Квантовая оптика и квантовые технологии

Редактор тематического выпуска
докт. физ.-мат. наук **М. В. Якушев**

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2024, том 88, № 9, с. 1466–1472

УДК 621.315.592

ДЕТЕКТОРЫ И ИЗЛУЧАТЕЛИ ФОТОНОВ ДЛЯ СИСТЕМ КВАНТОВОЙ СВЯЗИ И КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

© 2024 г. В. В. Преображенский[1], *, И. Б. Чистохин[1], И. И. Рябцев[1], В. А. Гайслер[1], А. И. Торопов[1]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики полупроводников имени А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук», Новосибирск, Россия

**E-mail: pvv@isp.nsc.ru*

Поступила в редакцию 11.04.2024
После доработки 24.04.2024
Принята к публикации 31.05.2024

Представлен краткий обзор результатов, полученных в Институте физики полупроводников СО РАН, в области разработки детекторов и излучателей фотонов, перспективных для использования в системах квантовой криптографии и миниатюрных квантовых стандартах частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей.

Ключевые слова: квантовая криптография, лавинный фотодиод Гейгера, полупроводниковые квантовые точки, экситон, излучатели одиночных фотонов, поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором, миниатюрные квантовые стандарты частоты

DOI: 10.31857/S0367676524090193, **EDN:** OCSNMK

ВВЕДЕНИЕ

Новейшие разработки в области полупроводниковой оптоэлектроники открывают перспективы создания высокопроизводительных оптических информационных систем, систем квантовой криптографии, миниатюрных квантовых стандартов частоты. Ключевыми элементами данных систем являются эффективные детекторы и излучатели одиночных фотонов, а также миниатюрные лазерные излучатели, используемые в квантовых стандартах частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей.

В системах квантовой криптографии передача секретной информации осуществляется посредством квантовых объектов – одиночных фотонов, при этом абсолютная секретность передачи обеспечивается законами квантовой механики: одиночные фотоны не могут быть перехвачены и измерены с абсолютной достоверностью [1–3]. С помощью одиночных фотонов в квантовом канале (оптоволоконной или атмосферной линии связи) генерируется только секретный двоичный ключ, который затем однократно используется отправителем и получателем в симметричной криптосистеме, а само зашифрованное сообщение может передаваться по любому открытому каналу [4]. Для полной секретности генерации квантового ключа требуется присутствие не более одного фотона в каждом световом импульсе, поэтому к фотодетекторам приемного узла предъявляются высокие требования. Основными требованиями к детекторам одиночных фотонов в оптоволоконных квантовых линиях связи являются: высокая квантовая эффективность счета (>15%) в спектральном диапазоне 1.3–1.55 мкм, низкий уровень темновых шумов (<50 кГц), достаточно высокое быстродействие, малые размеры и низкое энергопотребление [4]. В отличие от фотоэлектронных умножителей (имеющих низкую квантовую эффективность <1%) и сверхпроводниковых детекторов (требующих охлаждения до гелиевых температур) [5], оптимальным выбором являются полупроводниковые однофотонные лавинные фотодиоды (ОЛФД), имеющие достаточно высокую квантовую эффективность (15–20%) и уровень шумов <50 кГц при их охлаждении термоэлектрическими микрохолодильниками Пельтье до температуры 210–230 K.

Одним из перспективных вариантов реализации излучателей одиночных фотонов (ИОФ) для систем квантовой криптографии является использование самоорганизованных полупроводниковых квантовых точек (КТ) [4, 6–10]. На основе одиночных полупроводниковых КТ разрабатываются эффективные полностью твердотельные ИОФ, как с оптической, так и с токовой накачкой. К настоящему моменту 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 (~0.9 мкм, 1.3 мкм). Расширение спектрального диапазона излучения квантовых точек 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 данных систем признан участок вблизи 770 нм [4], что обусловлено максимальной чувствительностью кремниевых фотоприемников в данном диапазоне, минимальным поглощением атмосферного слоя и минимальными флуктуациями локального показателя преломления воздушной среды, что необходимо для сохранения поляризации фотонов. Практическая реализация ИОФ для данного спектрального диапазона может быть осуществлена с использованием КТ на основе широкозонных полупроводниковых материалов, например твердых растворов $Al_xIn_{1-x}As$.

Полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР) являются одним из ключевых элементов современных и перспективных оптических информационных систем, что обусловлено уникальными характеристиками данного типа излучателей [11–14]. ЛВР является наиболее миниатюрным (объем резонатора единицы мкм^3), экономичным (пороговые и рабочие токи единицы мА) и быстродействующим (частота токовой модуляции десятки ГГц) полупроводниковым лазерным излучателем, разработанным к настоящему моменту времени. Лазеры данного типа находят все более широкое применение в быстродействующих оптических системах передачи данных и сенсорных устройствах. Одним из перспективных вариантов применения ЛВР является его использование в качестве излучателя в миниатюрных квантовых стандартах частоты (КСЧ), работающих на основе эффекта когерентного пленения населённостей (КСЧ-КПН) [15–21].

Миниатюрные КСЧ-КПН с характерным размером единицы сантиметров, обеспечивающие относительную погрешность задания частоты на уровне 10^{-10}–10^{-12}, позволят существенно улучшить характеристики большого числа телекоммуникационных и навигационных устройств.

В данной статье представлены результаты Института физики полупроводников СО РАН (ИФП СО РАН) по разработке InP/InGaAs/InP однофотонных лавинных фотодиодов и AlInAs излучателей одиночных фотонов для систем квантовой криптографии, а также AlGaAs лазеров с вертикальным резонатором для миниатюрных квантовых стандартов частоты.

ДЕТЕКТОРЫ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ INP/INGAAS/INP

Разработан однофотонный лавинный фотодиод (ОЛФД) на основе твердых растворов $In_{0.53}Ga_{0.47}As$, согласованных по постоянной кристаллической решетки с подложкой In P. Структура ОЛФД содержит раздельные области поглощения фотонов и умножения носителей зарядов. На рис. 1 показано поперечное сечение разработанной и запатентованной [22, 23] конструкции ОЛФД, где ввод светового излучения осуществляется с планарной стороны. ОЛФД представляет собой структуру фотодиода круглого сечения с диаметром рабочей площадки 20 мкм.

Электрон-дырочные пары, фотогенерированные в поглощающем слое $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ (ширина

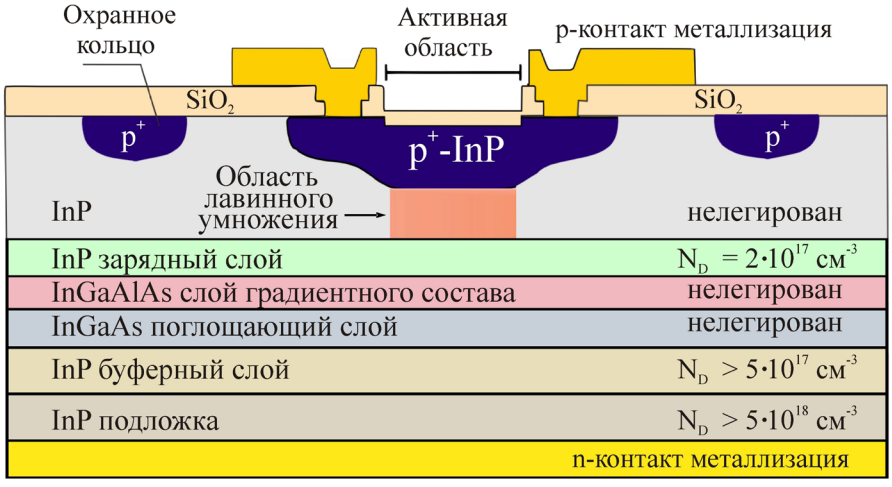

Рис. 1. Конструкция разработанного ОЛФД.

запрещенной зоны $E_g \approx 0.75$ эВ при $T = 295$ K), разделяются под действием приложенного электрического поля. Дырки дрейфуют в область лавинного умножения широкозонного InP (ширина запрещенной зоны $E_g \approx 1.35$ эВ при $T = 295$ K), где при достижении электрического поля около 450 кВ/см, подобно триггеру, возникает импульс лавинного тока. Между поглощающим слоем и областью умножения располагается зарядный слой, предназначенный для формирования сильного электрического поля в области лавинного умножения и слабого электрического поля в поглощающем слое. Слой градиентного состава InGaAlAs предназначен для уменьшения эффекта захвата дырок, связанных с разрывом валентной зоны на 0.6 эВ.

При выборе толщины поглощающего слоя необходим оптимум между величиной приемлемой квантовой эффективности и быстродействием, определяемым временем пролета. Для регистрации одиночных фотонов оптимальным является диапазон толщин поглощающего слоя InGaAs 1–2 мкм, при этом поглощение составляет более 75%. Уровень легирования в области поглощения должен быть минимален. Фоновое значение концентрации определяется возможностями метода молекулярно-лучевой эпитаксии и находится в диапазоне $(0.5–1)\times10^{15}$ см$^{-3}$. Для обеспечения высокого быстродействия ОЛФД электрическое поле в поглощающем слое InGaAs должно быть не менее 10 кВ/см, но не более 100 кВ/см из-за вероятности возникновения большого туннельного тока.

Оптимальная толщина слоя лавинного умножения (определяет вероятность туннельной генерации из ловушек и однородность электрического поля) должна быть около 1 мкм при уровне легирования менее $(1–2)\times10^{15}$ см$^{-3}$. Оптимальная толщина зарядного слоя n- InP составляет 150–250 нм при концентрации 1×10^{17} см$^{-3}$, что соответствует напряжению пробоя 65–45 В.

Выращивание гетероструктур InP/InGaAs/InP для ОЛФД было выполнено методом молекулярно-лучевой эпитаксии, который обеспечивает предельно высокое качество как самих пленок, так и границ раздела между ними.

Ключевым параметром, которым определяется величина темнового тока вблизи напряжения пробоя в ОЛФД, является уровень концентрации фоновых примесей и глубоких центров в поглощающем слое InGaAs и слое лавинного умножения InP полупроводниковой гетероструктуры. В результате оптимизации были найдены параметры роста, при которых были получены слои n-типа $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ с концентрацией 6×10^{14} см$^{-3}$ и слои n-типа InP с концентрацией 1.2×10^{15} см$^{-3}$.

Чипы ОЛФД изготавливались методом планарной технологии. Требуемый профиль легирования p-области прибора в верхнем i-слое InP формировался в однократном диффузионном процессе цинка, согласно собственной разработанной технологии [22].

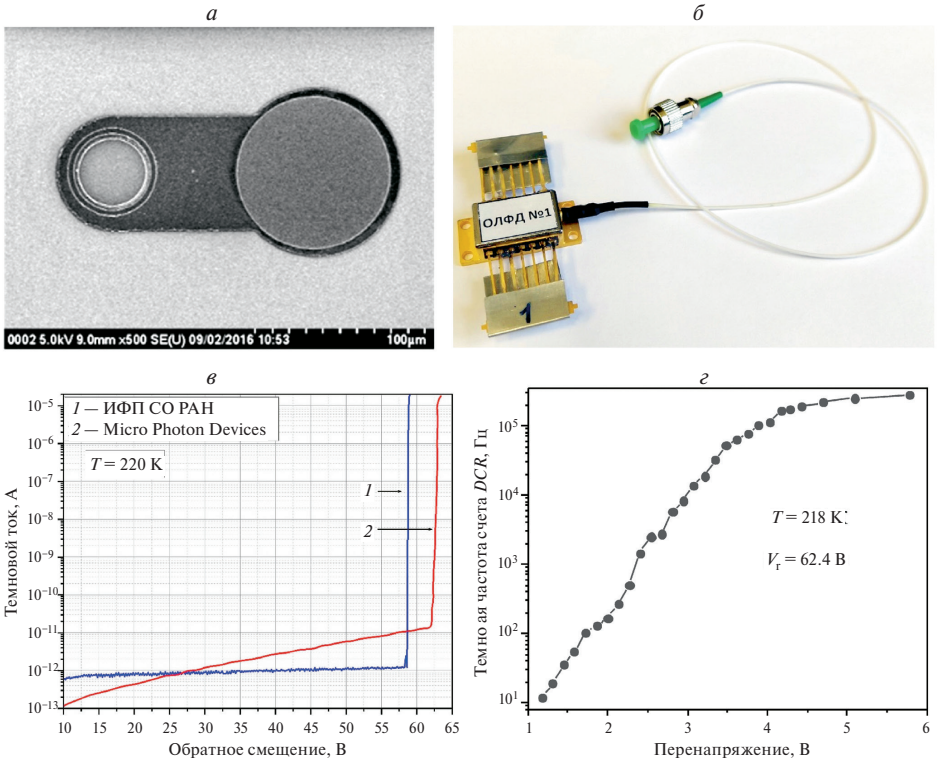

Рис. 2. Внешний вид чипа ОЛФД, слева рабочая площадка, справа контактная площадка (*а*), модуль ОЛФД (*б*), темновые вольтамперные характеристики образцов ОЛФД (*в*), зависимость темновой частоты счета *DCR* от величины перенапряжения V_b (*г*).

Внешний вид чипа и модуля ОЛФД представлены на рис. 2*а* и 2*б*. На рис. 2*в* приведены сравнительные темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов ОЛФД Института физики полупроводников СО РАН и фирмы Micro Photon Devices (Италия) [24], измеренные при рабочей температуре $T = 220$ K. Следует отметить, что достигнутый уровень темнового тока ($\sim 1.2\times10^{-12}$ А) для ОЛФД ИФП СО РАН вблизи напряжения пробоя примерно на порядок меньше темнового тока ОЛФД фирмы Micro Photon Devices, что говорит о высоком качестве разработанного устройства.

На рис. 2*г* приведена зависимость темновой частоты счета (*DCR*) от величины перенапряжения V_b над пробоем в гейгеровском режиме. Видно, что в диапазоне перенапряжения от 1 до 3.5 В частота *DCR* имеет величину менее 50 кГц. Таким образом, достигнутые параметры разработанного образца ОЛФД не уступают зарубежным аналогам.

ИЗЛУЧАТЕЛИ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК AlInAs

Исследованные структуры $Al_xIn_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$ КТ выращивали на установке молекулярно – лучевой эпитаксии (МЛЭ) «Riber C21» на подложках GaAs с ориентацией (001) [25]. Были изучены $Al_xIn_{1-x}As$ КТ с составом в интервале $x = 0$–0.3 с шагом 0.05. Структуры $Al_xIn_{1-x}As$ КТ исследовали методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и фотолюминесценции. На рис. 3*а* приведена АСМ – топограмма структуры с $Al_{0.1}In_{0.9}As$ КТ, плотность КТ составляет $d \approx 8\times10^9$ см$^{-2}$. На рис. 3*б* горизонтальными отрезками обозначен спектральный диапазон излучения $Al_xIn_{1-x}As$ КТ различного состава. Данные получены из спектров фотолюминесценции, записанных при $T = 295$ K (площадь пятна возбуждающего Nd: YAG лазера с $\lambda = 532$ нм на поверхности структуры составляла 3000 мкм^2). Представленные данные демонстрируют существенное расширение спектрального диапазона излучения КТ в коротковолновую область (до 200 нм), включая участок длин волн вблизи 770 нм.

Разработанный излучатель одиночных фотонов (ИОФ) представляет собой резонатор Фабри–Перо с резонансной длиной волны ~770 нм, он образован двумя брэгговскими зеркалами с числом периодов $N_{bot} = 17$ (нижнее зеркало) и $N_{top} = 3$ (верхнее, выходное зеркало). Период брэгговских зеркал образован $\lambda/4$-слоями $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ (55 нм) и $Al_{0.94}Ga_{0.06}As$ (63 нм). Между зеркалами располагается 1λ-слой $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, в середине которого выращивается слой $Al_{0.2}In_{0.8}As$ КТ низкой плотности. Резонатор имеет добротность $Q \approx 10^2$, а ширина резонанса составляет $\Gamma \approx 10$ нм. Наличие резонатора заметно повышает внешнюю квантовую эффективность излучателя, а также позволяет

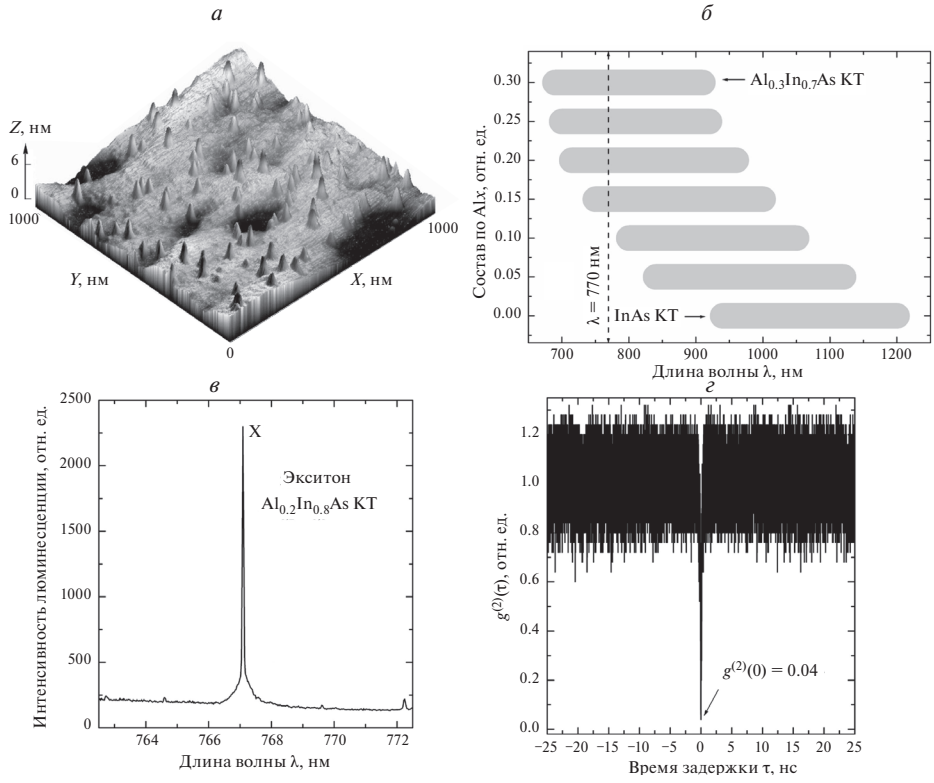

Рис. 3. АСМ – топограмма структуры с $Al_{0.1}In_{0.9}As$ КТ (*а*), спектральный диапазон излучения $Al_xIn_{1-x}As$ КТ различного состава при $T = 295$ K (*б*), спектр микролюминесценции одиночной $Al_{0.2}In_{0.8}As$ КТ при $T = 10$ K (*в*), зависимость $g^2(\tau)$, демонстрирующая субпуассоноский тип статистики излучения КТ (*г*).

уверенно адресоваться к одиночной КТ при острой фокусировке возбуждающего лазерного излучения. Для исследования разработанных ИОФ использовали методику криогенной микрофотолюминесценции. Площадь пятна возбуждающего лазера на поверхности структуры составляла 3 мкм^2, использовалось излучение Ti: Al_2O_3 лазера с длиной волны 700 нм, работающего в непрерывном режиме. Излучение регистрировали с помощью тройного монохроматора TriVista-555 с охлаждаемой ПЗС матрицей Si-фотоприемников. Статистику излучения анализировали с использованием интерферометра Хэнбери Брауна–Твисса (ХБТ) [8, 9].

На рис. 3*в* представлен спектр микролюминесценции одиночной $Al_{0.2}In_{0.8}As$ КТ, находящейся в брэгговском микрорезонаторе, записанный при $T = 10$ K и мощности возбуждающего лазера $P_i = 15$ мкВт. В спектре доминирует пик с длиной волны $\lambda \approx 767$ нм, относящийся к рекомбинации экситонного состояния одиночной квантовой точки $Al_{0.2}In_{0.8}As$.

На рис. 3*г* представлена зависимость коррелятора второго порядка от времени задержки $g^2(\tau)$, измеренная на ХБТ интерферометре для экситонного пика излучения одиночной КТ (рис. 3*в*). При $\tau = 0$ зависимость $g^2(\tau)$ имеет ярко выраженный минимум, $g^2(0) \approx 0.04$, что указывает на суб-пуассоноский тип статистики излучения одиночной $Al_{0.2}In_{0.8}As$ квантовой точки и демонстрирует возможность создания ИОФ для атмосферных систем квантовой криптографии на основе КТ данного типа.

ЛАЗЕРЫ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РЕЗОНАТОРОМ ДЛЯ МИНИАТЮРНЫХ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

Разработанный лазер с вертикальным резонатором (ЛВР) 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. Инжекция носителей заряда в активную область осуществляется через верхнее выходное полупроводниковое зеркало *p*-типа легирования и нижнее зеркало *n*-типа легирования. В лазере используется $AlGaO_x$ оксидная апертура, которая формируется в процессе селективного окисления 49 нм слоя $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$. Апертура располагается непосредственно над активной областью и обеспечивает эффективное токовое и оптическое ограничение в ЛВР. Период брэгговских зеркал состоит из ~$\lambda/4$ 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 зеркало 35.5 периодов, что задает высокий уровень коэффициентов отражения зеркал (0.997 и 0.999 соответственно). Это обеспечивает высокую добротность микрорезонатора, низкий уровень порогового усиления, и низкий уровень пороговых и рабочих токов ЛВР.

Исходная лазерная структура выращивалась на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Рибер С21» на *n*-GaAs подложках ориентации (001). Выращиванию полной лазерной структуры предшествовали тщательные калибровки скоростей роста слоев $Al_xGa_{1-x}As$, 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. 4*а* 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 мкм. После чего, для формирования оксидной апертуры ЛВР, проводилось селективное окисление слоя $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ в атмосфере паров воды и азота при $T = 420$ °C. Дальнейшие технологические операции заключались в нанесении диэлектриков и формировании металлических контактных областей. Завершенная лазерная структура изображена на рис. 4*б*, размер лазерного чипа составляет 300 × 300 мкм.

Генерационные характеристики ЛВР представлены на рис. 4*в*, 4*г* и 4*д*. Исследование спектральных характеристик лазеров (рис. 4*г*) показало, что лазеры с апертурой $A \leqslant 3$ мкм демонстрируют устойчивый одномодовый режим генерации и стабильную поляризацию излучения вдоль кристаллографического направления [110] во всем исследованном диапазоне тока накачки (0–2 мА). Коэффициент подавления высших мод составляет ~50 дБ (рис. 4*г*).

Лазеры характеризуются низким уровнем порогового тока $I_{th} \approx 0.4$ мА, а квантовая эффективность ЛВР составляет $\eta \approx 0.5$ мВт/мА (рис. 4*в*). Точная подстройка длины волны ЛВР под рабочий переход $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ атомов ^{87}Rb осуществляется путем изменения внешней температуры и за счет изменения уровня инжекции, который также меняет температурный режим работы лазера. На рис. 4*д* приведены зависимости длины волны лазерного излучения от температуры и тока накачки.

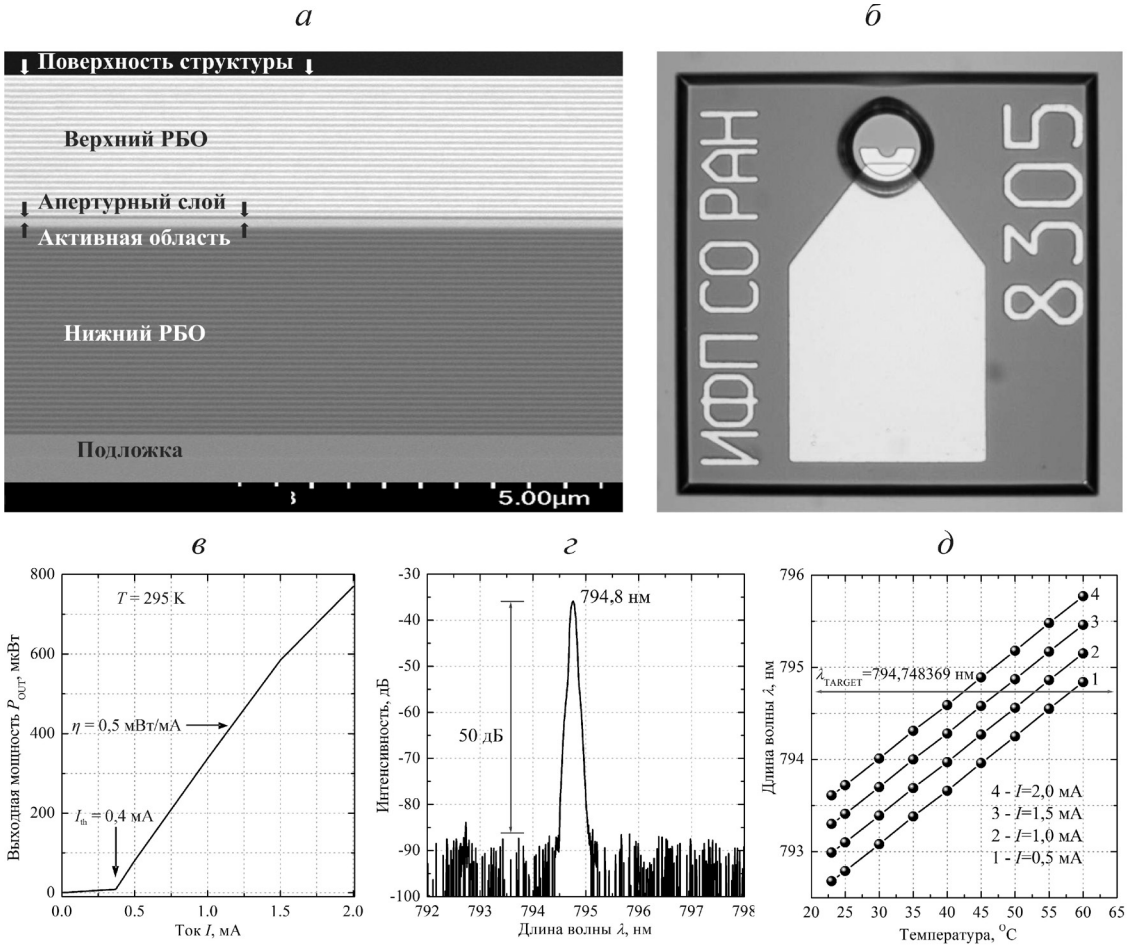

Рис. 4. Исходная лазерная структура, выращенная методом МЛЭ, данные сканирующей электронной микроскопии (*а*), микрофотография лазерного чипа 300x300 мкм (*б*), ватт-амперная характеристика ЛВР (*в*), спектр излучения лазера (*г*), зависимости генерационной длины волны ЛВР от температуры и тока накачки (*д*).

Температурный коэффициент изменения длины волны лазерного излучения составляет $d\lambda/dT$ = = 0.059 нм/градус, что находится в хорошем соответствии с литературными данными [11–14].

Совокупность представленных экспериментальных результатов (устойчивый одномодовый режим работы с выходной мощностью ~0.5 мВт при малых рабочих токах ~1.5 мА, требуемая длина волны излучения 794.8 нм и возможность ее точной подстройки за счет изменения температуры и тока инжекции) демонстрирует большие возможности использования разработанных лазеров в миниатюрных квантовых стандартах частоты на основе атомов ^{87}Rb.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен обзор результатов разработки детекторов и излучателей фотонов, перспективных для использования в системах квантовой криптографии и миниатюрных квантовых стандартах частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей.

Разработаны, изготовлены и исследованы образцы однофотонных лавинных фотодиодов на основе полупроводниковых гетероструктур InP/InGaAs/InP. Проведенные измерения основных параметров ОЛФД показали, что они сравнимы с параметрами зарубежных аналогов или превосходят их, что свидетельствует о возможности применения разработанных ОЛФД в системах однофотонной квантовой связи.

Представлены результаты разработки излучателей одиночных фотонов на основе $Al_xIn_{1-x}As$ квантовых точек. 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 $Al_xIn_{1-x}As$ квантовых точек.

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 ^{87}Rb.

Разработка и исследование характеристик излучателей выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-30003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wooters W.K., Zurek W.H.* // Nature. 1982. V. 299. P. 802.
2. *Рябцев И.И., Третьяков Д.Б., Коляко А.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 12. С. 1689; *Ryabtsev I.I., Tretyakov D.B., Kolyako A.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 12. P. 1493.
3. *Быковский А.Ю.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 3. С. 377; *Bykovsky A.Y.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V.84. No. 3. P. 289.
4. *Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H.* // Rev. Mod. Phys. 2002. V. 74. No. 1. P. 145.
5. *Gol'tsman G.N., Okunev O.V., Chulkova G.M. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 705.
6. *Bouwmeester D., Ekert A.K., Zeilinger A.* The physics of quantum information. Berlin: Springer, 2000. 314 p.
7. *Walls D.F., Milburn G.J.* Quantum Optics. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 437 p.
8. *Michler P.* Single semiconductor quantum dots. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 389 p.
9. *Michler P.* Single quantum dots, fundamentals, applications and new concepts. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 347 p.
10. *Wang Z.M.* Self-assembled quantum dots. N.Y.: Springer Science+Business Media, 2008. 463 p.
11. *Michalzik R.* VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 558 p.
12. *Wilsmen C.*W., *Temkin H.*, *Coldren L.* Vertical-cavity surface-emitting lasers: design, fabrication, characterization and application. Cambridge University Press, 1999. 455 p.
13. *Cheng J.*, *Dutta N.K.* Vertical-cavity surface-emitting lasers: technology and applications. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2000. 323 p.
14. *Li H.E.*, *Iga K.* Vertical-cavity surface-emitting lasers devices. Berlin: Springer Verlag, 2002. 386 p.
15. *Kitching J.* // Appl. Phys. Rev. 2018. V. 5. Art. No. 031302.
16. *Vanier J.* // Appl. Phys. B. 2005. V. 81. No. 4. P. 421.
17. *Knappe S., Schwindt P.D.D., Shah V. et al.* // Opt. Express. 2005. V. 13. No. 4. P. 1249.
18. *Gruet F., Al-Samaneh A., Kroemer E. et al.* // Opt. Express. 2013. V. 21. No. 5. P. 5781.
19. *Tan B., Tian Y., Lin H. et al.* // Optics Lett. 2015. V. 40. No. 16. P. 3703.
20. *Kroemer E., Rutkowski J., Maurice V. et al.* // Appl. Optics. 2016. V. 55. No. 31. P. 8839.
21. *Скворцов М.Н., Игнатович С.М., Вишняков В.И. и др.* // Квант. электрон. 2020. Т. 50. № 6. С. 576; *Skvortsov M.N., Ignatovich S.M., Vishnyakov V.I. et al.* // Quantum. Electron. 2020. V. 50. No. 6. P. 576.
22. *Петрушков М.О., Путято М.А., Емельянов Е.А. и др.* Способ легирования цинком подложек или слоев фосфида индия. Патент РФ № 2686523, кл. H01L 21/223 (2006.01). 2019.
23. *Чистохин И.Б., Путято М.А., Преображенский В.В. и др.* Лавинный фотодиод и способ его изготовления. Патент № RU2769749, кл. H01L 31/107 (2006.01), H01L 31/18 (2006.01), B82Y20/00 (2011.01), B82Y40/00 (2011.01) 2022.
24. http://www.micro-photon-devices.com
25. *Гайслер В.А., Деребезов И.А., Гайслер А.В. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. № 2. С. 93; *Gaisler A.V., Derebezov I.A., Gaisler V.A. et al.* // JETP Lett. 2017. V. 105. No. 2. P. 103.

Photon detectors and emitters for quantum communication systems and quantum frequency standards

V. V. Preobrazhenskii[1, *], I. B. Chistokhin[1], I. I. Ryabtsev[1], V. A. Haisler[1], A. I. Toropov[1]

[1]Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia
**e-mail: pvv@isp.nsc.ru*

We presented a brief overview of the results obtained at the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of SB RAS in the field of the development of photon detectors and emitters promising for use in quantum cryptography systems and miniature quantum frequency standards based on the effect of coherent population trapping.

Keywords: quantum cryptography, Geiger mode avalanche photodiode, semiconductor quantum dots, exciton, single photon emitters, vertical-cavity surface-emitting laser, miniature quantum frequency standards