

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ОПТИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ

УДК 621.3.049.77

ЛАЗЕРЫ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РЕЗОНАТОРОМ
ДЛЯ МИНИАТЮРНЫХ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

© В. А. Гайслер¹, И. А. ДЕРЕБЕЗОВ¹, А. В. Гайслер¹, Д. В. Дмитриев¹,
А. К. Бакаров¹, А. И. Торопов¹, М. М. Качанова¹, Ю. А. Живодков¹,
А. В. Латышев¹, М. Н. Скворцов², С. М. Игнатович²,
В. И. Вишняков², Н. Л. Квашнин², И. С. Месенцова²,
А. В. Тайченачев², С. Н. Багаев², И. Ю. Блинов³, В. Г. Пальчиков³,
Ю. С. Самохвалов³, Д. А. Парёхин³

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

²Институт лазерной физики СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 15Б

³Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и
радиотехнических измерений,
141570, Московская обл., Менделеево
E-mail: vahvah55@mail.ru

Представлены результаты разработки лазеров с вертикальным резонатором на основе твёрдых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$. Лазеры демонстрируют устойчивый одномодовый режим генерации на длинах волн 794,9 нм и 894,6 нм, что открывает перспективы их использования в миниатюрных квантовых стандартах частоты на основе ^{87}Rb и ^{133}Cs .

Ключевые слова: лазеры с вертикальным резонатором, рубидий, цезий, миниатюрные квантовые стандарты частоты, когерентное пленение населённости, девиация Аллана.

DOI: 10.15372/AUT20210501

Введение. Полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР) [1–5] — один из ключевых элементов современных и перспективных оптических информационных систем, что обусловлено уникальными характеристиками данного типа излучателей. Лазер с вертикальным резонатором является наиболее миниатюрным (объём резонатора несколько мкм³), экономичным (рабочие токи единицы мА) и быстродействующим (частота токовой модуляции десятки ГГц) полупроводниковым лазерным излучателем, разработанным к настоящему времени. Лазеры с вертикальным резонатором уже на протяжении ряда лет — коммерческая продукция. Сейчас их ежегодный выпуск превышает 10⁸ штук, они широко используются в трансиверах локальных волоконно-оптических систем, а также в высокоточных ручных компьютерных манипуляторах. Лазеры данного типа представляют большой интерес для создания высокоскоростных систем передачи данных в разрабатываемых суперкомпьютерах и других информационных системах, где по одному каналу скорость передачи может достигать десятки Гбит/с, а при использовании ЛВР матричного типа достигим рубеж Тбит/с.

Совокупность характеристик ЛВР (миниатюрность, экономичность, быстродействие) хорошо соответствует требованиям, предъявляемым к излучателям в миниатюрных квантовых стандартах частоты (КСЧ), работающих на основе эффекта когерентного пленения населённости (КПН) [6–13]. В миниатюрных КСЧ на основе резонанса КПН длина

волны лазерного излучения должна соответствовать переходам D_1 ($5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$), что для КСЧ на основе ^{87}Rb и ^{133}Cs составляет 794,9 нм и 894,6 нм соответственно. Лазеры должны работать в устойчивом одномодовом режиме с возможностью точной подстройки длины волны излучения под резонансы Rb и Cs. Ток инжекции лазера, излучающего на оптической частоте ω_L , модулируется СВЧ-генератором на частоте ω_0 , в результате чего в спектре лазера возникают боковые частоты $(\omega_L - \omega_0)$ и $(\omega_L + \omega_0)$. Частота модуляции ω_0 должна составлять половину сверхтонкого расщепления уровней атомов, для ^{87}Rb и ^{133}Cs частоты модуляции равны $\sim 3,417$ ГГц и $\sim 4,596$ ГГц соответственно. Частоты $(\omega_L - \omega_0)$ и $(\omega_L + \omega_0)$ индуцируют оптические переходы из двух сверхтонких подуровней основного состояния атомов в общее возбуждённое состояние. При перестройке частоты генератора в сигнале поглощения возникает узкий интерференционный резонанс когерентного пленения населённости, 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, что позволит существенно улучшить характеристики большого числа телекоммуникационных и навигационных устройств.

Цель данной работы — представить результаты разработки одномодовых лазеров с вертикальным резонатором с генерационными длинами волн 794,9 нм и 894,6 нм, отвечающими переходам $D_1(5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2})$ ^{87}Rb и ^{133}Cs . Показано, что характеристики лазеров соответствуют требованиям, предъявляемым к излучателям в миниатюрных квантовых стандартах частоты на основе резонанса КПП. Квантовый стандарт частоты на основе ^{87}Rb демонстрирует стабильность частоты на уровне $ADEV \leq 10^{-11}$.

Конструкция лазеров с вертикальным резонатором и стадии их изготовления. Разработано два типа лазеров с длинами волн 794,9 нм (ЛВР-1 для КСЧ на основе ^{87}Rb) и 894,6 нм (ЛВР-2 для КСЧ на основе ^{133}Cs). Схема ЛВР представлена на рис. 1, а.

Лазер с вертикальным резонатором представляет собой многослойную полупроводниковую структуру, содержащую в общей сложности 1156 слоёв $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 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-1 состоит из трёх нелегированных квантовых ям $\text{Al}_{0,07}\text{Ga}_{0,93}\text{As}$ толщиной 8 нм, которые размещены вблизи максимума стоячей электромагнитной волны лазерного микрорезонатора (рис. 1, b, d). Активная область ЛВР-2 содержит три нелегированные квантовые ямы $\text{In}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{As}$ толщиной 8 нм. 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 апертурного слоя состава $\text{Al}_{0,98}\text{Ga}_{0,02}\text{As}$ [2–4] (рис. 1, a, d). В ЛВР-1 толщина апертурного окисляемого слоя $\text{Al}_{0,98}\text{Ga}_{0,02}\text{As}$ составляет 49 нм, в ЛВР-2 толщина апертурного слоя — 57 нм. Кольцо окисла AlGaO_x располагается непосредственно над активной областью (см. рис. 1, a) и обеспечивает эффективное токовое и оптическое ограничения в ЛВР [1–3]. Размер апертуры A , задаваемый внутренним диаметром оксидного кольца, может варьироваться, что определяется режимом процесса селективного окисления, при $A \leq 3$ мкм ЛВР демонстрируют одномодовый режим генерации.

Период брэгговских зеркал ЛВР-1 состоит из слоёв $\text{Al}_{0,94}\text{Ga}_{0,06}\text{As}$ (49 нм) и $\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}$ (42 нм), на границах которых располагаются интерфейсные вставки 16 нм, образованные тонкими (2 нм) слоями $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ переменного состава. Интерфейсные вставки используются для снижения омического сопротивления брэгговских зеркал. Период брэгговских зеркал ЛВР-2 сформирован слоями $\text{Al}_{0,94}\text{Ga}_{0,06}\text{As}$ (57 нм) и $\text{Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ (49 нм), на границах которых также расположены интерфейсные вставки 16 нм, образованные тонкими (2 нм) слоями $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

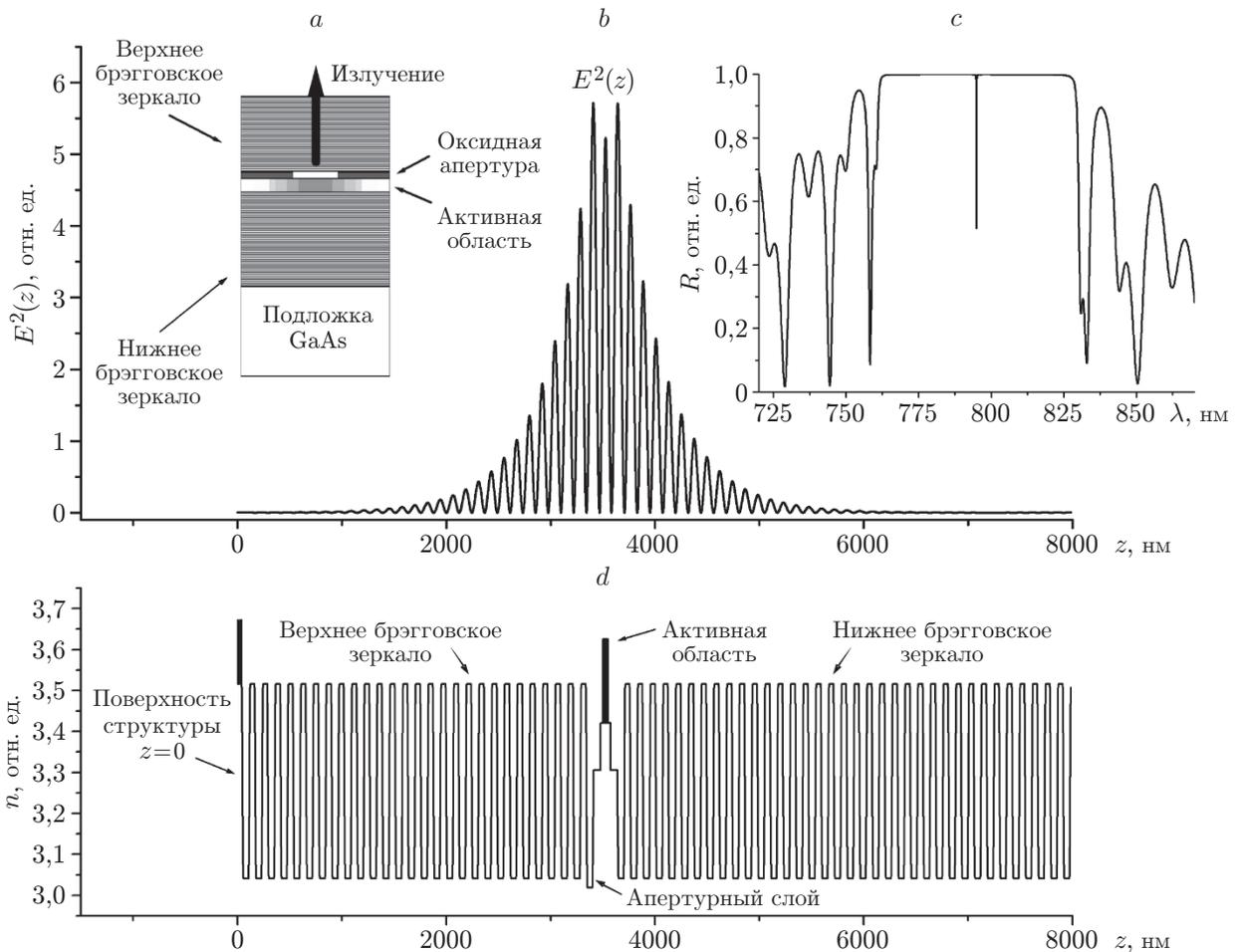


Рис. 1. Конструкция ЛВР: *a* — схема лазера; *b* — распределение квадрата амплитуды электрического поля световой волны $E^2(z)$ в лазерном резонаторе ЛВР-1; *c* — спектр отражения полной структуры ЛВР-1; *d* — профиль показателя преломления $n(z)$ в лазерном резонаторе ЛВР-1

Верхнее брэгговское зеркало ЛВР содержит 28 периодов, нижнее зеркало — 35,5 периодов, что задаёт высокий уровень коэффициентов отражения зеркал; расчётные значения $R_{\text{top}} \approx 0,997$ и $R_{\text{bottom}} \approx 0,999$. Это обеспечивает высокую добротность микрорезонатора ($Q \approx 2 \cdot 10^4$), низкий уровень порогового усиления, низкий уровень пороговых и рабочих токов ЛВР. На рис. 1, *c* приведён спектр отражения полной лазерной структуры ЛВР-1, демонстрирующий резонансную длину волны лазера 795 нм.

Различные стадии изготовления ЛВР представлены на рис. 2. Исходная лазерная структура выращивалась на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) Ribier C21 на подложках n -GaAs ориентации (001). Выращиванию полной лазерной структуры предшествовали тщательные калибровки скоростей роста слоёв $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, обеспечивающие точность задания толщин слоёв не хуже 1 %. Рост полной лазерной структуры проводился с вращением подложки, что задавало наилучшую однородность толщин слоёв по площади структуры.

На рис. 2, *a* приведено изображение сечения выращенной полной лазерной структуры, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Для изготовления лазерных излучателей на выращенной структуре формировались мезы высотой ~ 5

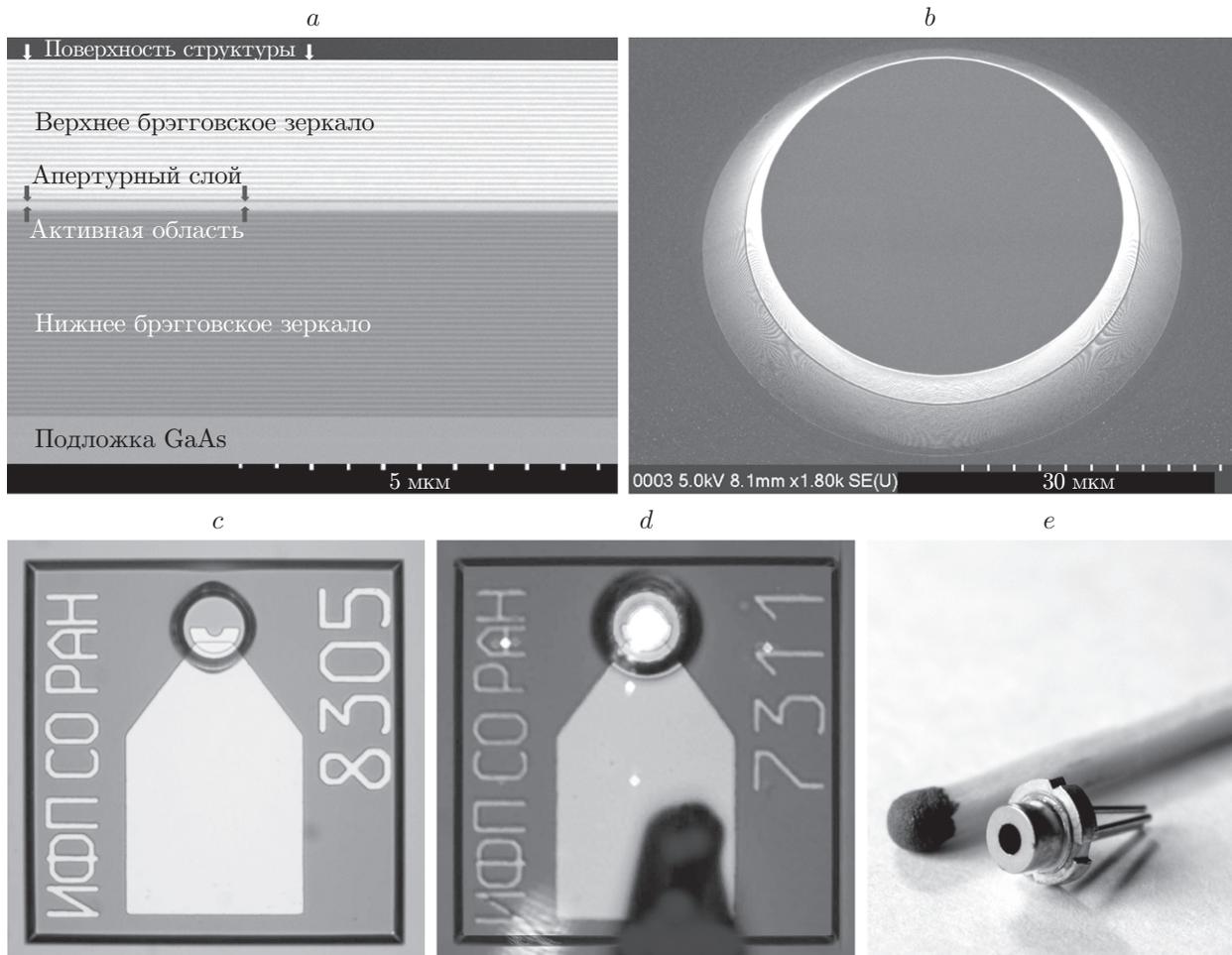


Рис. 2. Стадии изготовления ЛВР: *a* — исходная ЛВР-структура, выращенная методом МЛЭ (данные СЭМ); *b* — лазерная мезаструктура (данные СЭМ); *c* — полностью завершённая ЛВР-структура: микрофотография лазерного чипа 300×300 мкм; *d* — ЛВР в генерационном режиме при токе накачки $I = 1,5$ мА; *e* — лазер в корпусе ТО-46

мкм (рис. 2, *b*). После чего для формирования оксидной апертуры ЛВР проводилось селективное окисление слоёв $\text{Al}_{0,98}\text{Ga}_{0,02}\text{As}$ в атмосфере паров воды и азота при $T = 420$ °С. Дальнейшие технологические операции заключались в нанесении диэлектриков и формировании металлических контактных областей. Полностью завершённая ЛВР-структура представлена на рис. 2, *c*, размер лазерного чипа составляет 300×300 мкм. На рис. 2, *d* приведена микрофотография ЛВР в генерационном режиме при токе накачки $I = 1,5$ мА. Лазерные чипы монтируются в корпусе ТО-46, содержащем элемент Пельтье и термистор, для задания и контроля температуры ЛВР (рис. 2, *e*).

Характеристики ЛВР и КСЧ на их основе. Генерационные характеристики изготовленных ЛВР, измеренные в воздушной среде, представлены на рис. 3. Исследование спектральных характеристик лазеров показало, что лазеры с апертурой $A \leq 3$ мкм демонстрируют устойчивый одномодовый режим генерации и стабильную поляризацию излучения вдоль кристаллографического направления [110] во всём исследованном диапазоне тока накачки (0–2 мА). Коэффициент подавления высших мод может достигать 50 дБ (рис. 3, *a*, *b*).

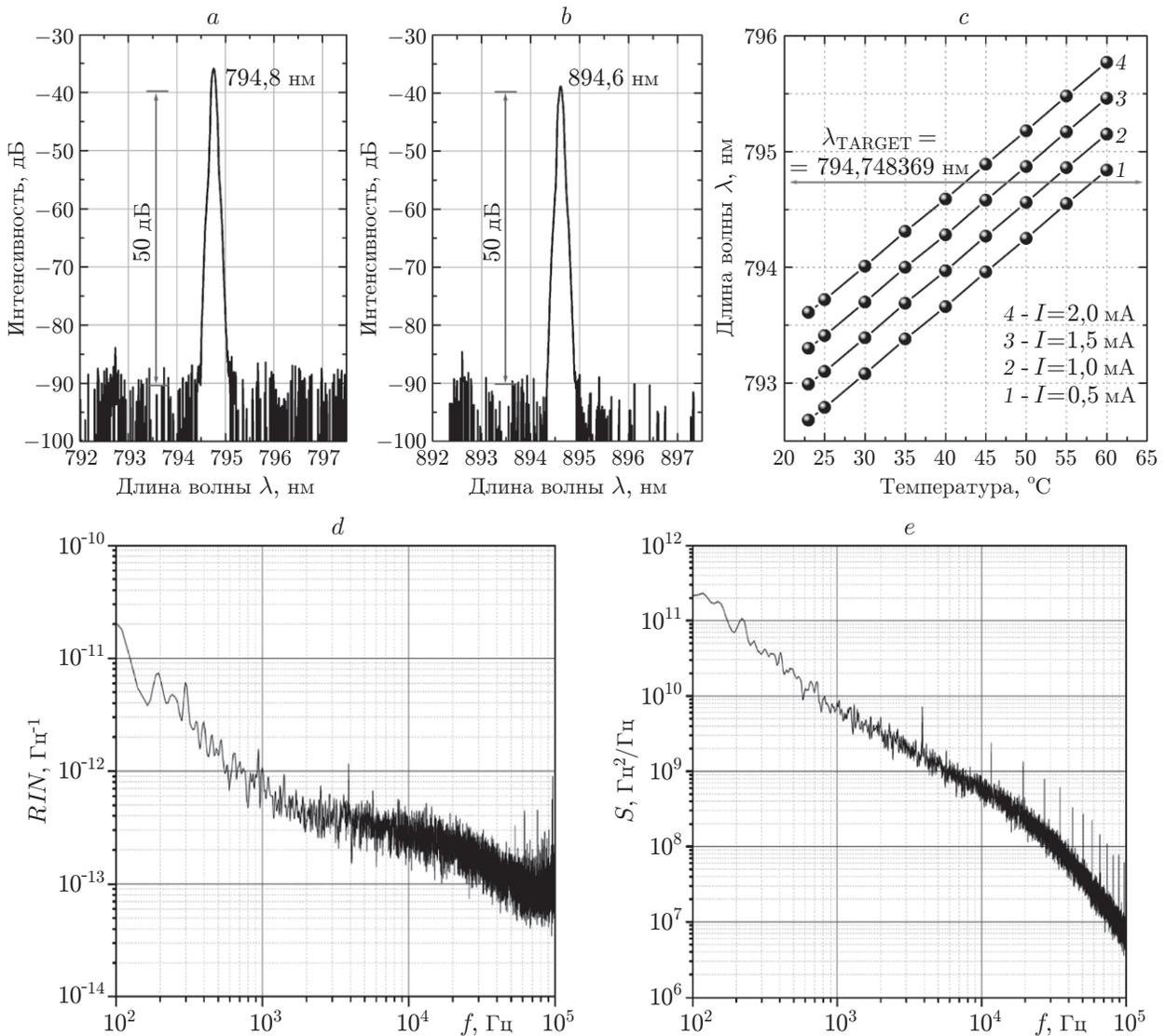


Рис. 3. Генерационные характеристики ЛВР, измеренные в воздушной среде: *a* — спектр излучения ЛВР-1 при токе накачки $I = 1,5$ мА и $T = 48$ °С; *b* — спектр излучения ЛВР-2 при токе накачки $I = 1,3$ мА и $T = 56$ °С; *c* — зависимости длины волны ЛВР-1 от температуры и тока накачки; *d* — характеристика амплитудных шумов ЛВР-1; *e* — характеристика частотных шумов ЛВР-1

Лазеры характеризуются низким уровнем порогового тока $I_{th} \approx 0,4$ мА, квантовая эффективность ЛВР $\eta_{slope} \approx 0,5$ мВт/мА. Точная подстройка длины волны ЛВР под рабочий переход $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ атомов осуществляется путём изменения внешней температуры и за счёт изменения уровня инжекции, который также меняет температурный режим работы лазера. На рис. 3, *c* приведены зависимости длины волны излучения ЛВР-1 от температуры и тока накачки. Температурный коэффициент изменения длины волны лазерного излучения составляет $d\lambda/dT = 0,059$ нм/°С, что находится в хорошем соответствии с литературными данными [1–3]. На рис. 3, *d*, *e* представлены характеристики амплитудных (RIN , Гц⁻¹) и частотных шумов (S , Гц²/Гц), измеренные для ЛВР-1.

Совокупность представленных характеристик ЛВР демонстрирует возможности их применения в миниатюрных квантовых стандартах частоты. Разработанный ЛВР-1 был

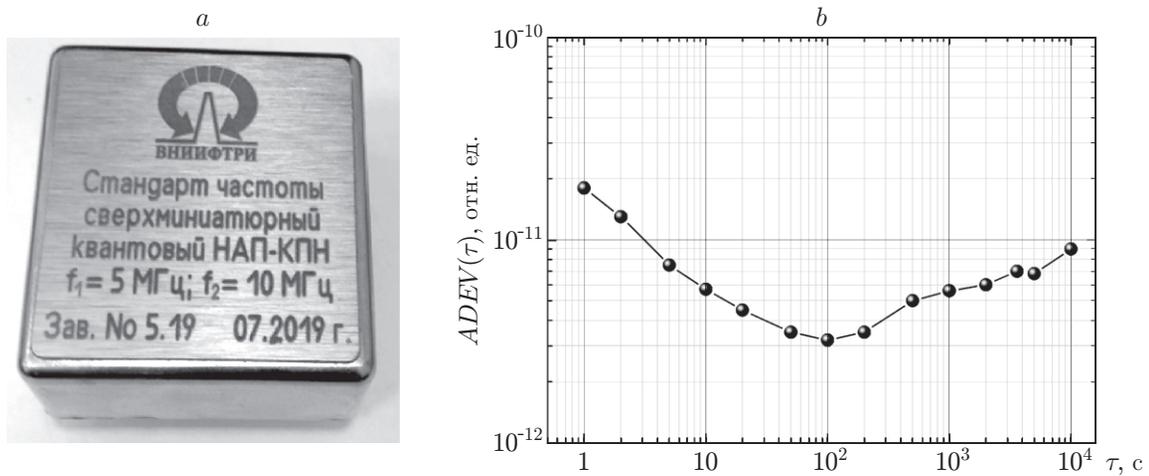


Рис. 4. Характеристики миниатюрного КСЧ: внешний вид миниатюрного КСЧ размерами $5,0 \times 5,0 \times 2,4$ см (а), зависимость девиации Аллана от времени усреднения τ для КСЧ с ЛВР-1 (б)

использован в качестве излучателя в миниатюрном КСЧ на основе ^{87}Rb (рис. 4). Описание конструкции миниатюрного КСЧ на основе ^{87}Rb представлено в работе [13]. На рис. 4, б приведена зависимость параметра стабильности частоты (девиации Аллана $ADEV$) от времени усреднения τ для КСЧ с ЛВР-1. Как видно на рис. 4, б, КСЧ с ЛВР-1 демонстрирует стабильность частоты на уровне $ADEV \leq 10^{-11}$, что является прямым подтверждением перспективности применения разработанных ЛВР при создании миниатюрных КСЧ.

Заключение. Таким образом, в данном исследовании представлены результаты разработки одномодовых лазеров с вертикальным резонатором с генерационными длинами волн 794,9 нм и 894,6 нм, отвечающими переходам D_1 ($5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$) ^{87}Rb и ^{133}Cs . Лазер с вертикальным резонатором с длиной волны 794,9 был использован в качестве излучателя в миниатюрном КСЧ на основе ^{87}Rb . Квантовый стандарт частоты демонстрирует стабильность частоты на уровне $ADEV \leq 10^{-11}$, что является прямым подтверждением перспективности применения разработанных ЛВР для создания миниатюрных КСЧ на основе резонанса КПН.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного контракта 20411.1950192501.11.003 от 29.12.20 (код 17705596339200009540).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **VCSELs:** Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers /Ed. R. Michalzik. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 558 p.
2. **Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers:** Design, Fabrication, Characterization and Application /Ed. by C. W. Wilsmen, H. Temkin, L. Coldren. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 455 p.
3. **Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers:** Technology and Applications /Ed. J. Cheng, N. K. Dutta. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2000. 323 p.
4. **Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Devices** /Ed. H. E. Li, K. Iga. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 386 p.
5. **Sale T. E.** Vertical Cavity Surface Emitting Lasers. N.Y.: John Wiley & Sons Inc., 1995. 312 p.

6. **Kitching J.** Chip-scale atomic devices // Appl. Phys. Rev. 2018. **5**, Iss. 3. P. 031302–031302-38.
7. **Vanier J.** Atomic clocks based on coherent population trapping: A review // Appl. Phys. B. 2005. **81**, N 4. P. 421–442.
8. **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 18. P. 2351–2353.
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. 1249–1253.
10. **Gruet F., Al-Samaneh A., Kroemer E. et al.** Metrological characterization of custom-designed 894.6 nm VCSELs for miniature atomic clocks // Opt. Express. 2013. **21**, N 5. P. 5781–5792.
11. **Tan B., Tian Y., Lin H. et al.** Noise suppression in coherent population trapping atomic clock by differential magneto-optic rotation detection // Opt. Lett. 2015. **40**, N 16. P. 3703–3706.
12. **Kroemer E., Rutkowski J., Maurice V. et al.** Characterization of commercially available vertical-cavity surface-emitting lasers tuned on Cs D1 line at 894.6 nm for miniature atomic clocks // Appl. Opt. 2016. **55**, N 31. P. 8839–8847.
13. **Skvortsov M. N., Ignatovich S. M., Vishnyakov V. I. et al.** Miniature quantum frequency standard based on the phenomenon of coherent population trapping in vapours of ^{87}Rb atoms // Quantum Electron. 2020. **50**, N 6. P. 576–580.

Поступила в редакцию 04.08.2021

После доработки 09.08.2021

Принята к публикации 16.08.2021
