

УДК 621.3.049.77

СВЕРХМИНИАТЮРНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

© В. А. Гайслер, И. А. Дерезев, А. В. Гайслер, Д. В. Дмитриев,
А. И. Торопов, М. М. Качанова, Ю. А. Живодков, А. С. Кожухов,
Д. В. Щеглов, А. В. Латышев

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: vahvah55@mail.ru*

Излагаются принципы работы сверхминиатюрных полупроводниковых излучателей, приводятся результаты исследований характеристик излучателей, разработанных и изготовленных в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН в течение последних трёх лет. Представлены характеристики излучателей одиночных фотонов на основе квантовых точек $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ и одномодовых лазеров с вертикальным резонатором с генерационной длиной волны 794,8 нм для миниатюрных квантовых стандартов частоты на основе Rb^{87} .

Ключевые слова: полупроводниковые квантовые точки, экситон, биэкситон, излучатели одиночных фотонов, лазеры с вертикальным резонатором.

DOI: 10.15372/AUT20200510

Введение. Сверхминиатюрные полупроводниковые излучатели — новая страница оптоэлектроники, открывающая перспективы создания высокопроизводительных оптических информационных систем, систем квантовой криптографии, миниатюрных эталонов оптической мощности и частоты. К числу таких излучателей следует отнести лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР), которые уже на протяжении ряда лет являются коммерческой продукцией и их ежегодный выпуск составляет $\sim 10^8$ штук [1]. Примерно половина этих лазеров используется в многомодовых локальных волоконно-оптических системах, решающих проблему «последней мили» со скоростью ~ 1 Гбит/с, вторая половина используется в высокоточных ручных компьютерных манипуляторах («мышях»). Это, конечно, лишь начальная фаза коммерциализации ЛВР. Лазеры такого 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. Не менее интересен ряд других разработок, где ЛВР составляют основу сенсорных устройств, лазерных принтеров, миниатюрных квантовых стандартов частоты.

Абсолютным пределом миниатюризации излучателей является создание излучателей одиночных фотонов (ИОФ) и излучателей фотонных пар (ИФП), запутанных по поляризации [2–5]. Эффективные излучатели одиночных фотонов могут найти разнообразные применения в системах квантовой криптографии, квантовых вычислений, при создании эталонов оптической мощности и проведении прецизионных спектральных экспериментов, включая эксперименты в области квантовой электродинамики. Излучатели фотонных пар, запутанных по поляризации, также могут быть важным ресурсом для реализации ряда протоколов квантовой криптографии и квантовых вычислений. Результаты последних лет убеждают, что эффективные ИОФ и ИФП могут реализоваться в рамках полупроводниковых технологий.

Цель данного исследования — показать принципы работы сверхминиатюрных полупроводниковых излучателей, привести результаты исследований характеристик излучателей, представить ИОФ на основе квантовых точек $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ и одномодовых ЛВР с генерационной длиной волны 794,8 нм для миниатюрных квантовых стандартов частоты с использованием Rb^{87} .

Излучатели одиночных фотонов на основе квантовых точек $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$. Излучатели одиночных фотонов и излучатели фотонных пар, запутанных по поляризации, — ключевые элементы разрабатываемых квантовых оптических информационных систем и систем квантовой криптографии [2, 3]. Одним из перспективных вариантов практической реализации данных излучателей является использование самоорганизованных полупроводниковых квантовых точек (КТ) [5–9].

На основе одиночных полупроводниковых КТ разрабатываются эффективные полностью твердотельные ИОФ как с оптической, так и с токовой накачкой [10–12]. Одиночные КТ могут являться 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 естественную ширину экситонных уровней $\Gamma_X = \hbar/\tau_X$, где τ_X — время жизни экситона [5, 13–16].

К настоящему времени наиболее изученной является система InAs квантовых точек, уникальной особенностью которой является широкий спектральный диапазон, достигающий ~ 400 нм, включающий в себя первый и второй телекоммуникационные стандарты ($\sim 0,9$ мкм, 1,3 мкм). На примере одиночных КТ InAs продемонстрировано однофотонное излучение и излучение пар запутанных фотонов на длинах волн вблизи первого телекоммуникационного стандарта [5, 8, 10–16].

Расширение спектрального диапазона излучения КТ в коротковолновую область представляет интерес как для исследований физики новых низкоразмерных полупроводниковых систем, так и для создания источников излучения систем атмосферной или аэрокосмической квантовой криптографии. Оптимальным участком длин волн для таких систем признан участок вблизи 770 нм [3], что обусловлено максимальной чувствительностью кремниевых фотоприёмников в данном диапазоне, минимальным поглощением атмосферного слоя и минимальными флуктуациями локального показателя преломления воздушной среды, что необходимо для сохранения поляризации фотонов.

Нами исследованы механизмы формирования и оптические характеристики квантовых точек на основе твёрдых растворов $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$. Использование широкозонных твёрдых растворов $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ в качестве основы КТ позволяет существенно расширить спектральный диапазон излучения в коротковолновую область, включая участок длин волн вблизи 770 нм, представляющий интерес для разработки аэрокосмических систем квантовой криптографии.

Исследованные структуры $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ КТ выращивались на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) Ribier C21 на подложках GaAs с ориентацией (001) [15]. Были изучены КТ $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ с составом в интервале $x = 0–0,3$ с шагом 0,05. Структуры $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ КТ исследовались методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и фотолюминесценции. На рис. 1, *a* приведена АСМ-топограмма структуры $\text{Al}_{0,1}\text{In}_{0,9}\text{As}$ КТ, плотность КТ составляет $d \approx 8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. На рис. 1, *b* горизонтальными отрезками обозначен спектральный диапазон излучения КТ $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ различного состава. Данные получены из спектров макрофотолюминесценции, записанных при $T = 295 \text{ К}$ (площадь пятна возбуждающего $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера с $\lambda = 532 \text{ нм}$ на поверхности структуры составляла 3000 мкм^2). Полученные результаты демонстрируют существенное расширение спектрального диапазона излучения КТ в коротковолновую область (до 200 нм), включая участок длин волн вблизи 770 нм, представляющий интерес для создания атмосферных систем квантовой криптографии.

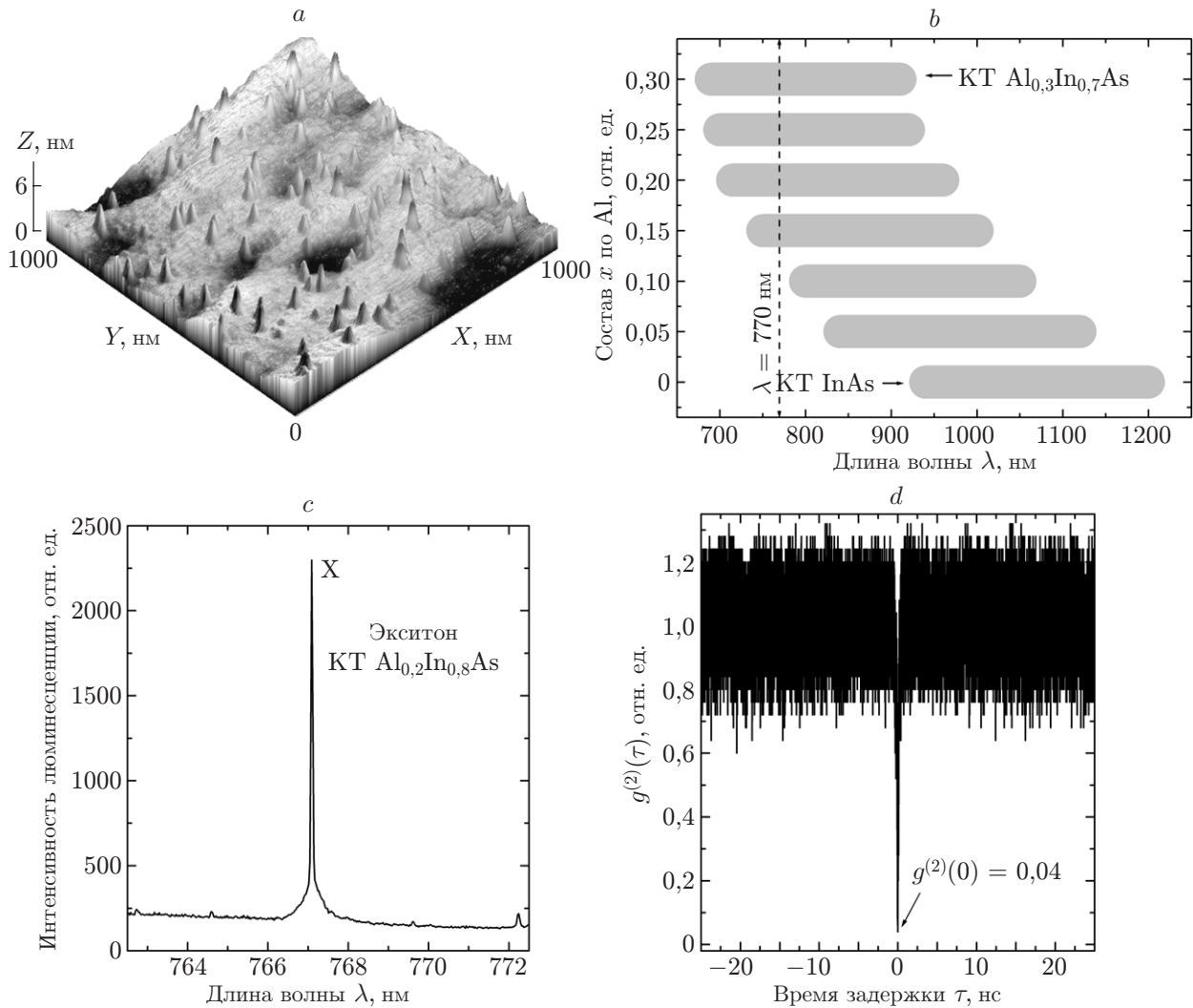


Рис. 1. Характеристики излучателей одиночных фотонов: АСМ-топограмма структуры КТ $\text{Al}_{0,1}\text{In}_{0,9}\text{As}$ (a), спектральный диапазон излучения КТ $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ различного состава при $T = 295 \text{ К}$ (b), спектр микролюминесценции одиночной КТ $\text{Al}_{0,2}\text{In}_{0,8}\text{As}$ при $T = 10 \text{ К}$ (c), зависимость $g^{(2)}(\tau)$, демонстрирующая субпуассоновский тип статистики излучения КТ (d)

Разработанный излучатель одиночных фотонов является резонатором Фабри — Перо с резонансной длиной волны $\sim 770 \text{ нм}$, образован двумя брэгговскими зеркалами с числом периодов $N_{\text{bot}} = 17$ (нижнее зеркало) и $N_{\text{top}} = 3$ (верхнее выходное зеркало). Период брэгговских зеркал образован $\lambda/4$ слоями $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ (55 нм) и $\text{Al}_{0,94}\text{Ga}_{0,06}\text{As}$ (63 нм). Между зеркалами располагается 1λ слой $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$, в середине которого выращивается слой КТ $\text{Al}_{0,2}\text{In}_{0,8}\text{As}$ низкой плотности. Резонатор имеет добротность $Q \approx 10^2$ и ширину резонанса $\Gamma \approx 10 \text{ нм}$. Наличие резонатора заметно повышает внешнюю квантовую эффективность излучателя, а также позволяет уверенно адресоваться к одиночной КТ при острой фокусировке возбуждающего лазерного излучения. Для исследования разработанных ИОФ применялась методика криогенной микрофотолуминесценции. Площадь пятна возбуждающего лазера на поверхности структуры составляла 3 мкм^2 , использовалось излучение $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ -лазера с длиной волны 700 нм, работающего в непрерывном

режиме. Излучение регистрировалось с помощью тройного монохроматора TriVista-555 с охлаждаемой ПЗС-матрицей Si-фотоприёмников. Статистика излучения анализировалась с использованием интерферометра Хэнбери Брауна — Твисса (ХБТ), который был собран по классической схеме [5, 8]. Излучение КТ, проходя первый монохроматор TriVista-555, направлялось на светоделительную неполяризирующую призму 50/50 ССМ1-BS014, которая разделяла падающий световой поток строго поровну. Излучение в каждом из каналов регистрировалось счётчиками фотонов на основе лавинных фотодиодов PerkinElmer SPCM-AQRH-15. Статистика излучения КТ анализировалась с помощью счётчика совпадений PicoNap 300.

Интерпретация пиков микрофотолюминесценции одиночных КТ проводилась с использованием зависимостей интенсивностей пиков от мощности излучения возбуждающего лазера. При наименьших мощностях возбуждения в спектрах люминесценции в первую очередь проявляются пики экситонов X и зависимость их интенсивности от мощности линейна. При больших мощностях в спектрах появляются пики биэкситонов XX, интенсивность которых возрастает по квадратичному закону от плотности мощности лазера [5, 8]. На рис. 1, *c* представлен спектр микролюминесценции одиночной КТ $\text{Al}_{0,2}\text{In}_{0,8}\text{As}$, находящейся в брэгговском микрорезонаторе, записанный при $T = 10$ К и мощности возбуждающего лазера $P_i = 15$ мВт. В спектре доминирует пик с длиной волны $\lambda \approx 767$ нм, относящийся к рекомбинации экситонного состояния одиночной КТ $\text{Al}_{0,2}\text{In}_{0,8}\text{As}$.

Статистика излучения КТ анализировалась на основе измерения парных фотонных корреляций, получаемых с помощью интерферометра ХБТ. Нами измерялся коррелятор второго порядка или коррелятор интенсивностей I :

$$g^2(\tau) = \frac{\langle I_1(t)I_2(t + \tau) \rangle}{\langle I_1(t) \rangle \langle I_2(t) \rangle}. \quad (1)$$

В (1) угловые скобки означают усреднение по ансамблю, τ — время задержки в регистрируемой паре фотонов, задаваемое электронным блоком интерферометра ХБТ.

При пуассоновской статистике излучения $g^2(\tau) = 1$, что означает полное отсутствие корреляции излучения фотонов [5, 8]. Для суперпуассоновского излучения, где проявляется эффект группировки (bunching) фотонов, $1 < g^2(\tau) < 2$. При субпуассоновской статистике излучения (разгруппировка фотонов (antibunching)) $g^2(\tau) < 1$. В идеальном случае, когда рассматриваются однофотонные фоковские состояния и задержка регистрации пар фотонов $\tau = 0$, интерферометр ХБТ не регистрирует совпадений: $g^2(0) = 0$.

На рис. 1, *d* представлена зависимость $g^2(\tau)$, измеренная для экситонного пика излучения одиночной КТ (рис. 1, *c*). При $\tau = 0$ зависимость $g^2(\tau)$ имеет ярко выраженный минимум: $g^2(0) \approx 0,04$, что указывает на субпуассоновский тип статистики излучения одиночной КТ $\text{Al}_{0,2}\text{In}_{0,8}\text{As}$.

Лазеры с вертикальным резонатором для миниатюрных квантовых стандартов частоты. Лазерам с вертикальным резонатором принадлежит ряд абсолютных мировых рекордов в области всей, а не только полупроводниковой, лазерной техники [1, 17–19]. К числу этих рекордов относится минимальный пороговый ток лазерной генерации — единицы мкА. Лазеры с вертикальным резонатором — самые миниатюрные коммерческие лазеры, разработанные к настоящему времени. К числу мировых достижений относится и рекордно высокая частота токовой модуляции лазерного излучения — десятки ГГц, что имеет первостепенное значение при разработке быстродействующих оптических информационных систем.

Принцип работы полупроводниковых ЛВР такой же, как и у обычных полосковых полупроводниковых лазеров: в обоих типах лазеров используется резонатор Фабри — Перо и квантовое усиление в активной области достигается за счёт инжекции и рекомбинации электронов и дырок в этой области. Принципиальное отличие лазеров заключается

в способе формирования лазерного резонатора. Полупроводниковый полосковый лазер содержит резонатор Фабри — Перо, образованный двумя зеркалами, полученными путём скола полупроводниковой пластины вдоль кристаллографических направлений типа [110]. Таким образом, ось резонатора лежит в плоскости полупроводниковой пластины и излучение лазера также параллельно плоскости исходной пластины. В полупроводниковом ЛВР резонатор Фабри — Перо образован двумя брэгговскими зеркалами, которые формируются в едином технологическом процессе роста лазерной структуры или же в постростовых технологических процессах. Слои брэгговских зеркал расположены параллельно исходной подложке, а ось резонатора и направление излучения перпендикулярны (вертикальны) по отношению к плоскости полупроводниковой пластины, что и определяет название лазеров — лазер с вертикальным резонатором.

К настоящему времени разработано большое количество многообразных ЛВР, в которых используются различные типы активных областей, различные варианты брэгговских зеркал, различные схемы инжекции носителей заряда в активную область [1, 17–19]. Два брэгговских зеркала составляют резонатор лазера. Такие брэгговские зеркала, как правило, образованы полупроводниковыми четвертьволновыми слоями с чередующимися показателями преломления (например, $\lambda/4$ слоями GaAs и слоями AlGaAs). Между брэгговскими зеркалами лазера расположены полупроводниковые слои, содержащие активную область лазера. Активная область ЛВР содержит обычно одну или несколько полупроводниковых квантовых ям. В целях достижения высокой внутренней квантовой эффективности активные области не легируются. В случае если в лазере применяются полупроводниковые брэгговские зеркала, инжекция носителей заряда в активную область может осуществляться непосредственно через зеркала, для чего в одном из зеркал (как правило, верхнем) используется p -тип легирования, в другом (нижнем) — n -тип легирования, и в целом лазер представляет собой $p-i-n$ -структуру.

Апертура ЛВР также может задаваться различными способами. В настоящее время широкое распространение получил технологический приём, позволяющий селективно окислять слои AlGaAs, в результате чего формируется слой стабильного окисла AlGaO, который и используется для создания токовых и оптических апертур ЛВР [17–19]. Кольцо окисла AlGaO располагается непосредственно над активной областью ЛВР и формирует эффективную токовую и оптическую апертуру лазера, размеры которой могут варьироваться в необходимых пределах (от единиц до десятков мкм). Типичный размер апертуры ЛВР составляет ~ 5 – 10 мкм, что определяет заметно меньшую расходимость лазерного излучения (единицы градусов) в сравнении с полосковыми лазерами, где расходимость излучения составляет десятки градусов в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу. При оксидных апертурах $A \leq 3$ мкм ЛВР может работать в устойчивом одномодовом режиме [1, 17–19].

Полная ЛВР-структура формируется в едином технологическом процессе выращивания с использованием методик молекулярно-лучевой эпитаксии или металлорганической эпитаксии. Постростовой технологический процесс является стандартным: он содержит стадии формирования мезаструктур (жидкостное или плазменное травление), селективного окисления в целях создания оксидной апертуры лазера, пассивации и планаризации структуры, металлизации и формирования омических контактов.

Как уже отмечалось, одним из перспективных вариантов применения ЛВР является его использование в качестве источника излучения в миниатюрных квантовых стандартах частоты нового поколения [20–24]. Далее будут представлены результаты разработки одномодовых ЛВР с длиной волны 794,8 нм, перспективных для использования в миниатюрных атомных стандартах частоты, работающих на переходах $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ атомов Rb⁸⁷.

Разработанный нами лазер представляет собой многослойную полупроводниковую структуру на основе твёрдого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, содержащую в общей сложности 1156 слоёв $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ различного состава. Два полупроводниковых распределённых брэгговских отражателя (РБО) образуют резонатор лазера. Между брэгговскими зеркалами лазера расположены полупроводниковые слои суммарной толщиной λ , содержащие активную область лазера. Активная область ЛВР содержит три нелегированные квантовые ямы $\text{Al}_{0,07}\text{Ga}_{0,93}\text{As}$ 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 легирования и нижнее зеркало n -типа легирования. В лазере используется оксидная апертура AlGaO_x , которая формируется в процессе селективного окисления слоя $\text{Al}_{0,98}\text{Ga}_{0,02}\text{As}$ 49 нм. Апертура располагается непосредственно над активной областью и обеспечивает эффективное токовое и оптическое ограничение в ЛВР. Период брэгговских зеркал состоит из $\sim\lambda/4$ слоёв $\text{Al}_{0,94}\text{Ga}_{0,06}\text{As}$ и $\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}$, на границах которых располагаются интерфейсные вставки, образованные тонкими слоями $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 2 нм переменного состава. Интерфейсные вставки используются для снижения омического сопротивления брэгговских зеркал. Верхнее брэгговское зеркало содержит 28 периодов, а нижнее зеркало — 35,5

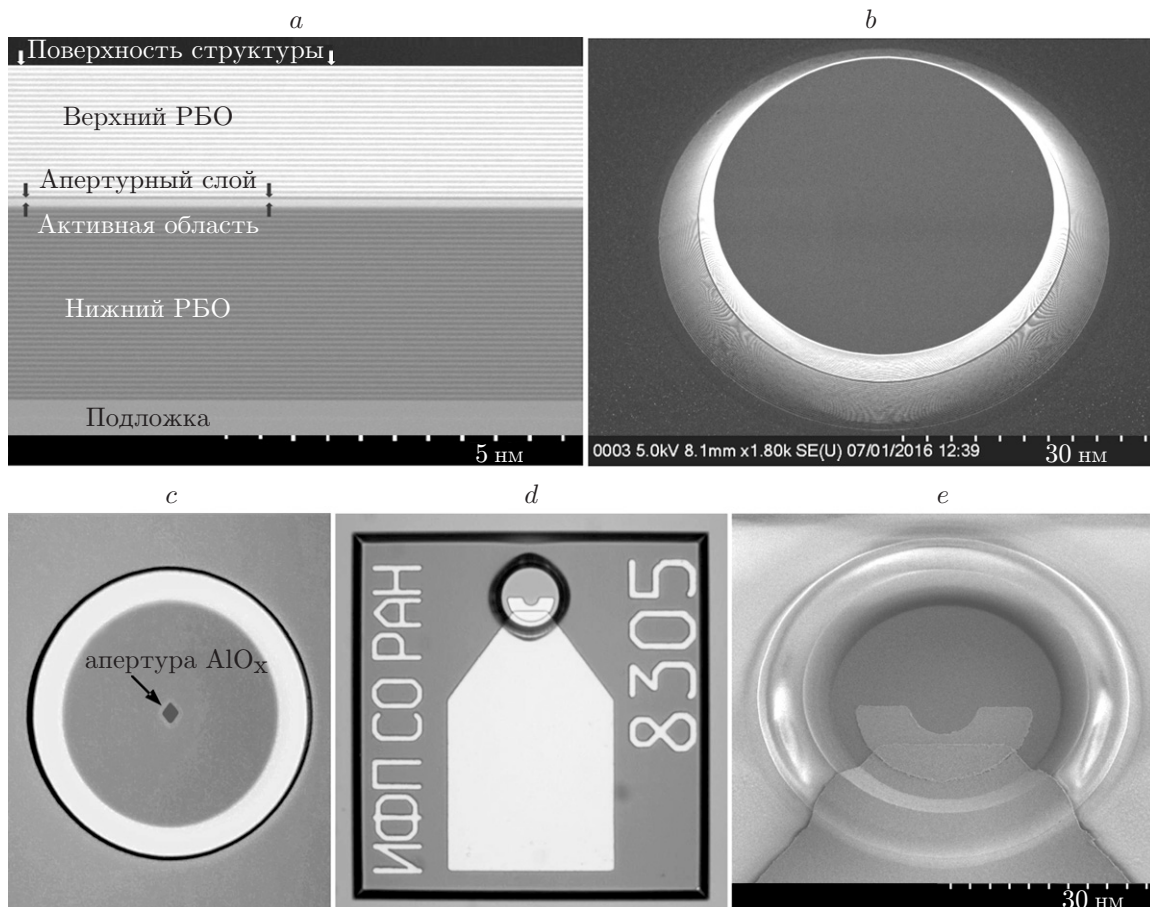


Рис. 2. Стадии изготовления ЛВР: *a* — исходная ЛВР-структура, выращенная методом МЛЭ (данные СЭМ); *b* — лазерная мезаструктура (данные СЭМ); *c* — микрофотография AlO_x -апертуры, меньшая диагональ ромба $A \approx 3$ мкм; *d* — полностью завершённые ЛВР-структуры: микрофотография лазерного чипа 300×300 мкм и *e* — СЭМ-изображение лазерной мезы

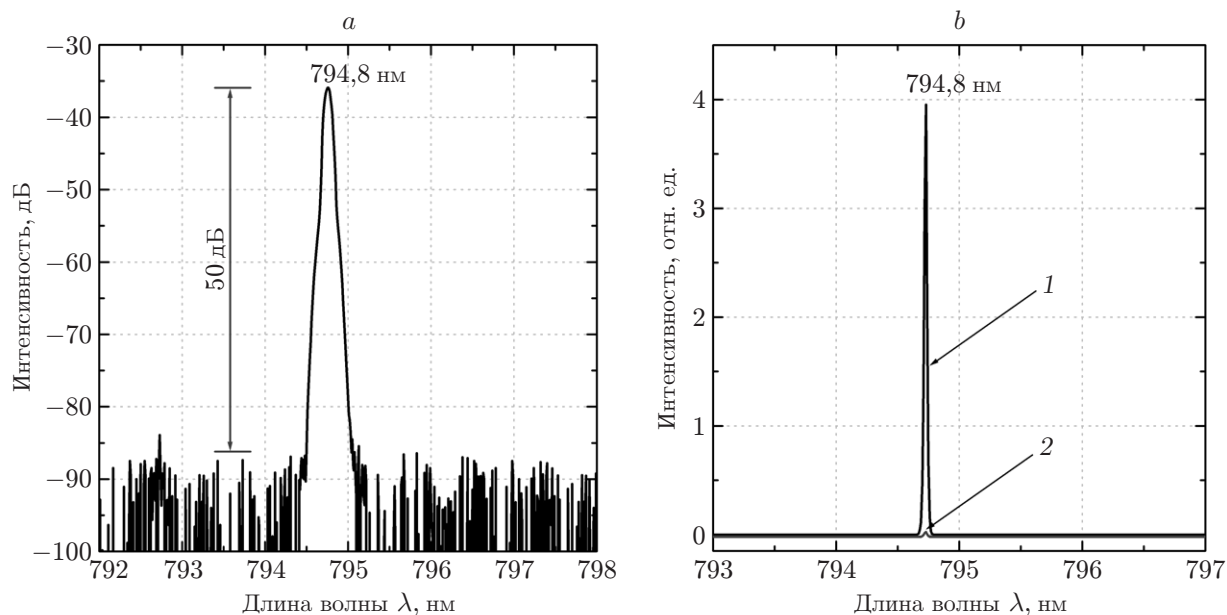


Рис. 3. Спектры излучения ЛВР при токе накачки $I = 1,5$ мА и $T = 48$ °С: в логарифмическом (а) и линейном (б) масштабах. Поляризация лазерного излучения ориентирована вдоль кристаллографического направления $[110]$ (кривая 1), поляризатор ориентирован вдоль кристаллографического направления $[\bar{1}\bar{1}0]$ (кривая 2)

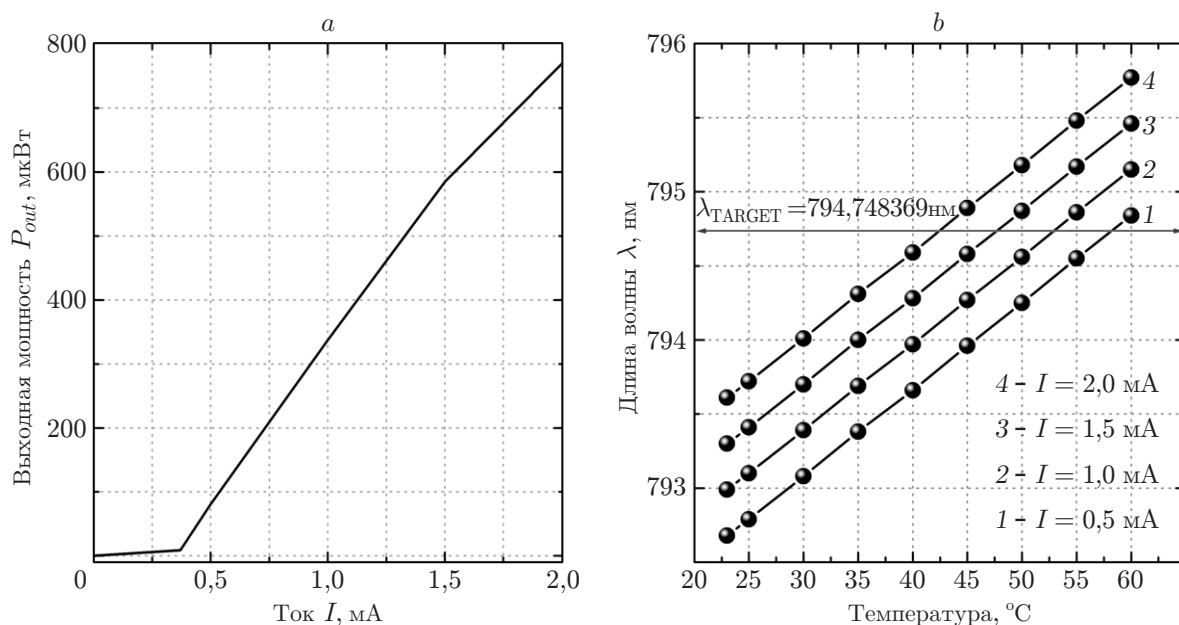


Рис. 4. Генерационные характеристики лазера: ватт-амперная характеристика ЛВР при $T = 23$ °С (а), зависимости длины волны ЛВР от температуры и тока накачки (б)

периодов, что задаёт высокий уровень коэффициентов отражения зеркал (99,7 и 99,9 % соответственно). Это обеспечивает высокую добротность микрорезонатора, низкий уровень порогового усиления, низкий уровень пороговых и рабочих токов ЛВР.

Различные стадии изготовления ЛВР представлены на рис. 2. Исходная лазерная структура выращивалась на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) Ribier C21 на подложках n -GaAs(001). 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 %. 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 ~ 6 мкм (рис. 2, *b*). 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 $T = 420$ °C (рис. 2, *c*). Дальнейшие технологические операции заключались в нанесении диэлектриков и формировании металлических контактных областей. Завершённые лазерные структуры изображены на рис. 2, *d*, *e*.

Генерационные характеристики изготовленных ЛВР представлены на рис. 3, 4. Исследование спектральных характеристик лазеров (рис. 3) 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 составляет ~ 50 дБ (рис. 3, *a*).

Лазеры характеризуются низким уровнем порогового тока $I_{th} \approx 0,37$ мА, квантовая эффективность ЛВР $\eta_{slope} = 0,51$ мВт/мА (рис. 4, *a*).

Точная подстройка длины волны ЛВР под рабочий переход $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ атомов Rb^{87} осуществляется путём изменения внешней температуры и за счёт изменения уровня инжекции, которая также меняет температурный режим работы лазера. На рис. 4, *b* приведены зависимости длины волны лазерного излучения от температуры и тока накачки. Температурный коэффициент изменения длины волны лазерного излучения составляет $d\lambda/dT = 0,059$ нм/град, что находится в хорошем соответствии с литературными данными [1, 17–19].

Совокупность представленных экспериментальных результатов (устойчивый одномодовый режим работы с выходной мощностью $\sim 0,5$ мВт при малых рабочих токах $\sim 1,5$ мА, требуемая длина волны излучения 794,8 нм и возможность её точной подстройки за счёт изменения температуры и тока инжекции) демонстрирует большие возможности использования разработанных лазеров в миниатюрных квантовых стандартах частоты на основе Rb^{87} .

Заключение. Таким образом, в данной работе кратко сформулированы принципы функционирования миниатюрных излучателей на основе полупроводниковых наноструктур. Приведены результаты исследований характеристик излучателей, разработанных и изготовленных в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН в течение последних трёх лет. Представлены результаты разработки излучателей одиночных фотонов на основе квантовых точек $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$. С использованием интерферометра Хэнбери Брауна — Твисса установлен ярко выраженный субпуассоновский характер статистики излучения экситонных состояний ($g^2(0) \approx 0,04$), что является прямым подтверждением возможности создания эффективных излучателей одиночных фотонов для аэрокосмических систем квантовой криптографии на основе квантовых точек $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$. Разработаны и изготовлены одномодовые лазеры с вертикальным резонатором с длиной волны 794,8 нм,

представляющие интерес для использования в миниатюрных квантовых стандартах частоты на основе Rb^{87} .

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. **Bouwmeester D., Ekert A. K., Zeilinger A.** The Physics of Quantum Information. Berlin: Springer, 2000. 314 p.
3. **Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H.** Quantum cryptography // *Rev. Modern Phys.* 2002. **74**, N 1. P. 145–195.
4. **Walls D. F., Milburn G. J.** Quantum Optics. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 437 p.
5. **Single Semiconductor Quantum Dots** /Ed. P. Michler. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 389 p.
6. **Bimberg D., Grundmann M., Ledentsov N.** Quantum Dot Heterostructures. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 328 p.
7. **Semiconductor Nanostructures** /Ed. D. Bimberg. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 357 p.
8. **Single Quantum Dots, Fundamentals, Applications and New Concepts** /Ed. P. Michler. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 347 p.
9. **Self-Assembled Quantum Dots** /Ed. Z. M. Wang. N. Y.: Springer Science+Business Media, LLC, 2008. 463 p.
10. **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.
11. **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.
12. **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.
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. P. 040503.
15. **Gaisler A. V., Derebezov I. A., Gaisler V. A. et al.** AllInAs quantum dots // *JETP Lett.* 2017. **105**, N 2. P. 103–109.
16. **Gaisler A. V., Yaroshevich A. S., Derebezov I. A. et al.** Fine structure of the exciton states in InAs quantum dots // *JETP Lett.* 2013. **97**, N 5. P. 274–278.
17. **Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Design, Fabrication, Characterization and Application** /Ed. C. W. Wilmsen, H. Temkin H., L. Coldren. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 455 p.
18. **Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Technology and Applications** /Ed. J. Cheng, N. K. Dutta. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2000. 323 p.
19. **Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Devices** /Ed. H. E. Li, K. Iga. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 386 p.
20. **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**. P. 2351–2353.
21. **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.

22. **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.
23. **Tan B., Tian Y., Lin H. et al.** Noise suppression in coherent populationtrapping atomic clock by differential magneto-optic rotation detection // Opt. Lett. 2015. **40**, N 16. P. 3703–3706.
24. **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.

Поступила в редакцию 29.06.2020

После доработки 20.07.2020

Принята к публикации 20.07.2020
