %. Синтез полной лазерной структуры проводился с вращением подложки, что задавало наилучшую однородность толщин слоёв по площади структуры.

Результаты исследования генерационных характеристик изготовленных ЛВР представлены на рис. 1. При $T = 295$ К лазеры характеризуются низким уровнем порогового тока I_{th} , который варьируется в интервале от 150 до 800 мкА в зависимости от диаметра лазерной апертуры (рис. 1, *a*). Квантовая эффективность изготовленных ЛВР составляет 0,3–0,4 мкВт/мкА. Исследование спектральных характеристик (рис. 1, *b, c*) показало, что лазеры с $A \leq 5$ мкм демонстрируют устойчивый одномодовый режим генерации во всём анализируемом диапазоне тока накачки (0–1,5 мА), лазеры с $A = 6$ мкм работают в одномодовом режиме лишь при небольшом превышении порогового тока ($I = 720$ мкА, $P = 124$ мкВт), наконец, лазеры с большей апертурой при любых уровнях накачки работают в многомодовом режиме. Полученные экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с расчётными результатами. На рис. 1, *b* показан спектр излучения ЛВР с $A = 4$ мкм, работающего в одномодовом режиме на длине волны 795,00 нм с выходной мощностью 219 мкВт при $I = 900$ мкА. Максимальная мощность излучения данного ЛВР составляет ~ 350 мкВт при токе 1,5 мА.

Точная подстройка длины волны ЛВР под рабочий переход $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ атомов Rb^{87} может осуществляться за счёт изменения внешней температуры и уровня инжекции, который также меняет температурный режим работы лазера. На рис. 1, *d* приведены результаты исследования перестройки длины волны лазерного излучения с $A = 4$ мкм при изменении тока инжекции и температуры. Температурный коэффициент изменения длины волны лазерного излучения составляет $d\lambda/dT = 0,059$ нм/град, что находится в хорошем соответствии с данными [8].

Конструкция и характеристики излучателя одиночных фотонов. ИОФ является источником однофотонных фоковских состояний и может быть реализован лишь

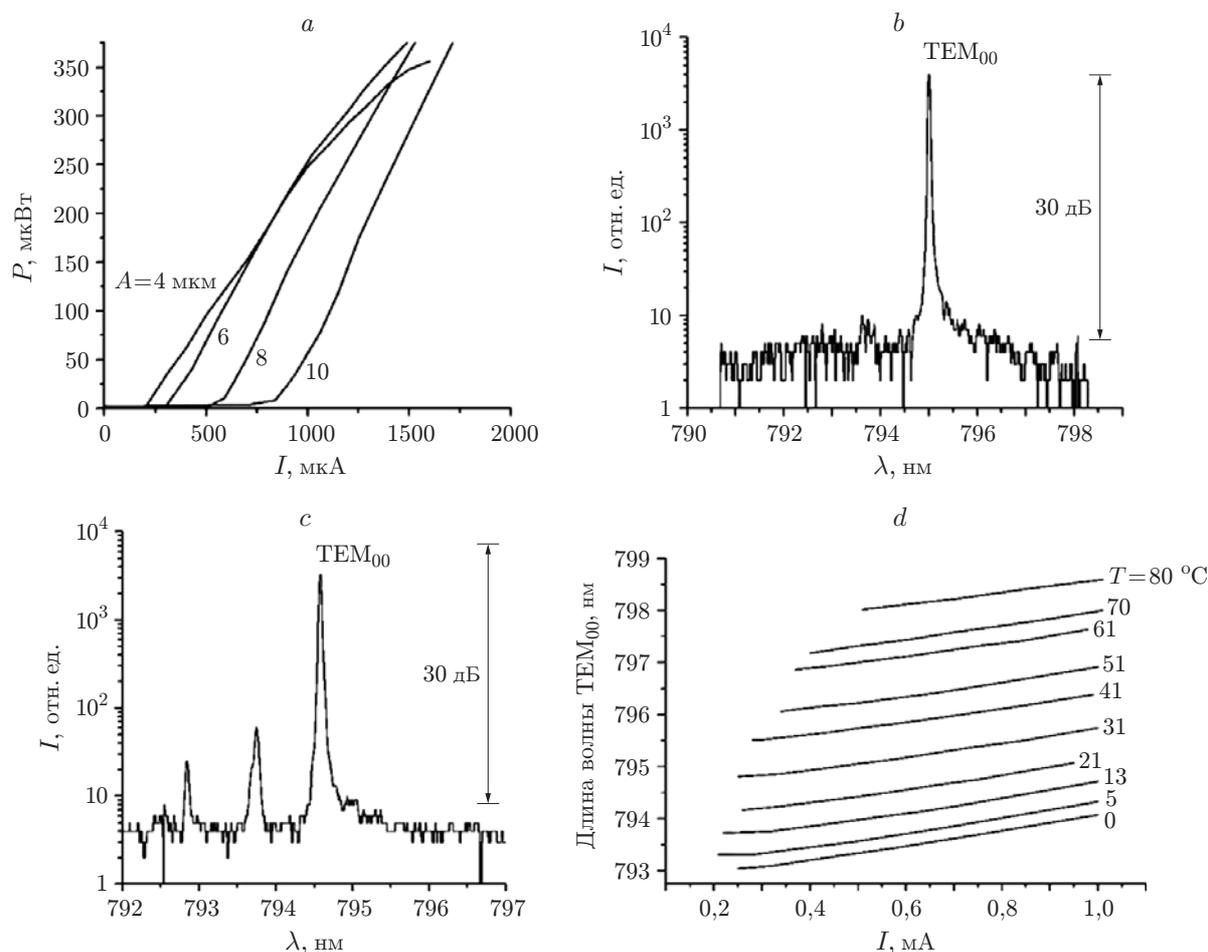


Рис. 1. Характеристики ЛВР: семейство ватт-амперных характеристик для ЛВР с различными значениями оксидной апертуры A (a), спектр излучения ЛВР с $A = 4$ мкм (b) и с $A = 6$ мкм (c), зависимости длины волны ЛВР от уровня инжекции и температуры (d)

на основе изолированных квантовых систем, таких как одиночный атом, молекула, центр окраски или «искусственный» атом — одиночная квантовая точка [4, 9]. Приборная реализация эффективных ИОФ относится к числу наиболее сложных задач нанотехнологии, для её выполнения необходимо:

- 1) локализовать квантовую систему;
- 2) эффективно накачать её;
- 3) эффективно собрать и вывести излучение.

Все перечисленные проблемы принципиально разрешимы с использованием современных полупроводниковых технологий, позволяющих интегрировать одиночную полупроводниковую квантовую точку в полупроводниковый микрорезонатор. В последние годы исследования в этой области сосредоточены на поисках оптимальных технологий получения и позиционирования квантовых точек, разработке наиболее эффективных способов накачки полупроводниковых квантовых точек и конструкции микрорезонатора, обеспечивающего максимальную внешнюю квантовую эффективность излучения.

Уникальной особенностью ИОФ на основе полупроводниковых квантовых точек является возможность токовой накачки [4, 10–12], что позволяет делать излучатель значительно более миниатюрным и существенно снижает его стоимость. Излучатель представляет собой *pin*-диод, включающий в себя слой квантовых точек InAs малой плотности d и то-

ковую оксидную апертуру субмикронного размера A , получаемую методом селективного окисления слоёв AlGaAs [8]. В случае, если выполняется равенство $A \sim d^{-1/2}$, на токовую апертуру в среднем приходится лишь одна квантовая точка, что и позволяет осуществлять её токовое возбуждение.

Важнейший параметр ИОФ — внешняя квантовая эффективность. В однофотонных излучателях на основе полупроводниковых квантовых точек с токовой накачкой внешняя квантовая эффективность может быть существенно увеличена за счёт использования полупроводниковых брэгговских микрорезонаторов. Схема такого прибора приведена на рис. 2. Конструкция излучателя в значительной степени совпадает с конструкцией лазера с вертикальным резонатором [8]. Токовое возбуждение осуществляется через легированные полупроводниковые брэгговские зеркала на основе GaAs/AlGaAs, токовая оптическая апертура излучателя задаётся оксидным кольцом AlGaO с внутренним диаметром A . Толщина апертурного слоя AlGaO составляет $\sim \lambda/4$. В аксиальном направлении микрорезонатора локализация энергии электромагнитного поля задаётся брэгговскими зеркалами GaAs/AlGaAs, эффективная локализация в латеральном направлении обеспечивается оксидным апертурным кольцом AlGaO с низким показателем преломления: $n \sim 1,6$ (см. рис. 2).

Внешняя квантовая эффективность излучателя η_{extern} определяется произведением трёх сомножителей: $\eta_{\text{extern}} = \eta_{\text{inject}}\eta_{\text{intern}}\eta_{\text{extract}}$. В совершенных бездефектных структурах два первых сомножителя — эффективность инжекции и внутренняя квантовая эффективность квантовой точки — могут достигать ~ 1 . Таким образом, величина внешней квантовой эффективности ИОФ определяется значением коэффициента вывода излучения η_{extract} . При разработке микрорезонатора его конструкция оптимизировалась в целях достижения максимального значения $\eta_{\text{extern}} \sim \eta_{\text{extract}}$ фундаментальной моды. Были проведены расчёты основных характеристик моды, таких как частота ω_{cav} , распределение электрических и магнитных полей, распределение потока электромагнитной энергии (вектор Пойнтинга), добротность микрорезонатора Q , объём V , частота осцилляции Раби Q_R и фактор Пурселла F_P [4]. Внешняя квантовая эффективность излучателя рассчитывалась следующим образом: $\eta_{\text{extern}} \approx \eta_{\text{extract}} = \beta_{\text{coupl}}\eta_{\text{conf}}$, здесь β_{coupl} — эффективность связи фо-

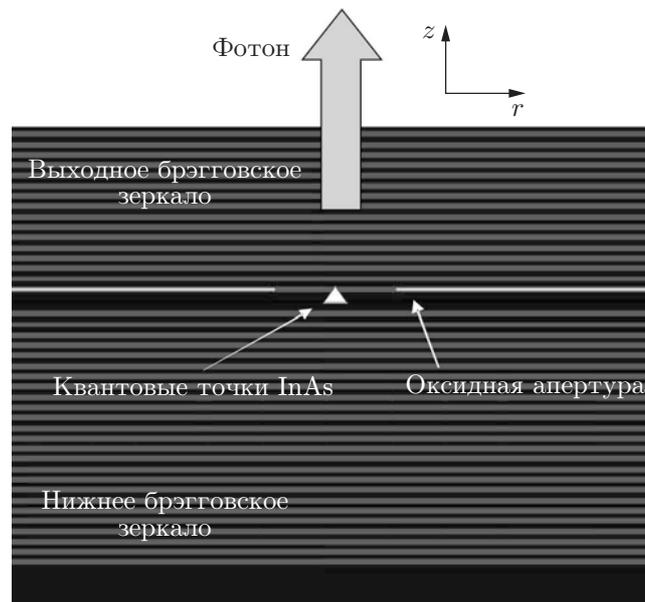


Рис. 2. Схема ИОФ на основе квантовых точек и брэгговского микрорезонатора

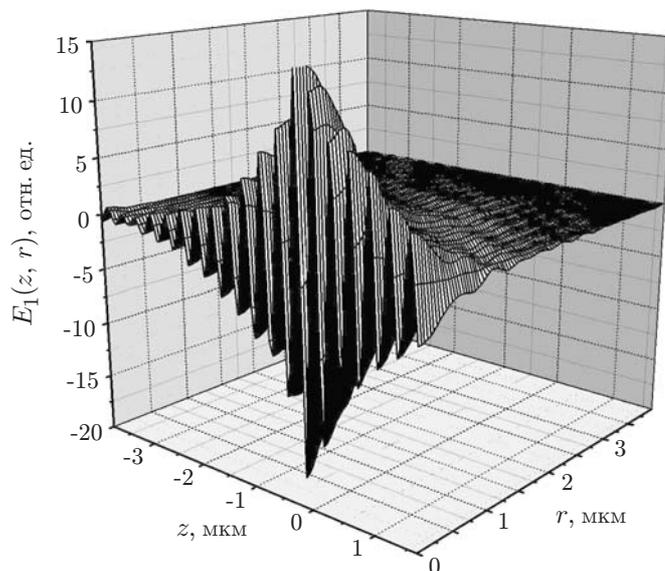


Рис. 3. Распределение поперечной составляющей электрического поля $E_1(z, r)$ фундаментальной моды в пределах брэгговского микрорезонатора, при диаметре оксидной апертуры $A = 1$ мкм объём фундаментальной моды составляет $V \sim 10\lambda^3$

тона с фундаментальной модой, которая определяется фактором Пурселла; η_{conf} — конфигурационный параметр фундаментальной моды, задающий отношение мощности потока, формирующего выходной сигнал излучателя, к суммарной мощности потерь в микрорезонаторе. На основании результатов расчётов были определены оптимальные конфигурации микрорезонаторов, обеспечивающие высокую внешнюю квантовую эффективность ИОФ. Для брэгговских микрорезонаторов, образованных отражателями, содержащими 10 и 25 периодов четвертьволновых слоёв GaAs/AlGaAs соответственно в верхнем и нижнем зеркалах, добротность для фундаментальной моды составляет $Q \sim 10^3$, и этот параметр несущественно зависит от диаметра оксидной апертуры A . Объём фундаментальной моды V для данного типа микрорезонатора существенно зависит от размера оксидной аперту-

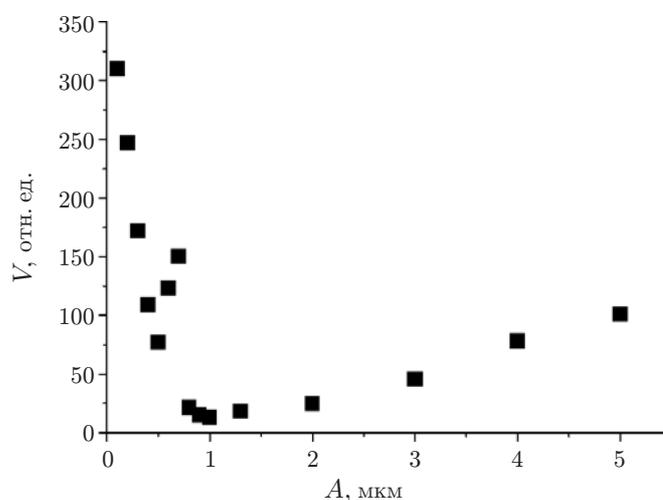


Рис. 4. Зависимость объёма фундаментальной моды V микрорезонатора (в единицах λ^3) от диаметра оксидной апертуры A

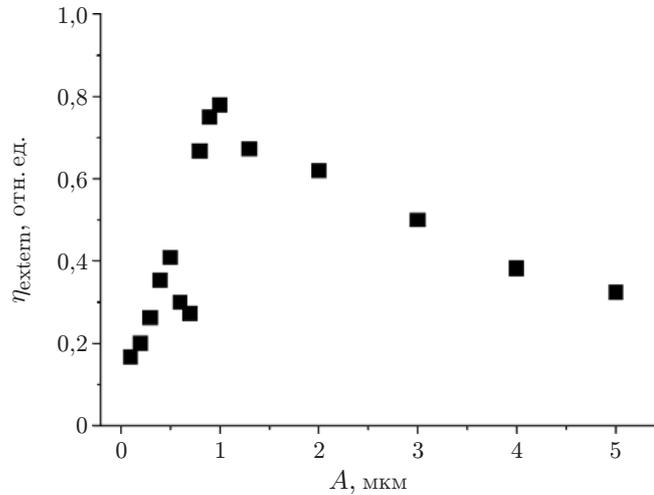


Рис. 5. Зависимость параметра внешней квантовой эффективности ИОФ η_{extern} от диаметра оксидной апертуры A

ры A , причём эта зависимость немонотонна (рис. 3, 4). С уменьшением размера оксидной апертуры снижается латеральный размер моды и её объём уменьшается. Однако при очень малых значениях $A < \lambda$ оксидная апертура уже не обеспечивает эффективную локализацию энергии моды в латеральном направлении, в этой области с уменьшением A объём моды возрастает (см. рис. 4). Минимальное значение объёма фундаментальной моды равно $V_{\text{min}} \sim 0,25 \text{ мкм}^3$, или $V_{\text{min}} \sim 10\lambda^3$. Оно достигается при диаметре оксидной апертуры $A = 1 \text{ мкм}$. Максимальное значение фактора Пурселла ($F_{\text{P}} \approx 5$) соответствует минимуму модового объёма и также достигается при $A = 1 \text{ мкм}$. При $F_{\text{P}} = 5$ время спонтанной эмиссии экситона в InAs квантовой точке уменьшается в 5 раз и составляет $\sim 0,2 \text{ нс}$, что открывает перспективы создания ИОФ с быстродействием $\sim 5 \text{ ГГц}$.

За счёт наибольшего значения фактора Пурселла при $A = 1 \text{ мкм}$ параметр β_{coupl} также имеет максимум при $A = 1 \text{ мкм}$: $\beta_{\text{coupl}} = 0,83$. Конфигурационный параметр η_{conf} несущественно зависит от диаметра оксидной апертуры: при $A = 1 \text{ мкм}$ $\eta_{\text{conf}} = 0,95$. Итоговая зависимость внешней квантовой эффективности излучателя η_{extern} от диаметра оксидной апертуры A приведена на рис. 5. Как видно из рисунка, параметр внешней квантовой эффективности однофотонного излучателя может достигать высоких значений: при $A = 1 \text{ мкм}$ он составляет $\eta_{\text{extern}} \sim 0,8$.

Подобная конструкция ИОФ была реализована в работе [13], где добротность микрорезонатора $Q = 120$, что обеспечивало внешнюю квантовую эффективность $\eta_{\text{extern}} \approx 0,3$ и фактор Пурселла $F_{\text{P}} \approx 2$. Излучатель генерирует одиночные поляризованные фотоны с рекордно высокой частотой повторения до 1 ГГц с вероятностью излучения двух фотонов, близкой к нулю ($g^2(0) = 0$). Разработанный излучатель относится к числу первых приборов полупроводниковой оптоэлектроники, принцип работы которых основан на эффектах квантовой электродинамики резонаторов, в данном случае на эффекте Пурселла, вследствие которого время жизни экситона в квантовой точке снижается примерно в 2 раза, что позволяет в 2 раза поднять быстродействие излучателя.

Заключение. В предлагаемой работе представлены результаты исследования лазеров с вертикальным резонатором, оптимизированных на работу в одномодовом режиме с длиной волны 795 нм, соответствующей переходу $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ атомов Rb⁸⁷. Совокупность представленных экспериментальных результатов (устойчивый одномодовый режим работы с выходной мощностью до 350 мВт при малых рабочих токах $\sim 1,5 \text{ мА}$, длина

волны 795 нм и возможность её точной подстройки за счёт изменения температуры и тока инжекции) демонстрирует большие возможности применения созданных лазеров в миниатюрных атомных стандартах частоты.

Данные расчётов позволяют существенно увеличить параметр внешней квантовой эффективности однофотонных излучателей с токовой накачкой при использовании полупроводниковых брэгговских микрорезонаторов. Практическая реализация таких излучателей с эффективностью на уровне 80 % откроет новые возможности в разработке систем квантовой криптографии квантовых вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Надточий А. М., Блохин С. А., Мутиг А. и др.** Быстродействие вертикально-излучающих AlGaAs-лазеров с активной средой на основе субмонослойных внедрений InAs // Физика и техника полупроводников. 2011. **45**, вып. 5. С. 688–693.
2. **Haisler V. A., Tоропов A. I., Bakarov A. K. et al.** Ultralow-threshold cryogenic vertical-cavity surface-emitting laser with AlAs oxide–GaAs distributed Bragg reflectors // Journ. Appl. Phys. 2004. **96**, N 3. P. 1289–1292.
3. **Bouwmeester D., Ekert A., Zeilinger A.** The physics of quantum information: Quantum cryptography, quantum teleportation, quantum computation. Berlin — Heidelberg — New York: Springer-Verlag, 2001. 314 p.
4. **Michler P.** Single quantum dots: Fundamentals, applications and new concepts. Berlin — Heidelberg — New York: Springer-Verlag, 2003. 352 p.
5. **Yeh P.** Optical waves in layered media. Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 1991. 419 p.
6. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
7. **Bienstman P., Baets R., Vukusic J. et al.** Comparison of optical VCSEL models on the simulation of oxide-confined devices // IEEE Journ. Quant. Electron. 2001. **37**, N 12. P. 1618–1631.
8. **Li H. E., Iga K.** Vertical-cavity surface-emitting lasers devices. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 385 p.
9. **Grundmann M.** The physics of semiconductors: An introduction including devices and nanophysics. Berlin — Heidelberg — New York: Springer-Verlag, 2006. 701 p.
10. **Lochmann A., Stock E., Schulz O. et al.** Electrically driven single quantum dot polarised single photon emitter // Electron. Lett. 2006. **42**, N 13. P. 774–775.
11. **Lochmann A., Stock E., Schulz O. et al.** Electrically driven quantum dot single photon source // Phys. Status Solidi C. 2007. **4**, N 2. P. 547–550.
12. **Scholz M., Büettner S., Benson O. et al.** Non-classical light emission from a single electrically driven quantum dot // Opt. Express. 2007. **15**, N 15. P. 9107–9112.
13. **Lochmann A., Stock E., Tofflinger J. et al.** Electrically pumped, micro-cavity based single photon source driven at 1 GHz // Electron. Lett. 2009. **45**, N 11. P. 566–567.

Поступила в редакцию 15 июля 2011 г.