

УДК 621.3.049.77

ОДНОМОДОВЫЕ ЛАЗЕРЫ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РЕЗОНАТОРОМ ДЛЯ МИНИАТЮРНЫХ АТОМНЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

И. А. Дерезов, В. А. Гайслер, А. К. Бакаров, А. К. Калагин,
А. И. Торопов, М. М. Качанова, Т. А. Гаврилова, А. С. Медведев,
Л. А. Ненашева, В. М. Шаяхметов, О. И. Семенова,
К. В. Грачев, В. К. Сандырев, Д. Б. Третьяков,
И. И. Бетеров, В. М. Энтин, И. И. Рябцев

*Институт физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: derebezov@thermo.isp.nsc.ru*

Разработан полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором на основе твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$. Лазеры демонстрируют устойчивый одномодовый режим генерации на длине волны 795 нм, что открывает перспективы их использования в миниатюрных атомных стандартах частоты нового поколения.

Ключевые слова: лазер с вертикальным резонатором, цезий, рубидий, миниатюрный атомный стандарт частоты.

Введение. Полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР) [1–4] являются одним из ключевых элементов современных и перспективных оптических информационных систем, что обусловлено уникальными характеристиками данного типа излучателей. ЛВР является наиболее миниатюрным (объем резонатора — единицы кубических микрометров), экономичным (пороговые и рабочие токи — единицы миллиампер) и быстродействующим (частота токовой модуляции — десятки гигагерц) полупроводниковым лазерным излучателем, разработанным к настоящему времени.

Перечисленные выше характеристики ЛВР как нельзя лучше соответствуют требованиям, предъявляемым к излучателям в миниатюрных атомных стандартах частоты нового поколения [5–9]. Имеющиеся атомные стандарты частоты основаны на резонансных лампах, излучающих на частоте оптических переходов в атомах Rb и Cs и на поглощающих ячейках в СВЧ-резонаторе, настроенном на частоту перехода между подуровнями сверхтонкой структуры основного состояния этих атомов. Такие устройства имеют значительный вес (единицы килограммов), размеры (единицы кубических дециметров), энергопотребление (десятки ватт) и также высокую стоимость, поэтому они не получили широкого распространения в стандартных приборах и устройствах.

В миниатюрных атомных стандартах частоты резонансные лампы заменены мало-мощными высокостабильными ЛВР. Для получения опорного сигнала используется малогабаритная поглощающая ячейка в магнитном экране, а микроволновый резонатор исключен вообще. Ток инжекции лазерного диода, излучающего на оптической частоте ω_L , модулируется СВЧ-генератором на частоте f , в результате чего в спектре лазера возникают боковые частоты $(\omega_L - f)$ и $(\omega_L + f)$. Эти частоты индуцируют оптические переходы из двух сверхтонких подуровней основного состояния атомов в общее возбужденное состояние. При перестройке частоты генератора в сигнале поглощения возникает узкий интерференционный резонанс когерентного пленения населенностей, который может быть использован для стабилизации частоты СВЧ-генератора с относительной точностью до

10^{-10} – 10^{-12} . Это открывает перспективы создания нового класса атомных стандартов с малым весом (десятки граммов), размерами (единицы кубических сантиметров) и малым энергопотреблением (десятки милливатт), что позволит существенно улучшить характеристики большого числа телекоммуникационных и навигационных устройств.

Целью данной работы является численное моделирование и исследование генерационных характеристик экспериментальных образцов одномодовых ЛВР с длиной волны 795 нм, перспективных для использования в миниатюрных атомных стандартах частоты, работающих на переходах $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ атомов Rb^{87} .

1. Конструкция и характеристики лазеров с вертикальным резонатором. Конструкция ЛВР разрабатывалась исходя из требований, предъявляемых к излучателю миниатюрного атомного стандарта частоты:

- а) 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;
- б) линейно поляризованное излучение, устойчивый одномодовый режим генерации на фундаментальной продольной моде TEM_{00} ;
- в) минимальные пороговые и рабочие токи (~ 1 мА) при выходной мощности в одномодовом режиме $\sim 0,1$ мВт.

Для расчета оптических характеристик разрабатываемого ЛВР использовались одномерная модель характеристических матриц [10, 11] и строгая трехмерная модель собственных мод SAMFR [12]. Схема лазера показана на рис. 1, *a*. Лазер представляет собой многослойную полупроводниковую структуру на основе твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$, содержащую в общей сложности 1156 слоев $Al_xGa_{1-x}As$ различного состава. Два полупроводниковых брэгговских зеркала образуют резонатор лазера. Между брэгговскими зеркалами лазера расположены полупроводниковые слои суммарной толщиной λ , содержащие активную область лазера. Активная область ЛВР содержит три нелегированные $Al_{0,07}Ga_{0,93}As$ квантовые ямы толщиной 8 нм, которые размещены вблизи максимума стоячей электромагнитной волны лазерного микрорезонатора (рис. 1, *b*, *c*). 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 $AlGaO_x$, которая формируется в процессе селективного окисления слоя $Al_{0,98}Ga_{0,02}As$ толщиной 49 нм [2–4]. Кольцо окисла $AlGaO_x$ располагается непосредственно над активной областью и обеспечивает эффективное токовое и оптическое ограничение в ЛВР [2–4]. Размер апертуры *A*, задаваемый внутренним диаметром оксидного кольца, при проведении расчетов и в эксперименте варьировался в интервале от 1 до 10 мкм с шагом 1 мкм.

Период брэгговских зеркал состоит из $\sim \lambda/4$ слоев $Al_{0,94}Ga_{0,06}As$ и $Al_{0,23}Ga_{0,77}As$, на границах которых располагаются интерфейсные вставки, образованные тонкими (2 нм) слоями $Al_xGa_{1-x}As$ переменного состава. Интерфейсные вставки используются для снижения омического сопротивления брэгговских зеркал. Верхнее брэгговское зеркало содержит 28 периодов, а нижнее — 35,5 периода, что задает высокий уровень коэффициентов отражения зеркал (99,79 и 99,93 % соответственно, расчет произведен с использованием одномерной модели с учетом поглощения на свободных носителях заряда). Это обеспечивает высокую добротность микрорезонатора, низкий уровень порогового усиления, низкий уровень пороговых и рабочих токов ЛВР. На рис. 1, *d* приведен спектр отражения полной лазерной структуры, демонстрирующий резонансную длину волны лазера 795 нм.

Результаты расчета характеристик лазерной структуры с использованием трехмерной модели представлены на рис. 2. С уменьшением размера оксидной апертуры *A* сокращается латеральный размер моды, сокращение объема моды приводит к коротковолновому смещению резонансной длины волны лазера. Этот эффект продемонстрирован на рис. 2, *a*.

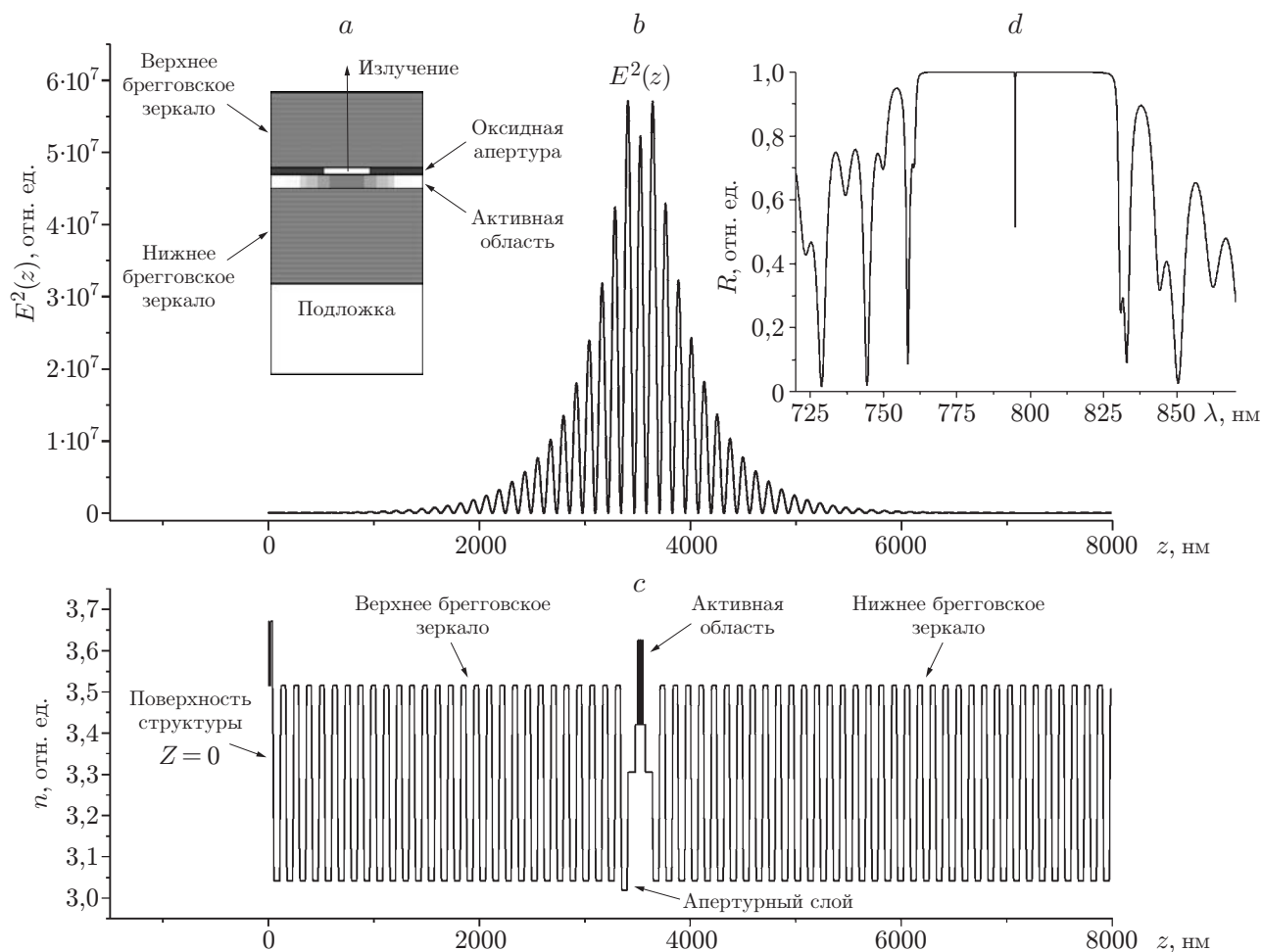


Рис. 1. Результаты расчета оптических характеристик лазерной структуры с использованием одномерной модели: *a* — схема лазера, *b* — распределение квадрата амплитуды электрического поля световой волны $E^2(z)$ в лазерном резонаторе, *c* — профиль показателя преломления $n(z)$ в лазерном резонаторе, *d* — спектр отражения полной лазерной структуры

Как видно из рисунка, для лазеров с малой оксидной апертурой эффект коротковолнового смещения является весьма значительным и составляет несколько нанометров, что необходимо учитывать при разработке ЛВР со строго заданной длиной волны 795 нм.

На рис. 2, *b* приведены результаты расчета порогового усиления для фундаментальной моды TEM_{00} (G_{thF}) и первой поперечной моды TEM_{01} (G_{thT}) в зависимости от размера оксидной апертуры A . Видно, что при $A > 5$ мкм уровень порогового усиления для этих мод практически совпадает. С уменьшением A потери быстрее возрастают для поперечной моды, что приводит к более резкому возрастанию порогового усиления для моды TEM_{01} в сравнении с модой TEM_{00} . Относительная разница пороговых усилений для этих мод задает параметр модовой стабильности (МС):

$$МС = 100(G_{thT} - G_{thF})/G_{thF}.$$

Зависимость параметра МС от A приведена на рис. 2, *c*. Если параметр МС мал (G_{thT} и G_{thF} различаются на единицы процентов), ЛВР работает в многомодовом режиме. Одно-модовый режим работы возможен лишь в случае большого превышения G_{thT} над G_{thF} , т. е. большого значения МС. Для исследуемого ЛВР граница, разделяющая одномодовый и

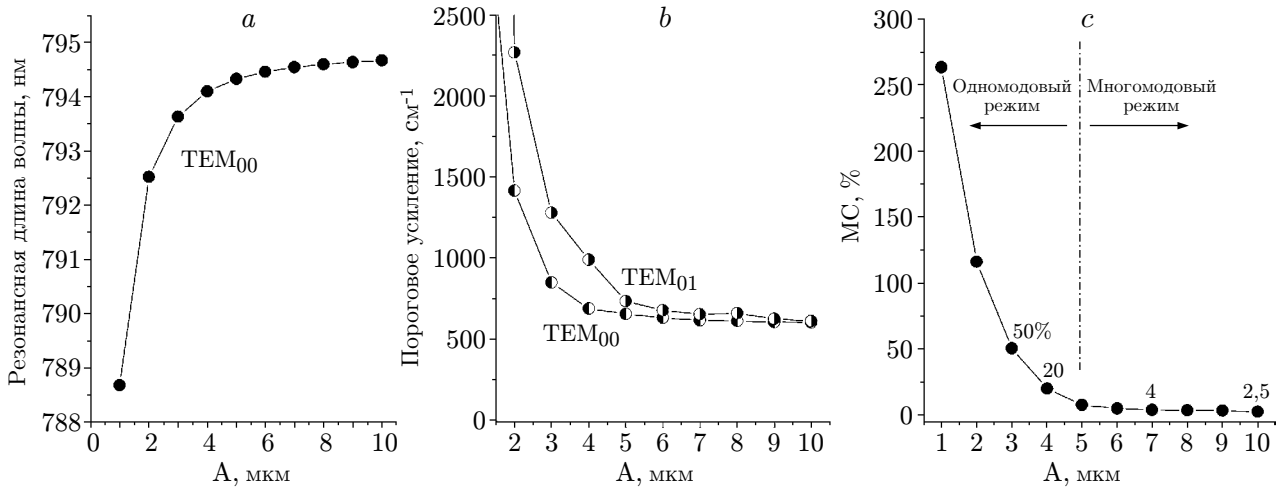


Рис. 2. Результаты расчета характеристик лазерной структуры с использованием трехмерной модели: *a* — зависимость резонансной длины волны ЛВР от размера оксидной апертуры A , *b* — зависимости порогового усиления для фундаментальной моды TEM_{00} ($G_{\text{th}F}$) и первой поперечной моды TEM_{01} ($G_{\text{th}T}$) от размера оксидной апертуры A , *c* — зависимость параметра МС от размера оксидной апертуры A

многомодовый режимы работы лазеров, обозначена на рис. 2, *c* вертикальной штрихпунктирной линией. Таким образом, устойчивый одномодовый режим работы ЛВР следует ожидать при $A \leq 5$ μm .

2. Экспериментальные результаты. Различные стадии изготовления экспериментальных образцов ЛВР представлены на рис. 3. Исходная лазерная структура выращивалась на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Рибер С21» на подложках $n\text{-GaAs}$ ориентации (001) диаметром 76 mm . Выращиванию полной лазерной структуры предшествовали тщательные калибровки скоростей роста слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, обеспечивающие точность задания толщин слоев не хуже 1 %. Рост полной лазерной структуры проводился с вращением подложки, что задавало наилучшую однородность толщин слоев по площади структуры. На рис. 3, *a* приведено изображение сечения выращенной полной лазерной структуры, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа. Анализ распределения резонансной длины волны лазерного микрорезонатора по площади структуры показал, что в центре она составляет ≈ 798 nm , резонансная длина волны резонатора уменьшается по мере удаления от центра структуры и вблизи ее края ≈ 792 nm . Таким образом, структура характеризуется высокой однородностью по толщинам выращенных слоев ($\sim 0,7$ %) и содержит области с необходимой $\lambda_{\text{рез}} \approx 795$ nm .

Для изготовления лазерных излучателей на выращенной структуре формировались мезы высотой ~ 6 μm (рис. 3, *b*), диаметр мез варьировался с шагом 1 μm в целях получения ЛВР с различными размерами оксидной апертуры. После чего для формирования оксидной апертуры ЛВР проводилось селективное окисление слоя $\text{Al}_{0,98}\text{Ga}_{0,02}\text{As}$ в атмосфере паров воды и азота при $T = 420$ $^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Глубина окисления составляла ~ 20 μm , что позволило сформировать лазеры с апертурами от 1 до 10 μm с шагом 1 μm . Дальнейшие технологические операции заключались в нанесении диэлектриков и формировании металлических контактных областей. Завершенные лазерные структуры изображены на рис. 3, *c—f*.

Результаты исследования генерационных характеристик изготовленных ЛВР (при $T = 295$ K) представлены на рис. 4. Лазеры характеризуются низким уровнем порогового тока I_{th} , который варьируется в интервале от 150 до 800 mA в зависимости от диаметра

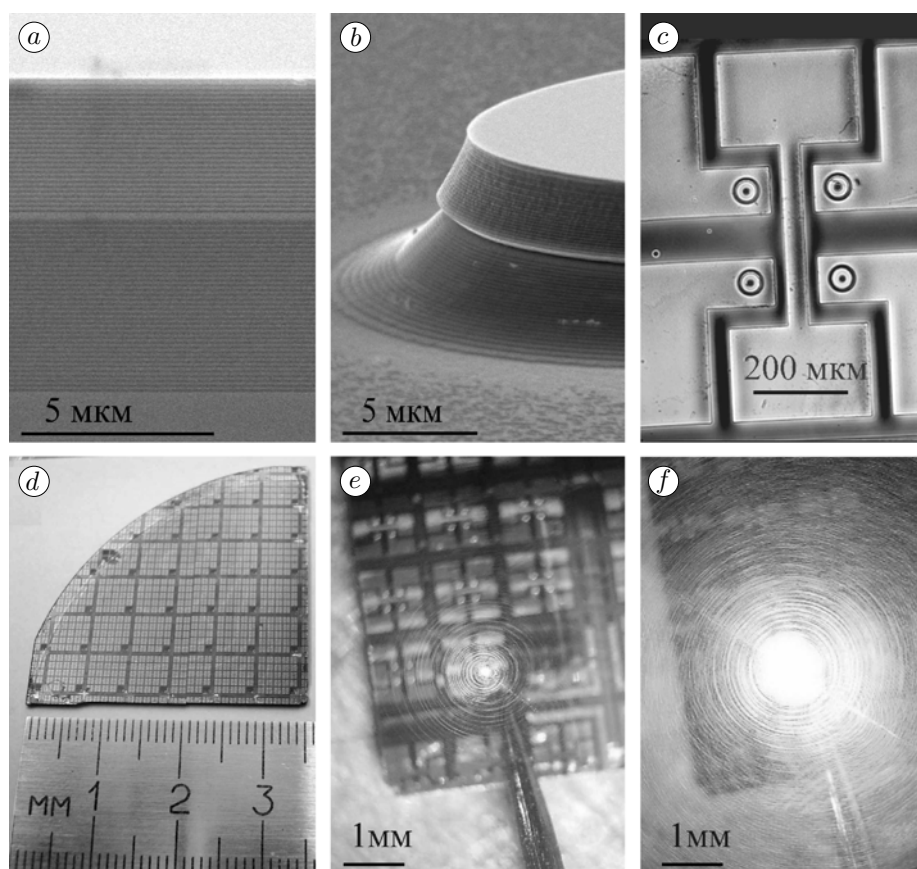


Рис. 3. Стадии изготовления ЛВР: *a* — исходная структура, выращенная методом МЛЭ (данные сканирующей электронной микроскопии), *b* — лазерная мезоструктура (данные сканирующей электронной микроскопии), *c* — полностью завершенные ЛВР, *d* — пластина, содержащая ~ 2800 ЛВР, *e* — ЛВР вблизи порога генерации ($I \approx I_{th}$), *f* — ЛВР в генерационном режиме ($I \approx 3I_{th}$)

лазерной апертуры (рис. 4, *a*). Квантовая эффективность изготовленных ЛВР составляет 0,3–0,4 мкВт/мкА. Исследование спектральных характеристик (рис. 4, *b, c*) показало, что лазеры с $A \leq 5$ мкм демонстрируют устойчивый одномодовый режим генерации во всем исследованном диапазоне тока накачки (0–1,5 мА), лазеры с $A = 6$ мкм работают в одномодовом режиме лишь при небольшом превышении порогового тока, наконец, лазеры с большей апертурой при любых уровнях накачки работают в многомодовом режиме. Полученные экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с расчетными результатами, приведенными в разд. 1 (см. рис. 2, *c*). На рис. 4, *b* приведен спектр излучения ЛВР с $A = 4$ мкм, работающего в одномодовом режиме на длине волны 795 нм с выходной мощностью 200 мкВт. 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 путем изменения внешней температуры и за счет изменения уровня инжекции, который также меняет температурный режим работы лазера. На рис. 4, *d* приведены результаты исследования перестройки длины волны лазерного излучения при изменении тока инжекции и температуры для ЛВР с апертурой $A = 4$ мкм. Температурный коэффициент изменения длины волны лазерного излучения $d\lambda/dT = 0,059$ нм/град, что находится в хорошем соответствии с данными [2–4].

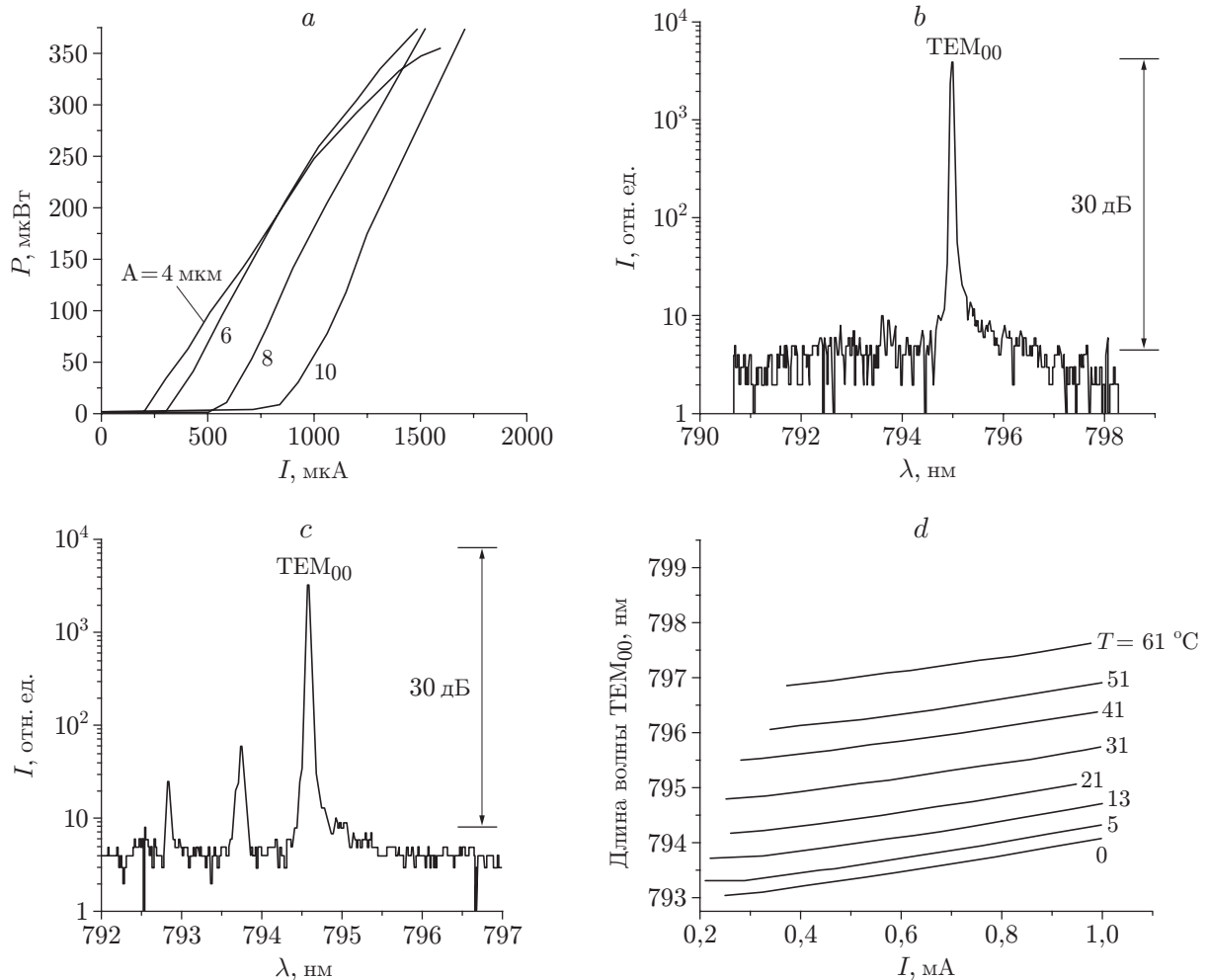


Рис. 4. Характеристики исследованных лазерных структур: *a* — семейство ватт-амперных характеристик для ЛВР с различными значениями оксидной апертуры A ; *b* — спектр излучения ЛВР с $A = 4$ мкм при $I = 900$ мкА, $P = 219$ мкВт; *c* — спектр излучения ЛВР с $A = 6$ мкм при $I = 720$ мкА, $P = 124$ мкВт; *d* — зависимости длины волны ЛВР от уровня инжекции и температуры

Закключение. Таким образом, в данной 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 мкВт при малых рабочих токах $\sim 1,5$ мА, длина волны 795 нм и возможность ее точной подстройки за счет изменения температуры и тока инжекции) демонстрирует большие возможности использования разработанных лазеров в миниатюрных атомных стандартах частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sale T. E. Vertical Cavity Surface Emitting Lasers. N. Y.: John Wiley & Sons Inc., 1995.
2. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Design, Fabrication, Characterization and Application /Eds. C. W. Wilsmen, H. Temkin, L. Coldren. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

3. **Vertical-Cavity** Surface-Emitting Lasers: Technology and Applications /Eds. J. Cheng, N. K. Dutta. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2000.
4. **Vertical-Cavity** Surface-Emitting Laser Devices /Eds. H. E. Li, K. Iga. Berlin — Heidelberg: Springer Verlag, 2002.
5. **Kitching J., Knappe S., Vukicevic N. et al.** A microwave frequency reference based on VCSEL-driven dark line resonances in Cs vapor // IEEE Trans. Instrum. and Measur. 2000. **49**, N 6. P. 1313.
6. **Knappe S., Gerginov V., Schwindt P. D. D. et al.** Atomic vapor cells for chip-scale atomic clocks with improved long-term frequency stability // Opt. Lett. 2005. **30**, N 6. P. 2351.
7. **Knappe S., Shah V., Schwindt P. D. D. et al.** A microfabricated atomic clock // Appl. Phys. Lett. 2004. **85**, N 9. P. 2351.
8. **Liew L. A., Knappe S., Moreland J. et al.** Microfabricated alkali atom vapor cells // Appl. Phys. Lett. 2004. **84**, N 14. P. 2694.
9. **Knappe S., Schwindt P. D. D., Shah V. et al.** A chip-scale atomic clock based on ^{87}Rb with improved frequency stability // Opt. Express. 2005. **13**, N 4. P. 1249.
10. **Yeh P.** Optical Waves in Layered Media. Singapore: John Wiley & Sons Inc., 1991.
11. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1973.
12. **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.

Поступила в редакцию 19 мая 2009 г.
