

Одномодовые лазеры с вертикальным резонатором для миниатюрного атомного эталона частоты на основе атомов Rb⁸⁷

© И.А. Дерезев[¶], В.А. Гайслер, А.К. Бакаров, А.К. Калагин, А.И. Торопов,
М.М. Качанова, Т.А. Гаврилова, О.И. Семенова, Д.Б. Третьяков,
И.И. Бетеров, В.М. Этин, И.И. Рябцев

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 8 апреля 2010 г. Принята к печати 13 апреля 2010 г.)

Представлены результаты численного моделирования и исследования генерационных характеристик полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором на основе твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Лазеры демонстрируют устойчивый одномодовый режим генерации на длине волны 795 нм при малых рабочих токах ~ 1.5 мА и выходной мощности 350 мкВт, что открывает перспективы их использования в миниатюрных атомных эталонах частоты нового поколения.

1. Введение

Актуальность создания миниатюрного атомного стандарта частоты обусловлена все возрастающими потребностями науки, современных информационных технологий, телекоммуникаций и навигации. Точное измерение временных интервалов необходимо для синхронизации передачи больших потоков данных, спутниковой связи, увеличения точности систем локального и глобального позиционирования, совершенствования навигационных приборов и др. Однако в большинстве таких систем и приборов в настоящее время применяются задающие генераторы на основе кварцевых резонаторов, имеющих предельную относительную нестабильность частоты порядка 10^{-9} . Для дальнейшего развития информационно-телекоммуникационных и навигационных систем требуются задающие генераторы с нестабильностью менее 10^{-10} , а в перспективе и до 10^{-12} . Такую высокую точность могут обеспечить только атомные эталоны частоты.

Имеющиеся на сегодняшний день атомные эталоны частоты основаны на резонансных лампах, излучающих на частоте оптических переходов в атомах Rb и Cs, и на поглощающих ячейках в сверхвысокочастотном (СВЧ) резонаторе, настроенном на частоту перехода между подуровнями сверхтонкой структуры основного состояния этих атомов. Такие устройства имеют значительный вес (килограммы), размеры (десятки сантиметров), энергопотребление (десятки ватт) и также высокую стоимость, поэтому они не получили широкого применения в стандартных приборах и устройствах. Миниатюризация атомного эталона частоты достигается за счет интегрального исполнения лазера с вертикальным резонатором (ЛВР). Данный тип лазеров отличается низким энергопотреблением, высоким кпд и высокой стабильностью частоты излучения. Им заменяется стандартная резонансная лампа, поглощающая ячейка и фотоприемник в виде единого модуля. В такой схеме 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 (КПН), который может быть использован для стабилизации частоты СВЧ генератора с относительной точностью до $10^{-10} - 10^{-12}$. Такой вариант решения поставленной задачи является основной современной тенденцией совершенствования и миниатюризации атомных эталонов частоты.

Для достижения максимальной стабильности такого атомного стандарта частоты резонанс КПН должен иметь максимальную амплитуду и минимальную ширину. По имеющимся литературным данным, эти параметры зависят от выбора типа оптического перехода из основного S -состояния в возбужденное P -состояние. В атомах щелочных металлов, в том числе Rb, используемых для атомных эталонов частоты, возбужденное P -состояние расщеплено спин-орбитальным взаимодействием на два подуровня $P_{1/2}$ и $P_{3/2}$ с полным моментом $J = 1/2$ и $J = 3/2$, а основное S -состояние имеет только один уровень $S_{1/2}$ с моментом $J = 1/2$. Поэтому существуют две оптические линии поглощения: линия D_1 для перехода $S_{1/2} \rightarrow P_{1/2}$ и линия D_2 для перехода $S_{1/2} \rightarrow P_{3/2}$. Эти линии имеют заметно отличающиеся длины волн: 795 и 780 нм соответственно. В атомном эталоне частоты должна использоваться только одна из этих линий. Вопрос об оптимальном выборе оптической линии для атомного эталона частоты на основе резонансов КПН специально исследовался в ряде экспериментальных и теоретических работ. Отличия в ширине и амплитуде резонансов КПН для линий поглощения D_1 и D_2 связаны с различием структуры магнитных подуровней возбужденного P -состояния. В работе [1] было проведено сравнение параметров резонансов КПН для атомов Rb и показано, что использование линии D_1 обеспечивает примерно в 10 раз более высокую эффективность резонансов КПН по сравнению с использованием линии D_2 .

[¶] E-mail: derebezov@thermo.isp.nsc.ru

Одним из основных требований, предъявляемых к ЛВР, используемых в миниатюрном атомном эталоне частоты [2–6], работающем на переходах D_1 атомов Rb^{87} , является возможность точной подстройки длины волны лазерного излучения под резонанс $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ в Rb^{87} . Также необходимо, чтобы длина волны излучения ЛВР составляла ~ 795 нм, при этом 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. Другое требование, предъявляемое к ЛВР, используемому в миниатюрном атомном эталоне частоты, заключается в одномодовом характере генерационного режима работы лазера. ЛВР должен работать в устойчивом одномодовом режиме TEM_{00} , генерация в многомодовом режиме недопустима. Фундаментальная мода TEM_{00} характеризуется линейной поляризацией. В случае полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором поляризационные характеристики излучения определяются рядом факторов [7–13]. Для полупроводниковых структур типа $A^{III}B^V$ с ориентацией $[100]$ анизотропия оптических характеристик в плоскости (001) выражена очень слабо. Это приводит к тому, что для поляризации излучения моды TEM_{00} в ЛВР, имеющего цилиндрическую симметрию, отсутствует предпочтительное направление. Таким образом, поляризация моды TEM_{00} в ЛВР может определяться случайными факторами (дефектами, микронапряжениями) и демонстрировать нестабильное поведение при изменении условий работы лазера. При проведении процесса селективного окисления проявляется определенная анизотропия скоростей окисления. Скорости окисления $AlGaAs$ вдоль кристаллографических направлений типа $[100]$ и $[1\bar{1}0]$ отличаются на ~ 10 – 15% . Это приводит к тому, что даже в случае цилиндрической формы лазерной структуры форма лазерной оксидной апертуры не является круглой. По мере уменьшения размера апертуры (с увеличением глубины окисления) форма оксидной апертуры приближается к квадратной. Это означает, что размер апертуры ЛВР вдоль кристаллографического направления типа $[1\bar{1}0]$ примерно в 1.4 раза превышает ее размер вдоль кристаллографического направления типа $[110]$. Таким образом, кристаллографические направления типа $[110]$ являются предпочтительными для поляризации лазерного излучения. Но при этом по-прежнему остается неопределенность направления поляризации лазерного излучения, так как кристаллографические направления $[110]$ и $[1\bar{1}0]$ эквивалентны. Лазерное излучение может с равной вероятностью иметь поляризацию как вдоль направления $[110]$, так и вдоль $[1\bar{1}0]$, что подтверждается рядом экспериментов [7–13]. В миниатюрном атомном эталоне частоты на основе ЛВР необходимо, чтобы поляризация моды TEM_{00} была стабильна и не изменялась при изменении условий работы лазера. Также ЛВР должен иметь минимальные пороговые и рабочие токи (~ 1 мА) при выходной мощности в одномодовом режиме ~ 0.1 мВт.

В данной работе представлены результаты численного моделирования и исследования генерационных характеристик экспериментальных образцов одномодовых ЛВР с длиной волны 795 нм, перспективных для использования в миниатюрном атомном эталоне частоты, работающем на переходах $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ атомов Rb^{87} .

2. Конструкция и моделирование характеристик ЛВР

Исходная лазерная структура выращивалась методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках n^+ -GaAs(100). Лазер представляет собой многослойную полупроводниковую структуру на основе твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$, содержащую в общей сложности 1156 слоев различного состава. Два полупроводниковых брэгговских зеркала образуют резонатор лазера. Верхнее брэгговское зеркало содержит 28 периодов и нижнее зеркало 35.5 периодов, что задает высокий уровень коэффициентов отражения зеркал (99.79 и 99.93% соответственно, расчет 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. Между брэгговскими зеркалами 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. Инжекция носителей заряда в активную область осуществляется через верхнее выходное полупроводниковое зеркало p -типа и нижнее зеркало n -типа. В лазере используется оксидная апертура AlO_x , которая формируется в процессе селективного окисления слоя $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$. Кольцо окисла AlO_x располагается непосредственно над активной областью и обеспечивает эффективное токовое и оптическое ограничение в ЛВР. Размер апертуры A , задаваемый внутренним диаметром оксидного кольца, варьировался в интервале от 1 до 10 мкм с шагом 1 мкм. С целью стабилизации направления поляризации лазерного излучения в лазере использовалась асимметричная инжекция тока, которая задавалась специальной формой контакта к верхнему брэгговскому отражателю ЛВР. Выбранная форма контакта задает асимметричную инжекцию носителей заряда в верхнее брэгговское зеркало, что в свою очередь задает градиент температуры и механических напряжений вдоль направления $[1\bar{1}0]$. Таким образом, направления $[110]$ и $[1\bar{1}0]$ не являются эквивалентными, и поляризация лазерного излучения ориентирована вдоль одного из них.

Для анализа модового состава, параметров модовой стабильности ЛВР, с целью моделирования возможности их работы в устойчивом одномодовом режиме TEM_{00} нами была использована трехмерная модель

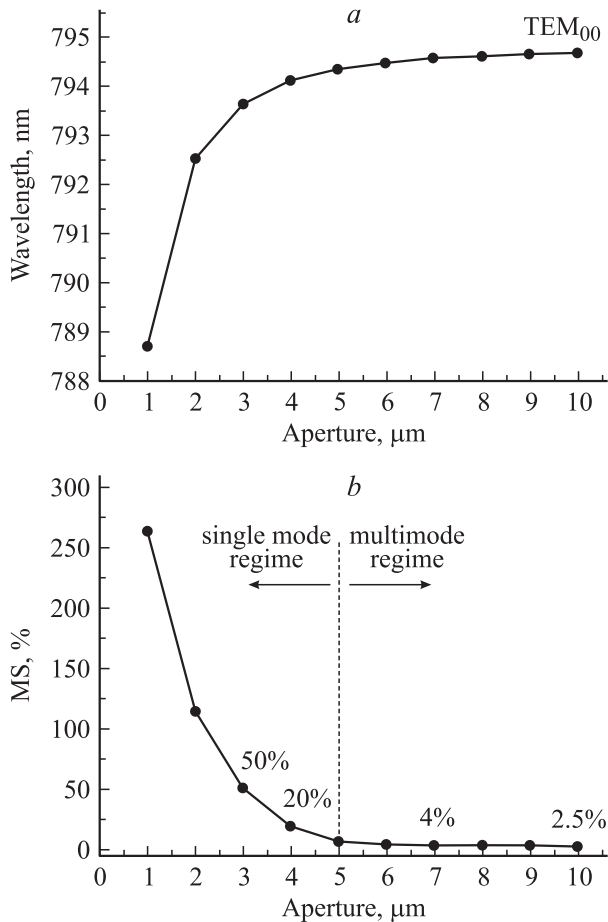


Рис. 1. Зависимость резонансной длины волны ЛВР от размера оксидной апертуры A (a), зависимость параметра модовой стабильности MS от размера оксидной апертуры A (b).

SAMFR 1.2 [14], позволяющая рассчитывать модовые характеристики ЛВР. На рис. 1 представлены результаты расчета характеристик полной лазерной структуры с использованием трехмерной модели. Уменьшение размера оксидной апертуры ЛВР приводит к синему смещению резонансной длины волны лазера, что связано с сокращением объема моды. Этот эффект продемонстрирован на рис. 1, a . Как видно из рисунка, этот эффект наиболее сильно проявляется для лазеров с малой оксидной апертурой и составляет несколько нанометров, что необходимо учитывать при разработке ЛВР со строго заданной длиной волны 795 нм. Относительная разница пороговых усилений для первой поперечной моды TEM_{01} (G_{thF}) и основной моды TEM_{00} (G_{thT}) задает параметр модовой стабильности

$$MS = \frac{G_{thT} - C_{thF}}{G_{thF}},$$

зависимость параметра модовой стабильности MS от A приведена на рис. 1, b . В случае, если параметр MS мал (G_{thT} и G_{thF} отличаются на единицы процентов), ЛВР работает в многомодовом режиме. Одномодовый режим работы возможен лишь в случае большого пре-

вышения G_{thT} над G_{thF} , большого значения MS . Для исследуемого ЛВР граница, разделяющая одномодовый и многомодовый режимы работы лазеров, обозначена на рис. 1, b вертикальной штриховой линией. Таким образом, устойчивый одномодовый режим работы ЛВР следует ожидать при $A \leq 5$ мкм.

3. Исследование характеристик ЛВР

Исследования проводились на ЛВР с апертурами A в диапазоне от 2 до 8 мкм с шагом 1 мкм. Все исследованные ЛВР продемонстрировали генерационный режим работы. Лазеры переходят в генерационный режим при субмиллиамперном уровне токовой накачки I_{th} в диапазоне от ~ 100 до 800 мкА в зависимости от размера токовой апертуры. Выходная мощность ЛВР в исследованном диапазоне токов накачки не ниже 200 мкВт. Максимальная выходная мощность ЛВР с $A = 4$ мкм в исследованном диапазоне токов накачки (0–2 мА) составляет ~ 350 мкВт. Квантовая эффективность изготовленных ЛВР составляет 0.3–0.4 мкВт/мкА. Ватт-амперные характеристики исследованных образцов ЛВР с оксидными апертурами от 2 до 8 мкм представлены

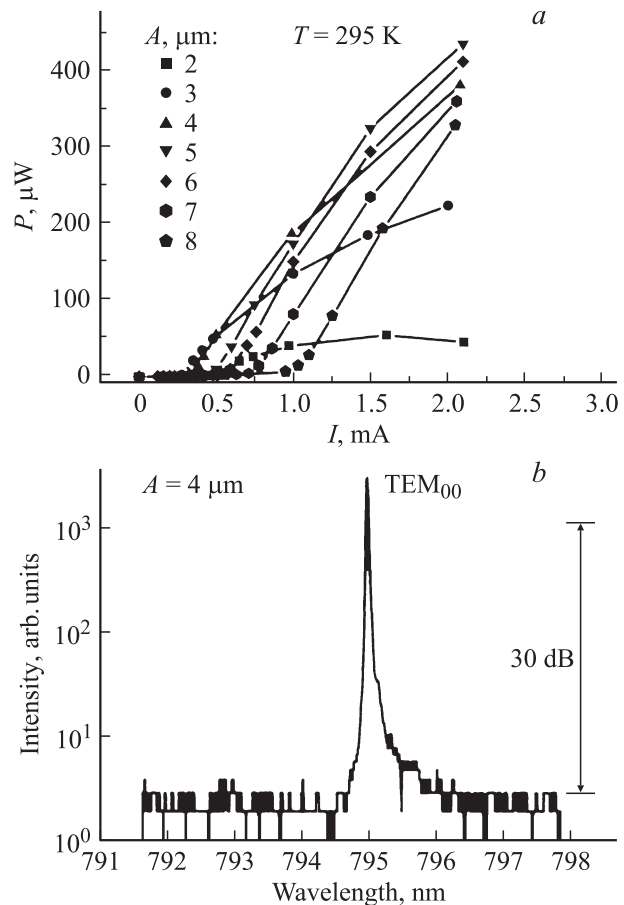


Рис. 2. Семейство ватт-амперных характеристик для ЛВР с различными значениями оксидной апертуры A (a); спектр излучения ЛВР с $A = 4$ мкм (b).

на рис. 2, *a*. Снижение выходной мощности в ЛВР с апертурой 3 и 2 мкм в сравнении с ЛВР с $A = 4$ мкм (рис. 2, *a*) связано с токовым разогревом лазеров.

Исследование спектральных характеристик 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. На рис. 2, *b* приведен спектр излучения ЛВР с $A = 4$ мкм, работающего в одномодовом режиме на длине волны 795.00 нм с выходной мощностью 200 мкВт. Исследование генерационных характеристик одномодовых ЛВР показало, что подход в задании и стабилизации направления поляризации лазерного излучения с использованием асимметричной инжекции тока является эффективным. Поляризация излучения всех исследованных ЛВР, работающих в одномодовом режиме, стабильна при различных режимах работы лазера и совпадает с кристаллографическим направлением [110]. На рис. 3 показаны поляризационные характеристики лазерного излучения ЛВР с $A = 4$ мкм при различных уровнях инжекции тока, излучение поляризовано вдоль направления [110].

Основное требование, предъявляемое к ЛВР для миниатюрных атомных стандартов частоты на основе атомов Rb^{87} , заключается в возможности точной подстройки длины волны лазерного излучения под резонанс $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ атомов Rb^{87} . Длина волны излучения ЛВР должна составлять ~ 795 нм, при этом точная подстройка длины волны ЛВР под рабочий переход $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ атомов Rb^{87} должна осуществляться путем изменения внешней температуры и за счет изменения уровня инжекции. Лазер при этом должен работать в одномодовом режиме TEM_{00} .

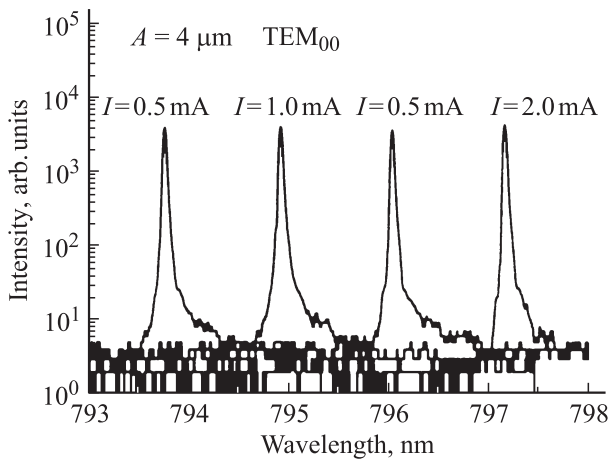


Рис. 3. Поляризационные характеристики лазерного излучения ЛВР с $A = 4$ мкм при различных уровнях инжекции.

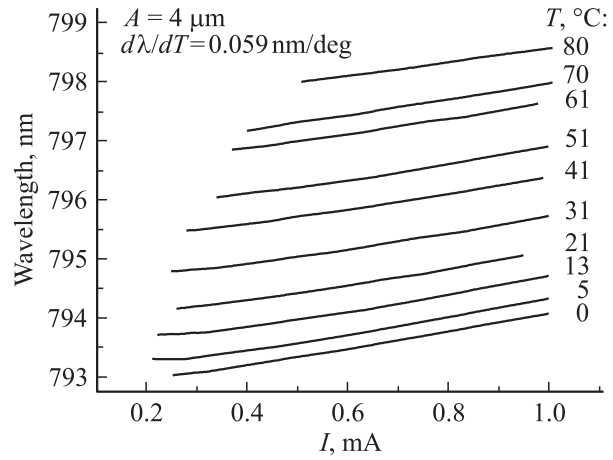


Рис. 4. Зависимости длины волны ЛВР от уровня инжекции и температуры.

Были проведены исследования температурных зависимостей характеристик лазерного излучения в диапазоне температур 20–80°C при различном уровне инжекции. Исследования проводились только на лазерах с апертурой $A = 4$ мкм, обеспечивающей одномодовый режим генерации TEM_{00} . Влияние температуры на длину волны излучения ЛВР определяется двумя основными факторами. С повышением температуры возрастают значения показателей преломления полупроводниковых материалов, образующих микрорезонатор лазера. Рост температуры приводит также к расширению материалов, образующих лазерный микрорезонатор. Оба эти фактора приводят к увеличению резонансной длины волны брэгговского микрорезонатора. Таким образом, с ростом температуры происходит увеличение длины волны ЛВР. На рис. 4 приведены результаты исследования перестройки длины волны лазерного излучения при изменении тока инжекции и температуры. Температурный коэффициент изменения длины волны лазерного излучения составляет $d\lambda/dT = 0.059$ нм/градус, что находится в хорошем соответствии с литературными данными [14–16].

4. Заключение

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 Rb^{87} . Совокупность представленных экспериментальных результатов (устойчивый одномодовый режим работы с выходной мощностью до 350 мкВт при малых рабочих токах ~ 1.5 мА, длиной волны 795 нм и возможностью ее точной подстройки за счет изменения температуры и тока инжекции) демонстрирует большие возможности использования разработанных лазеров в миниатюрном атомном эталоне частоты.

Список литературы

- [1] M. Stähler, R. Wynands, S. Knappe, J. Kitching, L. Hollberg, A. Taichenachev, V. Yudin. *Optics Lett.*, **27**, 1472 (2002).
- [2] J. Kitching, S. Knappe, N. Vukicevic et al. *IEEE Trans. Instrument. Measurements*, **49** (6), 1313 (2000).
- [3] S. Knappe, V. Gerginov, P.D.D. Schwindt et al. *Optics Lett.*, **30** (6), 2351 (2005).
- [4] S. Knappe, V. Shah, P.D.D. Schwindt. *Appl. Phys. Lett.*, **85** (9), 2351 (2004).
- [5] L. Liew, S. Knappe, J. Moreland et al. *Appl. Phys. Lett.*, **84** (14), 2694 (2004).
- [6] S. Knappe, P.D.D. Schwindt, V. Shah et al. *Opt. Express*, **13** (4), 1249 (2005).
- [7] K. Iga. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (1), 1 (2008).
- [8] K. Iga. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **6**, 1201 (2000).
- [9] C.W. Wilmsen, H. Temkin, L.A. Coldren. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: Design, Fabrication and Applications* (Cambridge University Press, 1999).
- [10] L.A. Coldren, S.W. Corzine. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (John Wiley & Sons, 1995).
- [11] J. Cheng, N.K. Dutta. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Technology and Applications* (Gordon and Breach Science Publishers, 2000).
- [12] T.E. Sale. *Vertical Cavity Surface Emitting Lasers* (John Wiley & Sons. Inc., 1995).
- [13] P. Bienstman, R. Baets, J. Vukusic et al. *IEEE J. Quant. Electron.*, **37** (12), 1618 (2001).
- [14] C.W. Wilmsen, H. Temkin, L. Coldren. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Design, Fabrication, Characterization and Application* (Cambridge University Press, 1999).
- [15] J. Cheng, N.K. Dutta. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Technology and Applications* (Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers, 2000).
- [16] H.E. Li, K. Iga. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Devices* (Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 2003).

Редактор Т.А. Полянская

Single mode vertical-cavity surface emitting lasers for atomic clocks based on Rb⁸⁷

I.A. Derebezov, V.A. Haisler, A.K. Bakarov, A.K. Kalagin, A.I. Toropov, M.M. Kachanova, T.A. Gavrilova, O.I. Semenova, D.B. Tretyakov, I.I. Beterov, V.M. Entin, I.I. Ryabtsev

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The results of the numeric simulation and investigated generation characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL's) on the basis of $Al_xGa_{1-x}As$ are present. Single fundamental mode continuous-wave output power of $350\mu W$ has been achieved in the 795 nm range, with a threshold current of 1.5 mA. It was shown that developed VCSELs are offers the prospect of their application in battery operated chip-scale atomic clock based on Rb⁸⁷.