

Научная статья

УДК 620.3, 530.145

DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-2-68-88

Полупроводниковые наноструктуры для квантовых технологий (обзор)

Александр Леонидович Асеев

Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирск, Россия

a.aseev@nsu.ru

Аннотация

Рассмотрены примеры разработки и применения полупроводниковых наноструктур для реализации квантовых технологий при решении задач развития современных информационных и телекоммуникационных технологий. В их числе: гетеропереходные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов; многоэлементные матричные фотоприемники инфракрасного диапазона на многослойных гетероструктурах с квантовыми ямами; квантовые каскадные лазеры; полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором; источники одиночных и запутанных фотонов с квантовыми точками в активной области; спиновые структуры в эпитаксиальной системе «германий – кремний» с квантовыми точками. Ожидается применение полупроводниковых наноструктур в новых областях полупроводниковой электроники, таких как разработка универсальной памяти, нейропроцессоры, спинтроника, квантовые вычислители и квантовая криптография, элементы СВЧ и терагерцевой электроники, оптоэлектроники и радиофотоники, устройства теплового и ночного видения.

Ключевые слова

нанотехнологии, полупроводниковые наноструктуры, квантовые технологии, ИК-фотоприемники, СВЧ-электроника

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам ИФП им. А. В. Ржанова СО РАН докторам физ.-мат. наук К. С. Журавлеву, В. Н. Овсянку, В. А. Гайслеру, О. П. Пчелякову, А. И. Никифорову, А. И. Якимову, канд. физ.-мат. наук А. И. Торопову, А. Г. Паулишу, а также С. А. Кузнецову за сотрудничество при получении основных результатов, изложенных в настоящем обзоре. Автор благодарит ЦКП «ВТАН» НГУ за доступ к измерительному оборудованию. Автор особо признателен академикам А. В. Латышеву, Ж. И. Алферову, Р. А. Сурису, С. Н. Багаеву, чл.-корр. РАН А. В. Двуреченскому и А. В. Тайченачеву за обсуждение проблем, затронутых в данной публикации. Автор благодарит канд. физ.-мат. наук П. В. Гейдта и А. О. Гейдт за помощь в подготовке рукописи данной публикации.

Для цитирования

Асеев А. Л. Полупроводниковые наноструктуры для квантовых технологий (обзор) // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 2. С. 68–88. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-2-68-88

Semiconductor Nanostructures for Quantum Technologies (Review)

Aleksander L. Aseev

Novosibirsk State University,
Novosibirsk, Russian Federation

A.V. Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

a.aseev@nsu.ru

Abstract

This publication considers examples of the development and application of semiconductor nanostructures for the implementation of quantum technologies in solving problems of developing modern information and telecommunication technologies. These include: heterojunction field-effect transistors with high electron mobility; multi-element matrix infrared photodetectors on multilayer heterostructures with quantum wells; quantum cascade lasers; vertical-cavity semiconductor lasers; sources of single and entangled photons with quantum dots in the active region; spin structures in the germanium-silicon epitaxial system with quantum dots. The application of semiconductor nanostructures is expected in new areas of semiconductor electronics, such as the development of universal memory, neuroprocessors, spintronics, quantum computers and quantum cryptography, elements of microwave and terahertz electronics, optoelectronics and radiophotonics, thermal and night vision devices.

Keywords

Nanotechnology, semiconductor nanostructures, quantum technologies, IR photodetectors, microwave electronics

Acknowledgments

The author is grateful to the staff of the Rzhzanov Institute of Physical Problems SB RAS, Doctors of Physical and Mathematical Sciences K. S. Zhuravlev, V. N. Ovsyuk, V. A. Gaisler, O. P. Pchelyakov, A. I. Nikiforov, A. I. Yakimov, Candidates of Physical and Mathematical Sciences A. I. Toropov, A. G. Paulish and S. A. Kuznetsov for their cooperation in obtaining the main results presented in this review. The author thanks the Shared research center “VTAN” of NSU for access to measuring equipment. The author is especially grateful to Academicians A. V. Latyshev, Zh. I. Alferov, R. A. Suris, S. N. Bagaev, Corresponding Members of the RAS A. V. Dvurechensky and A. V. Taichenachev for discussing the issues raised in this publication. The author thanks D. Sc. (Tech.) P. V. Geydt and A. O. Geydt for their assistance in preparing the manuscript of this publication.

For citation

Aseev A. L. Semiconductor Nanostructures for Quantum Technologies (Review). *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, no. 2, p. 68–88. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-2-68-88

Введение

Прогресс в изучении физики квантовых явлений и технологии получения полупроводниковых систем пониженной размерности и полупроводниковых наноструктур открывает новые возможности для реализации и применения квантовых технологий при решении задач развития современных информационных и телекоммуникационных технологий. Путь к освоению квантовых технологий отмечен Нобелевскими премиями, в том числе за экспериментальное открытие квантового туннелирования в полупроводниках и сверхпроводниках в 1973 г. (Л. Есаки, И. Джеевер, Б. Джозефсон); открытие целочисленного квантового эффекта Холла в 1985 г. (К. фон Клитцинг); премией 1986 г. за создание электронного микроскопа и сканирующего туннельного микроскопа (Э. Руска, Г. Биннинг и Г. Рорер); открытие дробного квантового эффекта Холла в 1998 г. (Р. Лаффлин, Х. Штермер, Д. Цуи); премией за вклад в создание полупроводниковых гетероструктур для СВЧ-электроники и оптоэлектроники и изобретение интегральных схем (Ж. И. Алферов, Г. Кремер и Д. Килби) в 2000 г.; премией 2009 г. за основополагающие достижения по прохождению света в оптоволокнах для развития оптических коммуникаций и изобретение оптических полупроводниковых сенсоров – ПЗС-матриц (Ч. Као, У. Бойль и Дж. Смит); премией за открытие и исследование графена в 2010 г. (А. Гейм и К. Новоселов), создание эффективных светодиодов голубого свечения в 2014 г. (И. Акасаки,

Х. Аmano и С. Накамура); премией 2016 г. за теоретические открытия топологических фазовых переходов и топологических фаз вещества (Д. Таулесс, Дж. Костерлиц и Д. Холдейн). Цель настоящего обзора состоит в изложении результатов по избранным темам, достигнутых не только мировым научным сообществом, но и отечественными институтами, в числе которых ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, ИСВЧПЭ им. В. Г. Мокерова (ныне в составе НИЦ «Курчатовский институт»), ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова и др.

Основные квантовые эффекты в полупроводниковых наноструктурах схематически изображены на рис. 1:

- (1) туннелирование электронов через энергетические барьеры с коэффициентом прохождения $D \sim \exp(-2kd/h)$, где d – ширина энергетического барьера (а);
- (2) квантование электронного спектра в квантовых ямах с уровнями энергии: $E_n = (\pi^2 \hbar^2 / 2md^2)n^2$, где n – номер уровня; d – ширина квантовой ямы (б);
- (3) спиновые явления с малой энергией переключения $\Delta E < 10^{-5}$ eV;
- (4) формирование квантовых битов $|Q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, где $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ и запутанных квантовых состояний с волновой функцией $\Psi_{12} = 1/\sqrt{2} (|0\rangle_1|1\rangle_2 + |1\rangle_1|0\rangle_2)$.

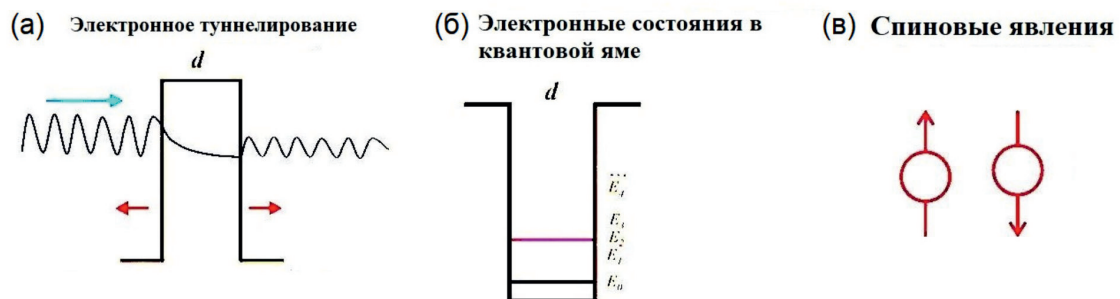


Рис. 1. Туннелирование электрона через энергетический барьер (а), электронные состояния в квантовой яме (б) и спиновые явления (в)

Fig. 1. Electron tunneling through an energy barrier (a), electronic states in a quantum well (б), and spin phenomena (в)

Впечатляющий пример эффективности полупроводниковых квантовых технологий состоит в создании и широком применении полевого транзистора с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) или HEMT (High Electron Mobility Transistor) на основе гетероперехода высоколегированного широкозонного слоя AlGaAs с узкозонным нелегированным слоем GaAs, предложенного и реализованного Ж. И. Алферовым [1]. Структура энергетических зон гетеропереходного ТВПЭ, включающая область двумерного электронного газа (2DEG) с высокой концентрацией электронов в квантовой яме для носителей заряда нанометровой толщины на границе раздела GaAs/AlGaAs, схематически показана на рис. 2. Высокая подвижность 2DEG в нелегированном GaAs и его высокая концентрация обеспечивают улучшенные частотные и характеристики ТВПЭ вплоть до ТГц частот при увеличенных значениях мощности и коэффициенте усиления по сравнению с обычными полевыми транзисторами [2–6]. В работах К. С. Журавлева и А. И. Торопова с соавторами [3–6] сообщается о разработке гетероструктурного AlGaAs/GaAs полевого транзистора и псевдоморфного AlGaAs/InGaAs/GaAs транзистора p-HEMT, обеспечивающих в диапазоне частот 12–18 ГГц уровень удельной выходной мощности 0,8–1,2 Вт/мм квазимонолитных интегральных усилителей мощности. Создание нового типа гетерозепитаксиальных структур с дополнительными потенциальными барьерами за счет донорно-акцепторного легирования в δ -слоях позволило достичь увеличенного до 1,7 Вт/мм значения выходной мощности [7–8]. Это обстоятельство обеспечило широ-

кое применение ТВПЭ в технике связи в микроволновом и миллиметровом диапазонах частот, в радарх и радиоастрономии, в мобильной телефонии и в спутниковых системах электронного обнаружения и привело к революционным изменениям этих практически важных направлений. Ведущие компании мира в настоящее время обеспечивают масштабное производство ТВПЭ и монокристаллических интегральных схем на их основе.

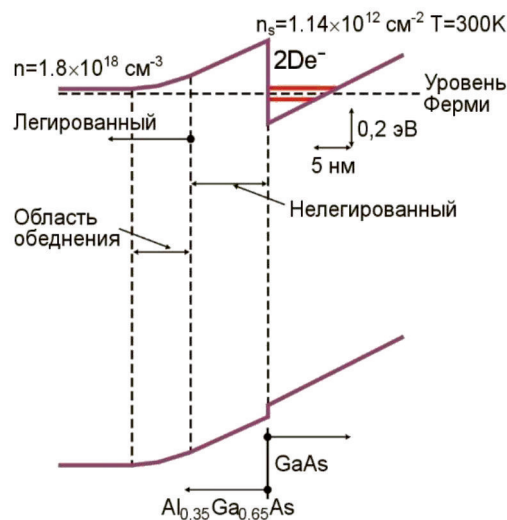


Рис. 2. Энергетическая диаграмма гетероструктуры с двумерным электронным газом 2DEG ($2De^-$)

Fig. 2. Energy diagram of a heterostructure with a two-dimensional electron gas 2DEG

Среди многочисленных приборов современной электроники на основе полупроводниковых гетеропереходов: инжекционные гетеролазеры и светодиоды, фотоэлектрические приемники и преобразователи инфракрасного излучения в видимое, переключающие и излучательные диоды, фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии и многое другое [1].

Многослойные гетероструктуры с квантовыми ямами (сверхрешетки)

Многослойные полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми ямами (МСКЯ) GaAs/AlGaAs являются основой для создания многоэлементных фотоприемных устройств (МФПУ) ИК-диапазона 8–10 мкм, как это показано ранее в работе [9] и в дальнейшем реализовано в работах В. Н. Овсюка, А. И. Торопова и В. В. Шашкина [10; 11]. Несмотря на относительно низкое значение квантовой эффективности фотоприемных приборов на МСКЯ их преимуществами является возможность изготовления широкоформатных матричных структур при компенсации низкой квантовой эффективности за счет увеличения времени накопления полезного сигнала в тепловизионных системах [11]. На рис. 3 представлена зонная структура МФПУ на основе многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами (QWIP – Quantum Well Infrared Photodetectors), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Приведена схема поперечного среза МСКЯ (справа сверху), высокоразрешающее электронно-микроскопическое изображение структуры GaAs/AlGaAs (слева внизу) и внешний вид фрагмента МФПУ с мезаструктурами пикселей и In-микростволбов на каждом из элементов (справа внизу) с форматом матрицы 384×288 и 640×512.

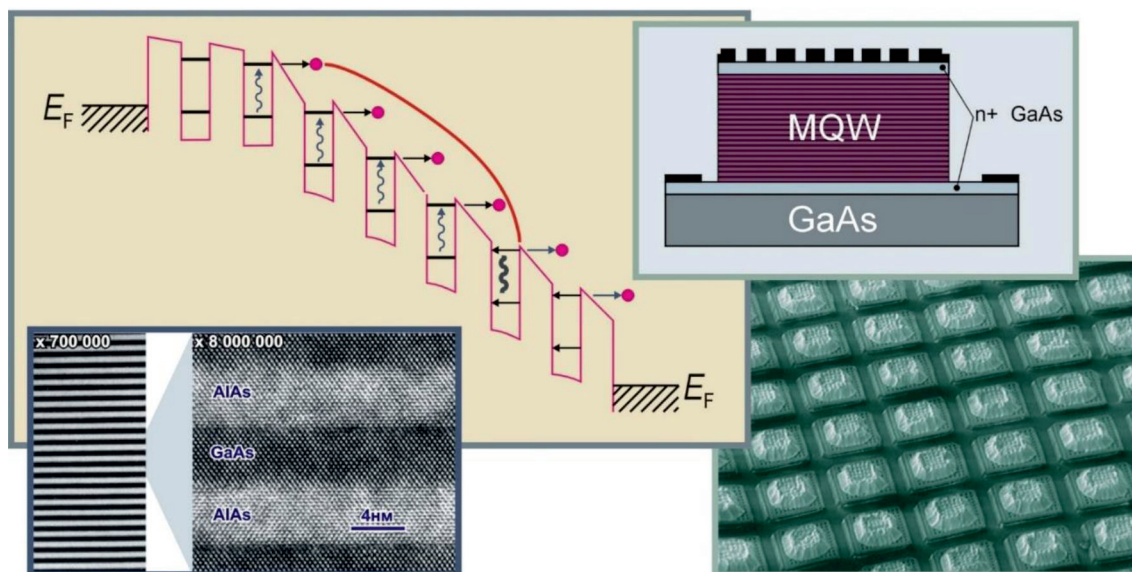


Рис. 3. ИК МФПУ на МСКЯ в гетероструктуре GaAs/AlGaAs
 Fig. 3. The matrix IR photodetector in the GaAs/AlGaAs multilayered quantum well heterostructure

МСКЯ содержит квантовые ямы GaAs толщиной 4–5 нм, легированные донорной примесью Si ($n = 3 \cdot 10^{17} - 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$) и разделяющие барьерные слои AlGaAs толщиной 40–50 нм (рис. 3, слева). Состояния электронов в зоне проводимости квантовых ям квантуются в соответствии с зонной диаграммой (рис. 3). При поляризации света вдоль слоев МСКЯ происходит поглощение фотонов на свободных носителях. Для поляризации фотонов перпендикулярно слоям разрешенными являются переходы электронов между дискретными состояниями или между энергетическими уровнями и состояниями над барьером с последующей релаксацией в состояния непрерывного спектра или на уровни большей энергии. Фотопроводимость обеспечивается носителями, возбужденными либо непосредственно со связанного основного уровня, либо на связанный уровень в яме с последующим туннелированием в состояния квазинепрерывного спектра над барьером, что схематически показано на рис. 3. Параметры МФПУ, такие как спектральная зависимость коэффициента поглощения, пороговая обнаружительная способность, темновой ток, определяются положением уровней квантования относительно друг друга и относительно потенциального барьера (край зоны проводимости AlGaAs), от величины тянущего электрического поля, от рабочей температуры и размеров отдельных фотоприемных элементов (пикселей).

В настоящее время МФПУ на МСКЯ обеспечивают температурное разрешение 25–35 мК с быстродействием 100–120 кадров/с [12] при высокой однородности обнаружительной способности по площади фотоприемной матрицы и при высоком проценте выхода годных фотоприемных модулей за счет высокого уровня развития технологии выращивания полупроводниковых гетероструктур (число дефектных пикселей менее 0,5 %).

Квантовый каскадный лазер

Многослойные структуры на квантовых ямах служат основой квантово-каскадных лазеров (ККЛ), принципиальная схема работы которых изображена на рис. 4. Показано, как последовательные процессы излучения электроном e^- фотонов $\hbar\omega$ при переходе на нижележащий энергетический уровень с последующим туннелированием в соседнюю квантовую яму под воздействием приложенного к МСКЯ электрического поля приводят к излучению света. Впервые

идея создания ККЛ была предложена российскими физиками Р. Ф. Казариновым и Р. А. Сурисом в 1971 г. [13] и экспериментально подтверждена в работе J. Faist, F. Capasso и др. [14] в 1994 г. Процесс, при котором один электрон в ККЛ вызывает испускание нескольких фотонов при туннелировании в МСКЯ, позволяет достичь высокого значения квантовой эффективности, превышающей единицу, и приводит к высокой выходной мощности ККЛ по сравнению с обычными полупроводниковыми лазерами и диодами.

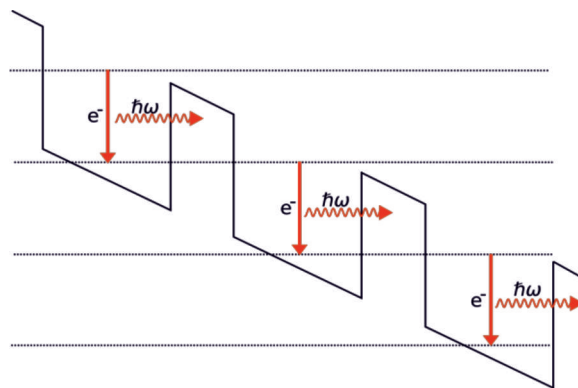


Рис. 4. Принципиальная схема работы квантово-каскадного лазера
Fig. 4. A schematic diagram of the operation of a quantum cascade laser

Диапазон излучения ККЛ – средняя и дальняя инфракрасные части электромагнитного спектра. В последние годы реализованы ККЛ терагерцевого диапазона, работающие при охлаждении термоэлектрическими охладителями Пельтье (см., например, [15]). Высокая выходная мощность (более 2 Вт в импульсном режиме), возможность работы в непрерывном режиме, узкая ширина генерации (единицы кГц) и возможность работы частотной перестройки (до 10 ГГц) при изменении тока или температуры и порядка 100 ГГц за счет внешнего перестроющего элемента, малый угол расходимости позволяют применять ККЛ терагерцевого диапазона для широкого спектра задач, чему способствует появление на рынке коммерческих ККЛ.

Терагерцевое излучение применяется в различных приложениях благодаря своей способности проникать через оптически непрозрачные среды, наличию характерных спектральных откликов для широкого спектра органически неорганических материалов и неионизирующему характеру излучения. В работе [16] представлены результаты применения высокопроницающего ТГц-излучения ККЛ в визуализации металлических объектов, скрытых непрозрачными материалами (пластик, бумага, ткань), в системах конфокальной визуализации с детектированием изображений микроболометрическими матрицами. Терагерцевый визуализатор на основе ТГц–ИК-конвертора «Теравизор» в виде носимого прибора для детектирования скрытых (замаскированных) объектов разработан А. Г. Паулишем, С. А. Кузнецовым и др. в филиале ИФП СО РАН «КТИ ПМ», и примеры его применения представлены в [17; 18].

Создание ККЛ дало новые возможности в развитии и применении ТГц-спектроскопии в различных областях, везде, где присутствуют вещества, имеющие характерные линии поглощения в ТГц-диапазоне. В их числе изучение атмосферы планет и состава межзвездного пространства в астрономии, наблюдение за атомами и молекулами в атмосфере Земли и в космосе, анализ состава газов и газовых смесей, изучение состава жидкостей, в биомедицинских исследованиях, бесконтактное и неинвазивное определение влажности агрокультур и т. д. Как правило, используются гетеродинные ТГц-спектрометры, в которых регистрируемый слабый ТГц-сигнал детектируется путем генерации промежуточной частоты, которая представляет собой разность частот излучения детектируемого сигнала и излучения локального осцилля-

тора. В качестве локального осциллятора выступают ТГц-ККЛ, имеющие узкую спектральную линию генерации и возможность работать в непрерывном режиме генерации [16].

Сочетание рабочего диапазона частот и достигнутых характеристик делает источник излучения на основе ТГц-ККЛ безальтернативным в задачах терагерцевой визуализации в реальном времени, высокоразрешающей газовой спектроскопии, мультиспектральном зондировании удаленных объектов, в том числе в межзвездной среде космоса, контроле содержания влаги в растениях и исследовании состава верхней атмосферы Земли для анализа и прогноза климатических изменений. Использование измерительных систем на основе ТГц-ККЛ позволит сделать прорывные открытия при изучении происхождения нашей Галактики, создать системы чувствительного экологического мониторинга, разработать новые медицинские системы диагностики онкологических заболеваний и совершить переход к системам беспроводной связи с пропускной способностью более 1 Тбит/с [16].

Полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором

Если квантово-каскадный лазер является униполярным устройством, в котором фотоны генерируются только межзонными переходами и туннелированием электронов в потенциальном рельефе МСКЯ, то в обычных полупроводниковых лазерных структурах излучение света происходит при рекомбинации носителей заряда в виде электронов и дырок при межзонных переходах. В числе современных полупроводниковых лазеров выделяются лазеры с вертикальным резонатором [19–21]. На рис. 5 из работы В. А. Гайслера и А. И. Торопова [22] схематически представлено устройство полупроводникового лазера с вертикальным резонатором ЛВП (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL), который обеспечивает генерацию света в направлении, перпендикулярном поверхности полупроводниковой гетероструктуры при рекомбинации электронов и дырок в квантовых ямах (или квантовых точках), расположенных в центральной области электронно-дырочного перехода, совмещенного с четвертьволновым резонатором брэгговских зеркал. Для формирования электронно-дырочного перехода в узлах пучности световой волны брэгговских резонаторов располагаются слои, легированные соответственно донорными или акцепторными примесями.

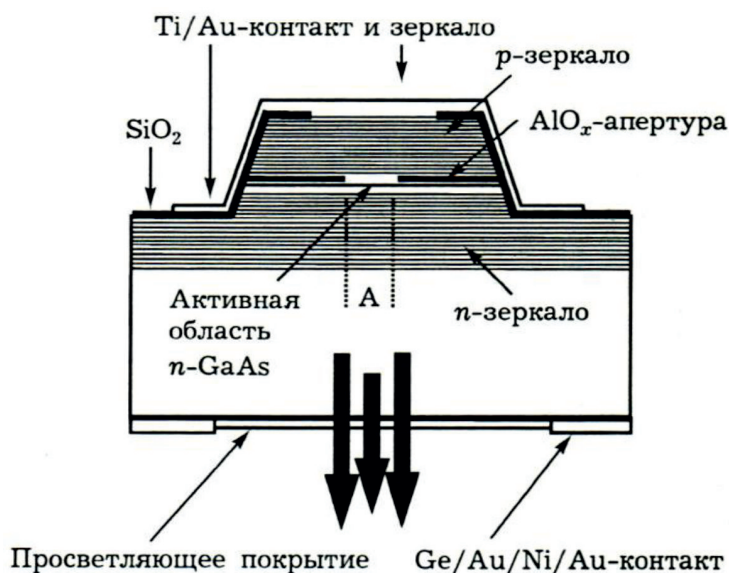


Рис. 5. Схематическое изображение лазера с вертикальным резонатором и квантовыми ямами в активной области

Fig. 5. Schematic representation of a laser with a vertical cavity and quantum wells in the active region

Принцип работы ЛВР на основе квантовой ямы $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ в активной зоне приведен на рис. 6 из работы [22], на котором схематически показан процесс движения электронов и дырок в эпитаксиальной диодной структуре и их рекомбинация в квантовой яме с генерацией фотонов. На этой же схеме показаны $\lambda/4$ волновые слои сверхрешетки, где λ – длина волны, с чередующимися показателями преломления n-GaAs и AlGaAs , которые образуют зеркало интерферометра ЛВР. Поскольку зеркала ЛВР формируют одновременно диодную структуру ЛВР, то легирующие примеси располагают в узлах пучности стоячих волн зеркальных сверхрешеток. Показаны также туннельные барьеры AlAs по краям квантовой ямы. Приготовление эпитаксиальных структур ЛВР отличается предельная сложность и атомная точность технологии МЛЭ (рис. 7) и включает формирование в едином технологическом процессе следующих составляющих ЛВР: активной зоны из одного или нескольких слоев квантовых ям или квантовых точек; нескольких сотен или тысяч слоев брэгговских зеркал резонатора Фабри – Перо с чередующимися показателями преломления; высоколегированных слоев структуры диода накачки в областях нулевой интенсивности стоячей оптической волны. После процесса эпитаксиального выращивания формируются мезаструктуры с оксидными апертурами AlGaO с различными латеральными размерами от долей микрона до нескольких микрон (рис. 5).

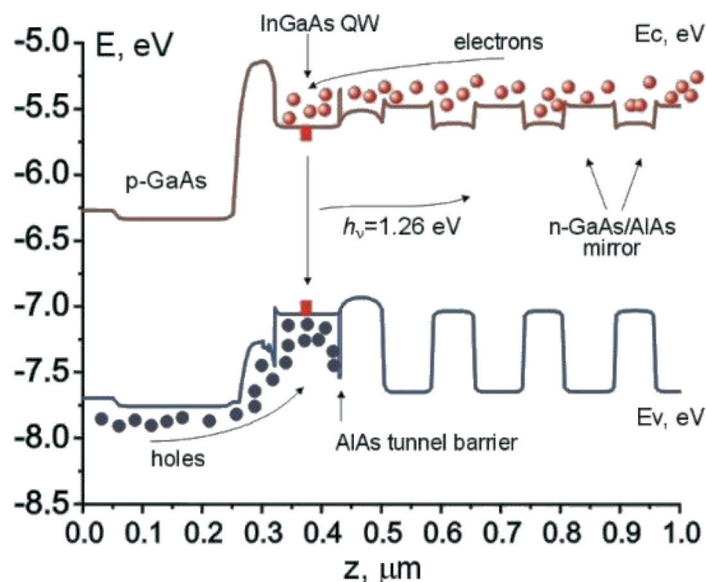


Рис. 6. Лазер с вертикальным резонатором на основе квантовой ямы $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, фрагмент зонной структуры с квантовой ямой в центре и брэгговской n-GaAs/AlAs -решеткой отражающего зеркала резонатора справа
 Fig. 6. A laser with a vertical cavity based on an $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ quantum well, a fragment of a band structure with a quantum well in the center and a Bragg n-GaAs/AlAs array reflecting mirror on the right

Просвечивающая электронная микроскопия с высоким разрешением и возможностью визуализации заданного элементного состава демонстрирует высокую атомную точность при эпитаксиальном выращивании структуры ЛВР и элементный состав гетероструктур с квантовыми ямами (рис. 7, а–в), что обеспечивает применяемая при получении гетероструктур технология молекулярно-лучевой эпитаксии [23]. Результаты исследования генерационных характеристик ЛВР подтверждают низкий уровень порогового тока, который варьируется в интервале от 150 до 800 мкА в зависимости от диаметра лазерной апертуры. Квантовая эффективность изготовленных ЛВР составляет 0,3–0,4 мВт/мкА. Исследование спектральных характеристик лазеров с апертурой менее 5 мкм демонстрирует устойчивый одномодовый режим генерации во всем исследованном диапазоне тока накачки до 1,5 мА. Лазеры с апертурой 6 мкм работают

в одномодовом режиме лишь при небольшом превышении порогового тока. Лазеры с большей апертурой при любом уровне накачки работают в многомодовом режиме [24].

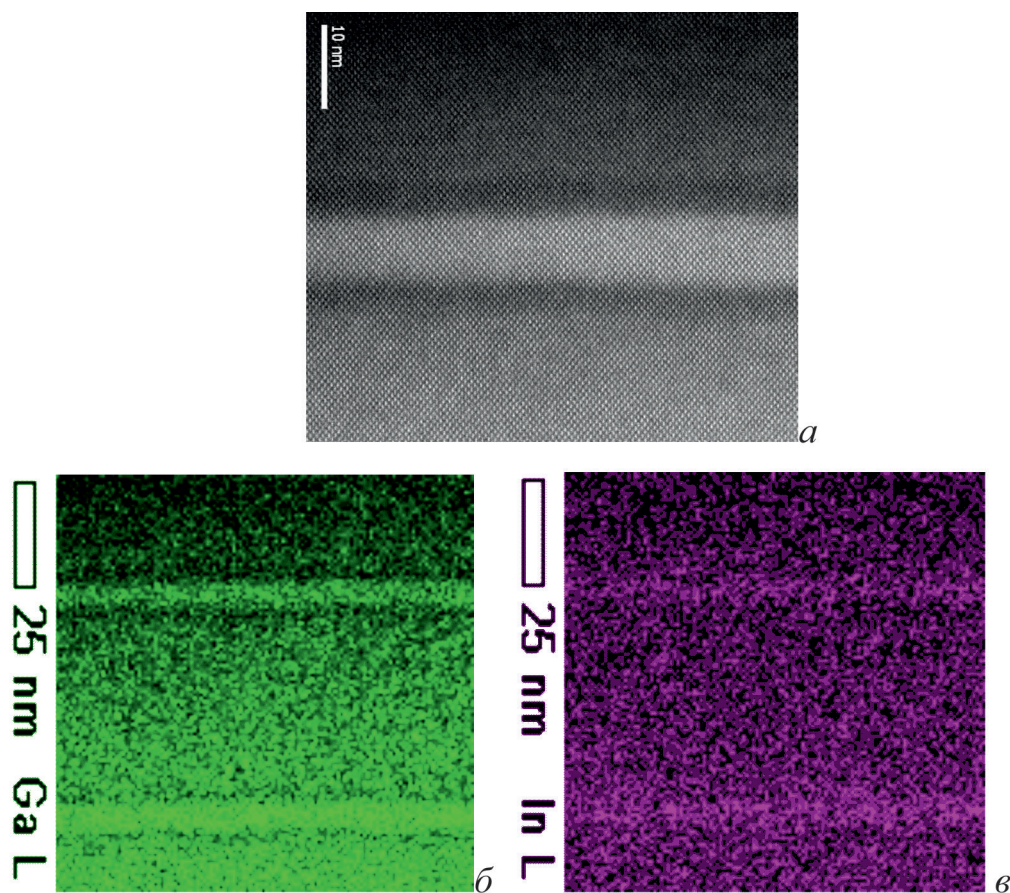


Рис. 7. Высокоразрешающее электронно-микроскопическое изображение слоев квантовой ямы $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (а) и изображение методом темного поля в сканирующем просвечивающем электронном микроскопе с использованием характеристического излучения Ga L (б) и In L (в) соответственно

Fig. 7. High-resolution electron microscopic image of the $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ quantum well layers (a) and a dark-field image in a scanning transmission electron microscope using Ga L (б) and In L (в) characteristic radiation, respectively

К настоящему времени разработана и предлагается на рынке широчайшая номенклатура полупроводниковых излучателей в спектральном диапазоне от ультрафиолетовой до субмиллиметровой (терагерцевой) областях и различного назначения – от ярких мощных светодиодных излучателей, используемых для освещения, подсветки мониторов и экранов телевизоров, для накачки твердотельных лазеров, используемых для технологических обработок материалов и изделий в машиностроении, до менее мощных полупроводниковых излучателей в лазерных принтерах, DVD-системах, мобильных телефонах и волоконно-оптических линиях связи. Сверхминиатюрные полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором отличаются предельно малыми значениями пороговых токов (единицы мкА), рекордно высокой частотой токовой модуляции лазерного излучения (десятки ГГц), что имеет первостепенное значение для быстродействующих оптических информационных систем. Лазеры с вертикальным резонатором выпускаются ежегодно в количестве до миллиона штук и используются в многомодовых локальных волоконно-оптических линиях связи, ручных компьютерных манипуляторах («мышях»), сенсорных устройствах и т. д.

В работе [25] сообщается о разработке одномодовых ЛВР с длинами волн 794,9 и 894,6 нм для миниатюрных квантовых стандартов частоты, работающих на эффекте когерентного пленения населенностей на основе ^{87}Rb и ^{133}Cs . Лазерные чипы монтируются в корпусе, содержащем элемент Пельтье и термистор для задания и контроля температуры ЛВР, который демонстрирует стабильностью частоты менее 10^{-11} . Квантовый стандарт частоты на основе резонанса когерентного пленения уровней, наблюдаемого на D_1 линии поглощения ^{87}Rb разработан и создан в совместной работе сотрудников Института лазерной физики СО РАН под руководством и при участии С. Н. Багаева и А. В. Тайченачева и сотрудников ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений [26]. Созданный квантовый стандарт частоты предназначен для применения в системах спутниковой навигации нового поколения с повышенной точностью определения координат, в системах связи с большим потоком данных, в астрофизике при создании систем радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой и в других системах, в которых необходима высокая степень синхронизации сигналов.

Источники одиночных и запутанных фотонов

Принципиально новые возможности открываются в связи с созданием источников одиночных фотонов с квантовыми точками (КТ) в активной области. На рис. 8 показана схема однофотонного излучателя на основе КТ InAs (зона А), встроенных в резонатор брэгговского отражателя, состоящий из пар $\lambda/4$ чередующихся слоев GaAs $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$ верхнего зеркала резонатора и пар $\lambda/4$ чередующихся слоев GaAs и AlAs нижнего зеркала резонатора p - и n - типа легирования соответственно. Зона А в виде диска, ограниченного кольцом p -AlGaAs, формирует токовую и оптическую апертуру излучателя. Над этим кольцом располагается кольцевой поликристаллический слой p -типа проводимости, осуществляющий инжекцию дырок в апертурную область (зона В) [22; 23].

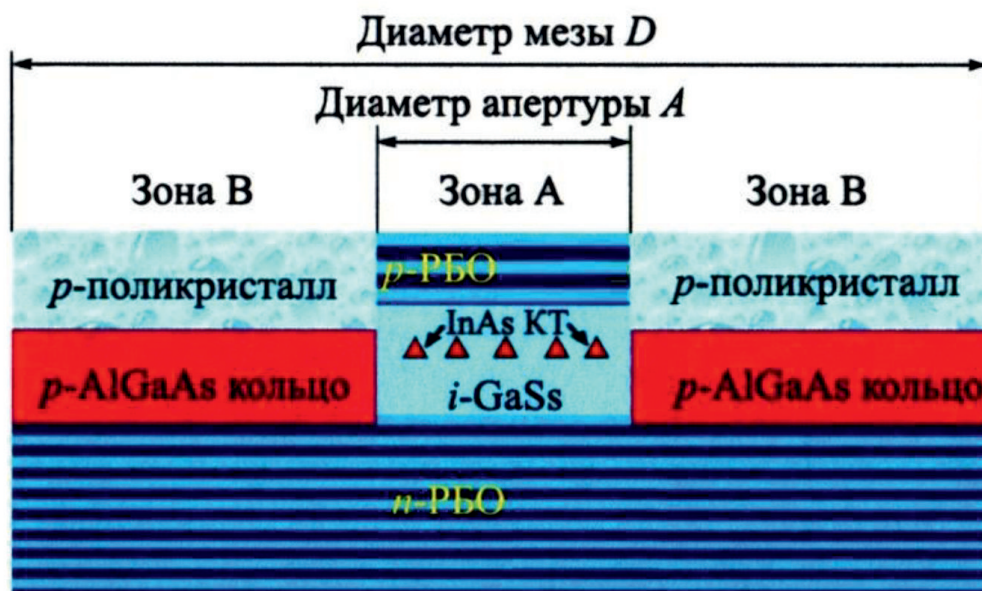


Рис. 8. Схема однофотонного излучателя на основе КТ и микрорезонатора брэгговского отражения (РБО)

Fig. 8. Single-photon emitter scheme based on QDs and Bragg microresonator

Рис. 9 показывает, как меняется спектр электролюминесценции (ЭЛ) при уменьшении диаметра лазерного пятна и уменьшении, тем самым, количества люминесцирующих КТ.

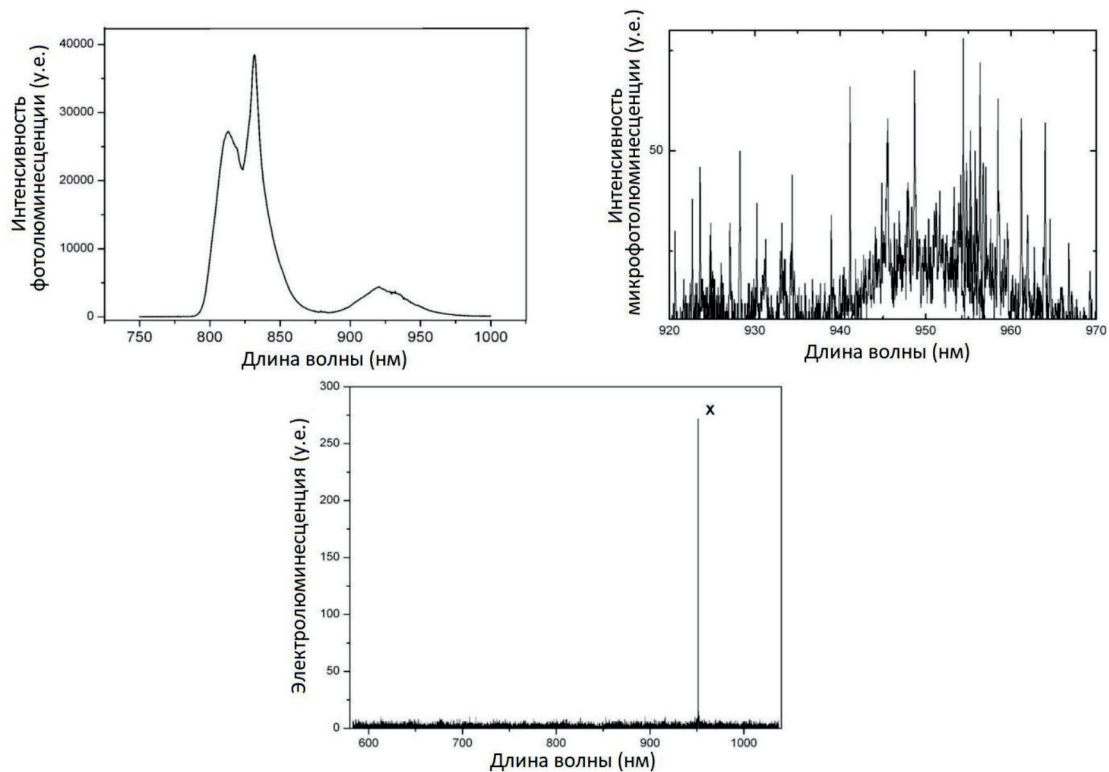


Рис. 9. Спектры люминесценции системы КТ при уменьшении диаметра лазерного пятна от 100 мкм (вверху слева) к ~ 2 мкм (вверху справа) и менее 1 мкм (внизу)

Fig. 9. Luminescence spectra of the QDs system with a decrease in the diameter of the laser spot from 100 microns (top left) to ~ 2 microns (top right) and less than 1 microns (bottom)

При участии в фотолюминесценции массива КТ спектр ЭЛ содержит уширенный максимум, что связано с наложением спектров ЭЛ множества КТ (спектр на рис. 9 вверху слева). При уменьшении диаметра лазерного пятна до приблизительно 2 мкм спектр ЭЛ содержит счетное количество пиков электролюминесценции от отдельных КТ (спектр на рис. 9 вверху справа). При размере лазерного пятна менее 1 мкм происходит уверенная адресация к отдельной КТ и спектр ЭЛ содержит единственный пик, отвечающий рекомбинации экситонных состояний X (рис. 9 внизу). Отметим, что экспериментально наблюдаемый спектр ЭЛ подобен спектрам излучения отдельного атома, и в этом смысле InAs КТ представляют собой искусственные атомы, как об этом предсказывалось ранее в [1]. На основе этих данных были сформированы гетероэпитаксиальные структуры с КТ InAs и определены условия возбуждения отдельных КТ с одиночной линией, отвечающей рекомбинации экситонов. Таким образом, была показана принципиальная возможность создания источников излучения одиночных фотонов [24; 27]. Статистика излучения экситонных состояний одиночных КГ исследована с использованием интерферометра Хэнбери Брауна и Твисса. Функция парных фотонных корреляций отчетливо демонстрирует субпуассоновскую статистику излучения, что является прямым подтверждением однофотонного характера излучения на основе КТ InAs [29; 30].

При повышении мощности возбуждения в спектре ЭЛ появляются пики, соответствующие рекомбинации биэкситонных (XX) и трионных (X^+ и X^-) состояний (рис. 10).

Показано, что одиночными квантовыми точками могут излучаться пары запутанных фотонов 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. В этом случае излучается

пара фотонов, запутанных по поляризации. Процесс генерации иллюстрирует рис. 11, который показывает, что при излучении фотонов с левой циркулярной поляризацией КТ переходит в экситонное зарядовое состояние и при его рекомбинации излучается фотон с правой циркулярной поляризацией (схема сверху), и наоборот (схема внизу).

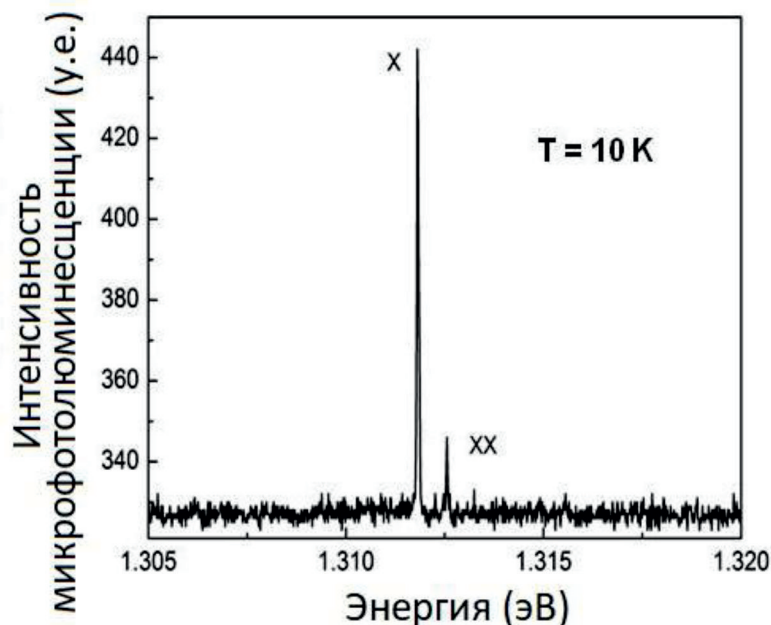


Рис. 10. Спектр электролюминесценции гетероструктур с InAs КТ при $T = -10$ К, демонстрирующий рекомбинацию экситона X и биэкситона XX

Fig. 10. Electroluminescence spectrum of heterostructures with InAs QD at $T = -10$ K, demonstrating recombination of exciton X and biexciton XX

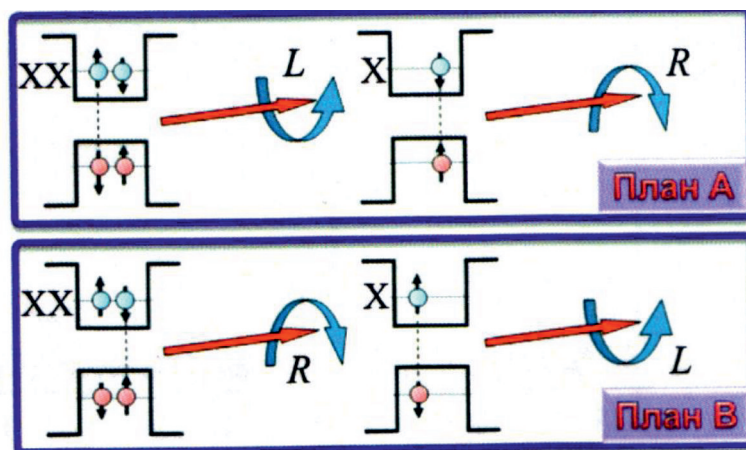


Рис. 11. Генерация запутанных по поляризации фотонных пар в процессе каскадной рекомбинации биэкситона и экситона в полупроводниковых квантовых точках

Fig. 11. Generation of polarization-entangled photon pairs during cascade recombination of biexciton and exciton in semiconductor QDs

В реальных КТ расщепление экситонных состояний ΔE_{FS} , как правило, превышает естественную ширину экситонных уровней Γ_x , что обусловлено отклонениями формы КТ от идеальной, наличием пьезопотенциала, который индуцирован встроенными механическими на-

пряжениями. Это является основным препятствием для создания запутанных по поляризации фотонных пар на основе КТ. Результаты исследования факторов, задающих величину ΔE_{FS} , а также условий, при которых расщепление экситонных состояний подавляется до величины Γ_x , показало, что использование в процессе роста малых по времени (единицы секунд) пауз является эффективным способом получения массива КТ сверхмалой плотности (10^6 см^{-2}), при этом формируются КТ минимального размера с малой дисперсией размера [24; 27–30]. На рис. 12 представлены экспериментальные данные по величине ΔE_{FS} , которые показывают группу КТ с энергией экситона 1,3–1,4 эВ, для которой удовлетворяется условие $\Delta E_{FS} \sim \Gamma_x$. К этой группе относятся КТ наименьшего размера, в которых не наблюдается заметного расщепления экситонных состояний из-за малого значения пьезопотенциала. На рис. 12 эта группа КТ выделена прямоугольной рамкой. Таким образом показано, что эпитаксиальные структуры с квантовыми точками InAs, выращенные по механизму Странского – Крастанова с малым временем прерывания роста, содержат субансамбли квантовых точек, для которых выполняется соотношение $\Delta E_{FS} \sim \Gamma_x$, и которые пригодны для создания излучателей пар запутанных фотонов (рис. 11). Этот вывод подтверждается гистограммой распределения КТ по величине ΔE_{FS} , приведенной на вставке к рис. 12.

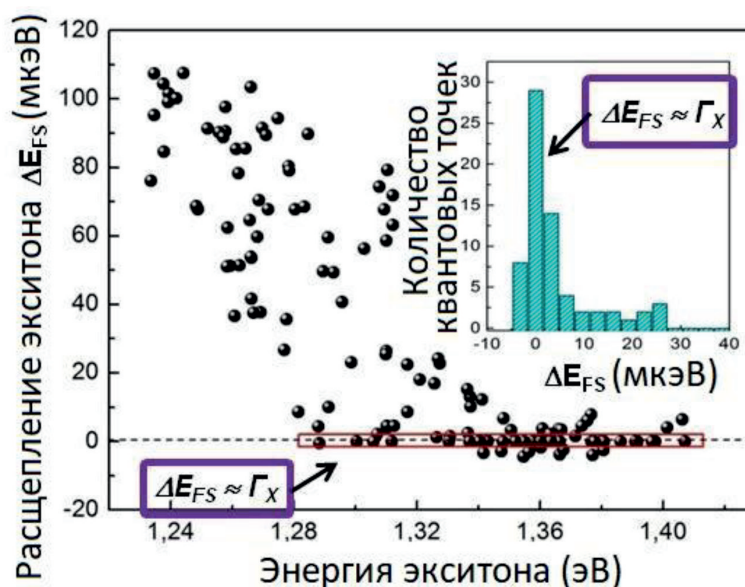


Рис. 12. Величина ΔE_{FS} для 135 квантовых точек InAs

Fig. 12. The ΔE_{FS} value for 135 InAs QDs

Работы по изготовлению и исследованию характеристик ЛВР, а также источников одиночных фотонов и источников квантово-запутанных пар фотонов на основе квантовой ямы наногетероструктур A_3B_5 с квантовыми ямами и квантовыми точками InAs, создают важнейший ресурс по использованию неклассических состояний света в разработке систем квантовой криптографии и квантовых вычислений, в проведении экспериментов в области фундаментальной квантовой физики [22; 24; 27–30].

Спиновые явления в квантовых точках Ge/Si

Гетероэпитаксиальная система Ge/Si привлекательна с точки зрения создания новых приборов и устройств полупроводниковой электроники с использованием преимуществ хорошо развитой кремниевой технологии, базовой для современной микро- и нанoeлектроники. Однако трудно преодолимым препятствием для технологий на базе гетероэпитаксиальной системы

Ge/Si является большое значение разницы параметров кристаллических решеток Ge и Si, которое составляет 4 % и препятствует получению совершенных и бездефектных гетероструктур. Эти ограничения были преодолены проведением многолетних исследований технологии получения и свойств гетероструктур Ge/Si под руководством О. П. Пчелякова и А. И. Никитина, а также разработкой новых технологических методов по повышению однородности и плотности массивов КТ А. В. Двуреченским и А. И. Якимовым. Эти технологические методы включают проведение низкоэнергетического ионного воздействия в процессе эпитаксии и в постростовом лазерном отжиге наногетероструктур. В результате этих работ найдены условия по повышению степени однородности КТ по их размеру и по управлению плотностью КТ (рис. 13; см. [31]).

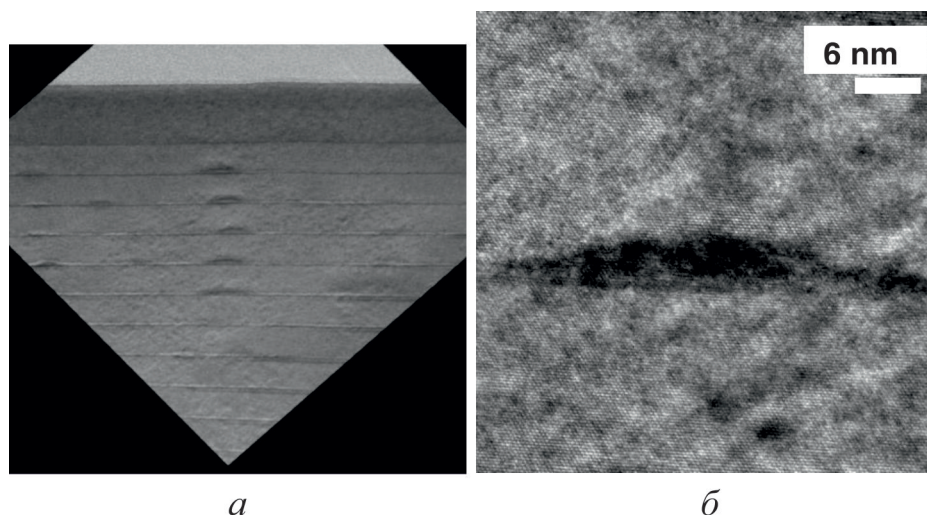


Рис. 13. Поперечное (110) высокоразрешающее электронно-микроскопическое изображение упорядоченной системы КТ Ge в матрице Si (а) и отдельной КТ Ge/Si в (001) кристалле Si (б)
Fig. 13. High-resolution transverse (110) image obtained using electron microscopy of an ordered system of quantum dots (QDs) of germanium in a silicon matrix (a) and a separate Ge/Si QD in a crystal (Si) (b)

На основе гетероструктур с квантовыми точками Ge/Si созданы фотодетекторы ближнего ИК-диапазона в виде p^+-i-n^+ -фотодиодов со встроенной в базовую область многослойной структуры КТ Ge/Si. Внутриподзонные оптические переходы в квантовых точках обеспечивают работу фотоприемников при нормальном падении оптического излучения, при малых темновых токах до 10^{-5} А/см², и, что важно, при увеличении рабочей температуры вплоть до комнатной температуры. Важной особенностью фотодетекторов с КТ в отличие от структур с квантовыми ямами является снятие запрета на оптические переходы, поляризованные в плоскости роста структур с КТ [32]. Квантовая эффективность детектора составила 3 %. Увеличение квантовой эффективности достигалось за счет эффекта многократного внутреннего отражения волноводной структуры на подложке кремний-на-изоляторе до значений ~21 % и ~16 % для длин волн 1,3 и 1,55 мкм соответственно. Важное достоинство данного типа фотодетекторов состоит в совместимости технологических процессов приготовления Ge-квантовых точек в кремниевой матрице со стандартными технологиями кремниевой микроэлектроники [31].

Другой способ селективного увеличения дырочного фототока фотоприемников с квантовыми точками Ge/Si состоит в формировании на поверхности фотодетектора двумерной плазмонной структуры в виде перфорированной металлической пленки Au. Увеличение квантовой эффективности в области 5,4 мкм и усиление фототока до 30 раз по узкой спектральной полосе пропускания (~0,3 мкм) связано с возбуждением локализованного поверхностного плазмонного резонанса на границе раздела металл – кремний. Этот результат показывает большой потен-

циал предложенного подхода для реализации высокопроизводительных Ge/Si-фотодетекторов с высоким спектральным разрешением [33].

Исследование электронной структуры гетеросистем с Ge/Si-квантовыми точками методом ЭПР привело к нескольким важным результатам. Вычисление времени спиновой релаксации из ширины сигнала ЭПР, которое может определяться как время декогеренизации спиновой системы (поперечное время спиновой релаксации), так и временем спин-решеточной релаксации (продольное время релаксации), показало неожиданно большое время спиновой релаксации для массива КТ. По ЭПР-измерениям спинового эха время спиновой релаксации составило 10 и 20 мкс для продольной и поперечной мод соответственно. Вторым важным результатом является обнаружение одновременного существования электронов у одной КТ с разными g -факторами и $\Delta g \approx 0,001$ для состояний на вершине и у подножия КТ (рис. 14, *a*). Третий вывод состоит в обнаружении коррелированности в расположении и в перемещении электронных состояний в системе упорядоченных КТ (рис. 14, *б, в*).

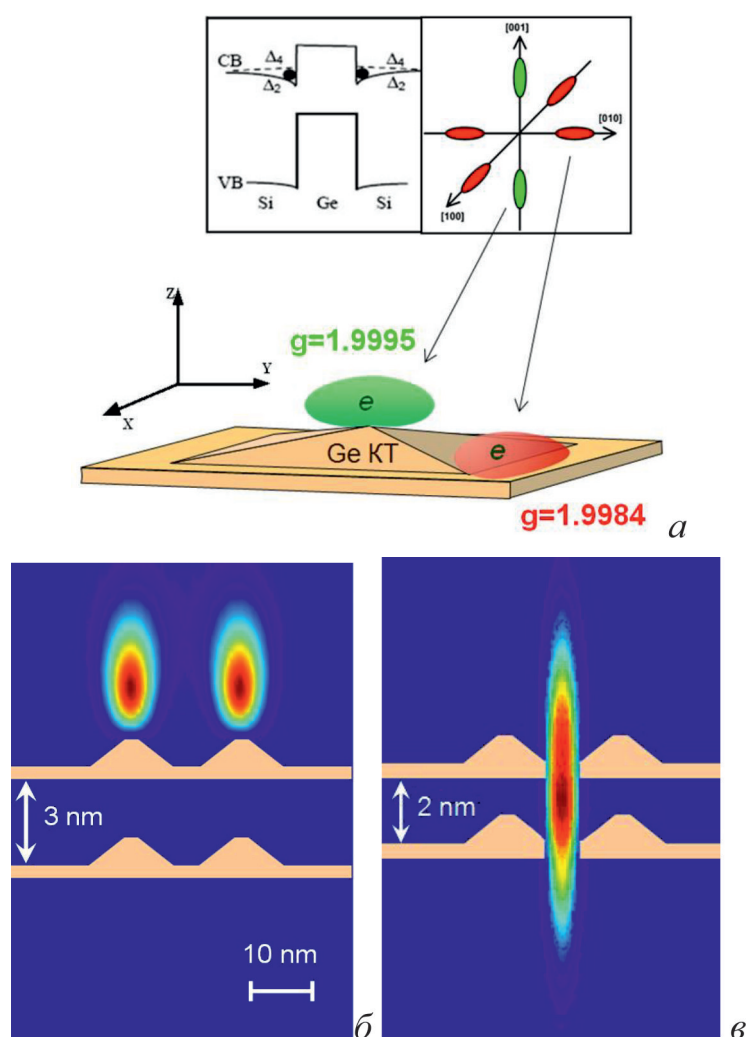


Рис. 14. Схематическое изображение областей локализации электронов в структурах с Ge/Si-квантовыми точками и значения g -факторов для электронов, локализованных в разных областях (*a*). Расчетные изображения волновых функций электронов, локализованных в разных Δ -долинах, в зависимости от строения молекул из квантовых точек (*б, в*)

Fig. 14. A schematic representation of the regions where electrons are localized in structures with Ge/Si QDs, and the values of the g -factors for electrons in different regions (*a*). Calculated images of wave functions for electrons localized in various Δ valleys, depending on the molecular structure of quantum dots (*б, в*)

Структуры с квантовыми точками, в которых подавлены механизмы спиновой релаксации, могут стать системами хранения спиновой информации и перспективны для создания каналов передачи спиновой информации. При создании логических элементов для квантовых вычислений инженерия g -фактора является основой для адресного обращения к отдельному кубиту и для проведения однокубитовых операций [34; 35].

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения полупроводниковых наноструктур с квантовыми свойствами для реализации новых элементов при решении задач развития современных информационных и телекоммуникационных технологий. При дальнейшем расширении работ в этой области ожидается применение полупроводниковых наноструктур в новых областях полупроводниковой электроники, таких как разработка универсальной памяти, нейропроцессоры, элементы спинтроники, создание квантовых вычислителей и развитие квантовой криптографии, создание элементов СВЧ и терагерцевой электроники, оптоэлектроники и радиофотоники, устройств теплового и ночного видения [36]. Приведенные в настоящем обзоре результаты свидетельствуют о безусловном технологическом суверенитете и перспективах технологического лидерства Российской Федерации в области квантовых технологий.

Summary

The obtained results demonstrate the efficiency of using semiconductor nanostructures with quantum properties for the implementation of new elements in solving the problems of developing modern information and telecommunication technologies. With further expansion of work in this area, it is expected that semiconductor nanostructures will be used in new areas of semiconductor electronics, such as the development of universal memory, neuroprocessors, spintronics elements, the creation of quantum computers and the development of quantum cryptography, the creation of microwave and terahertz electronics elements, optoelectronics and radiophotonics, thermal and night vision devices [36]. The results shown in presented review indicate clearly on technological sovereignty and prospects of technological leadership of Russian Federation in field of quantum technologies.

Список литературы

1. **Алферов Ж. И.** Гетеропереходы в полупроводниках и приборы на их основе // Физика и жизнь. М.–СПб.: Наука, 2006. С. 107–168.
2. **Mimura T.** The Early History of the High Electron Mobility Transistor (HEMT) // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technologies. 2002. Vol. 50. No. 3. P. 780–782.
3. **Журавлев К. С., Торопов А. И., Шамирзаев Т. С., Бакаров А. К., Раков Ю. Н., Мякишев Ю. Б.** Применение высокочистых слоев AlxGa1-xAs в эпитаксиальных структурах мощных полевых СВЧ-транзисторов // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. № 15. С. 8–14.
4. **Раков Ю. Н., Мякишев Ю. Б., Журавлев К. С., Торопов А. И., Шамирзаев Т. С., Бакаров А. К.** Применение высокочистых слоев AlxGa1-xAs в структурах мощных полевых СВЧ-транзисторов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2001. № 2. С. 51.
5. **Шамирзаев Т. С., Торопов А. И., Бакаров А. К., Журавлев К. С., Раков Ю. Н., Мякишев Ю. Б.** Получение твердых растворов AlxGa1-xAs и эпитаксиальных структур для мощных полевых СВЧ-транзисторов // Автометрия. 2001. № 3. С. 89–96.
6. **Раков Ю. Н., Торопов А. И., Мякишев Ю. Б., Журавлев К. С., Цибаев В. П.** Мощные псевдоморфные гетероструктурные полевые транзисторы с легированным каналом //

- 17-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2007. С. 554–555.
7. Протасов Д. Ю., Бакаров А. К., Торопов А. И., Бер Б. Я., Казанцев Д. Ю., Журавлев К. С. Подвижность двумерного электронного газа в DA-pHEMT гетероструктурах с различной шириной профиля δ -n-слоев // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52, № 1. С. 48–55.
 8. Журавлев К. С., Протасов Д. Ю., Бакаров А. К., Торопов А. И., Гуляев Д. В., Лапин В. Г., Лукашин В. М., Пашковский А. Б. Новый тип гетероструктур для мощных pHEMT-транзисторов // Автометрия. 2020. Т. 56, № 5. С. 36–43.
 9. Bethea G. C., Levine B. F., Asom M. T., Leibenguth R. E., Stayt J. W., Glogovsky K. G., Morgan R. A., Blackwell J. D., Parrish W. J. Long wave infrared 128x128 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum camera and imaging system // IEEE Trans. On Electron Devices. 1993. Vol. 40. No. 11. P. 1957–1963.
 10. Овсяк В. Н., Торопов А. И., Шашкин В. В. Матричные ИК-фотоприемники на основе многослойных гетероструктур с квантовыми ямами // Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Новосибирск: Наука 2001. С. 242–264.
 11. Торопов А. И., Шашкин В. В. ИК-фотоприемники на многослойных гетероструктурах GaAs/AlGaAs // Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. СО РАН. 2004. С. 252–272.
 12. Изготовление матричных фоточувствительных элементов на основе многослойных структур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами // Актуальные проблемы физики полупроводников. Наноструктуры, эпитаксия, фотоника и электроника; ред. Латышев А. В., Двуреченский А. В. Новосибирск: Изд-во ИФП СО РАН, 2017. С. 123–124.
 13. Казаринов Р. Ф., Сурис Р. А. О возможности усиления электромагнитных волн в полупроводниках со сверхрешеткой // Физика и техника полупроводников. 1971. Т. 5, № 4. С. 797.
 14. Faist J., Capasso F., Siveo D. I., Hutchison A. I., Cho A. Y. Quantum Cascade Laser // Science. 1994. № 264. P. 553–556.
 15. Жуков А. Е., Цирлин Г. Э., Алферов Ж. И. и др. Многослойные гетероструктуры для квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 5. С. 674–678.
 16. Хабибуллин Р. А., Середина М. А., Сурис Р. А. Применение квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона // Терагерцовая фотоника и оптоэлектроника. М.: РАН, 2024. С. 464–521.
 17. Паулиш А. Г., Новгородов Б. Н., Хрящев С. В., Кузнецов С. А. Терагерцовый визуализатор на основе ТГц-ИК-конвертера // Автометрия. 2019. № 55, № 1. С. 55–63.
 18. Терагерцевый визуализатор на основе ТГц-ИК-конвертера // Актуальные проблемы физики полупроводников. Наноструктуры, эпитаксия, фотоника и электроника; ред. Латышев А. В. Новосибирск: Изд-во ИФП СО РАН, 2020. С. 186–188.
 19. Sale T. E. Vertical Cavity Surface Emitting Lasers. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1995.
 20. Vertical Cavity Surface Emitting Lasers: Design, Fabrication, Characterization and Application. Ed. Wilsen C.W., Temkin H., Coldren L. Cambridge. University Press, 1999.
 21. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Technology and Applications. Ed. Cheng J., Dutta N. K. Gordon and Breach Science Publ., 2000.
 22. Гайслер В. А., Торопов А. И. Лазеры с вертикальным резонатором на основе $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ квантовых ям // Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. Изд-во СО РАН, 2004. С. 272–298.
 23. Гутаковский А. К., Латышев А. В., Чувилин А. Л. Структура дефектов и границ раздела в полупроводниковых гетеросистемах. Новосибирск: Параллель, 2016. С. 179–182.

24. Гайлер В. А., Гайслер А. В., Дерезев И. А., Ярошевич А. С., Бакаров А. К., Дмитриев Д. В., Калагин А. К., Торопов А. И. и др. Сверхминиатюрные излучатели на основе полупроводниковых наноструктур // Юбилейный сб. избр. тр. Ин-та физики полупроводников им. А. В. Ржанова; отв. ред. А. В. Латышев, А. В. Двуреченский, А. Л. Асеев. Новосибирск: Параллель, 2014. С. 378–400.
25. Гайлер В. А., Дерезев И. А., Гайслер А. В., Ярошевич А. С., Бакаров А. К., Дмитриев Д. В., Торопов А. И. и др. Лазеры с вертикальным резонатором для миниатюрных квантовых стандартов частоты // Автометрия. 2021. Т. 57, № 5. С. 4–10.
26. Скворцов М. Н., Игнатович С. М., Вишняков В. И., Квашнин Н. Л., Месенцова И. С. и др. Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного племения населенностей в парах атомов ^{87}Rb // Квантовая электроника. 2020. Т. 50, № 6. С. 576–580.
27. Гайслер В. А., Дерезев И. А., Гайслер А. В., Бакаров А. К., Торопов А. И., Щеглов Д. В., Латышев А. В., Асеев А. Л. Неклассические излучатели на основе квантовых точек // Вестник РФФИ. 2015. № 4. С. 42–54.
28. Haisler V. A., Haisler A. V. H., Derebezov I. A., Yaroshevich A. S., Bakarov A. K., Dmitriev D. V., Kalagin A. K., Toropov A. I. Superminiature radiation sources based on semiconductor nanostructures // *Advanced in Semiconductor Nanostructures. Growth, Characterization, Properties and Applications*. Eds. A. V. Latyshev, A. V. Dvurechenskii, A. L. Aseev. Elsevier, 2017. P. 437–461.
29. Гайслер В. А., Дерезев И. А., Гайслер А. В., Дмитриев Д. В., Торопов А. И. и др. Сверхминиатюрные излучатели на основе AlInAs квантовых точек // Актуальные проблемы физики полупроводников. Наноструктуры, эпитаксия, фотоника и электроника. Новосибирск: Изд-во ИФП СО РАН, 2018. С. 104–105.
30. Дерезев И. А., Гайслер В. А., Гайслер А. В., Дмитриев Д. В., Торопов А. И., Von Helversen M., De la Haye C., Bounouar S., Reitzenstein S. Неклассические источники света на основе селективно позиционированных микролинзовых структур и $(111)\text{In(Ga)As}$ квантовых точек // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53, № 10. С. 1338–1342.
31. Двуреченский А. В., Якимов А. И. Наногетероструктуры с квантовыми точками на основе кремния // Юбилейный сб. избр. тр. Ин-та физики полупроводников им. А. В. Ржанова; отв. ред. А. В. Латышев, А. В. Двуреченский, А. Л. Асеев. Новосибирск: Параллель, 2014. С. 76–101.
32. Phillips J. Evaluation of the fundamental properties of quantum dot detectors // *J. Appl. Phys.* 2002. Vol. 91. No. 7. P. 4590–4594.
33. Yakimov A. I., Kirienko V. V., Bloshkin A. A., Armbrister V. A., Dvurechenski. A. V. Plasmon polariton enhanced mid-infrared photodetectors based on Ge quantum dots in Si // *J. Appl. Phys.* 2017. Vol. 122. No. 313. P. 133101.
34. Zinovieva A. F., Timofeev V. A., Nenashev A. V., Dvurechenskii, A. V., Kulik A. V. Electron localization in Ge/Si heterostructures with double quantum dots detected by an electron spin resonance method // *Phys. Rev. B*. 2013. Vol. 88. P. 255308.
35. Зиновьева А. Ф., Двуреченский А. В., Горнов А. Ю., Зароднюк Т. С., Кошкарев А. А., Ненашев А. В. Квантовые логические операции на спиновых состояниях в непрерывном СВЧ-поле // Микроэлектроника. 2018. Т. 47. № 4. С. 49–58.
36. Асеев А. Л. Полупроводники и нанотехнологии. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2023. 143 С.

References

1. Alferov Zh. I. Heterojunctions in semiconductors and devices based on them. In: *Physics and Life*. Moscow, S. Petersburg, Nauka publ., 2006, pp. 107–168. (in Russ.)

2. **Mimura T.** The Early History of the High Electron Mobility Transistor (HEMT). *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technologies*, 2002, vol. 50, no. 3, pp. 780–782. (in Russ.)
3. **Zhuravlev K. S., Toropov A. I., Shamirzaev T. S., Bakarov A. K., Rakov Yu. N., Myakishev Yu. B.** Application of high purity layers of Al_xGa_{1-x}As in epitaxial structures of high power high frequency transistors. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 1999, vol. 25, no. 15, pp. 8–14. (in Russ.)
4. **Rakov Yu. N., Myakishev Yu. B., Zhuravlev K. S., Toropov A. I., Shamirzaev T. S., Bakarov A. K.** Application of high purity layers of Al_xGa_{1-x}As in structures of high power high frequency transistors. *Electronic engineering. Ser. 1. High Frequency Technics*, 2001, no. 2, pp. 51. (in Russ.)
5. **Shamirzaev T. S., Toropov A. I., Bakarov A. K., Zhuravlev K. S., Rakov Yu. N., Myakishev Yu. B.** Obtaining of solid solutions of Al_xGa_{1-x}As and epitaxial structures for high power microwave transistors. *Autometry*, 2001, no. 3, pp. 89–96. (in Russ.)
6. **Rakov Yu. N., Toropov A. I., Myakishev Yu. B., Zhuravlev K. S., Tsibaev V. P.** High power pseudomorphic heterostructural field effect transistors with doped channel. *17th Intern. Crimean Conference. Microwave technology and telecommunication technologies*. Sevastopol, 2007, pp. 554–555. (in Russ.)
7. **Protasov D. Yu., Bakarov A. K., Toropov A. I., Ber B. Ya., Kazantsev D. Yu., Zhuravlev K. S.** Mobility of two-dimensional electron gas in DA-*p*HEMT heterostructures with different width of δ -*n*-layers. *Physics and technology of semiconductor*, 2018, vol. 52, no. 1, pp. 48–55. (in Russ.)
8. **Zhuravlev K. S., Protasov D. Yu., Bakarov A. K., Toropov A. I., Gulyaev D. V., Lapin V. G., Lukashin V. M., Pashkovsky A. B.** New type of heterostructures for high power pHEMT. *Autometry*, 2020, vol. 56, no. 5, pp. 36–43. (in Russ.)
9. **Bethea G. C., Levine B. F., Asom M. T., Leibenguth R. E., Stayt J. W., Glogovsky K. G., Morgan R. A., Blackwell J. D., Parrish W. J.** Long wave infrared 128x128 Al_xGa_{1-x}As/GaAs quantum camera and imaging system. *IEEE Trans. On Electron Devices*, 1993, vol. 40, no. 11, pp. 1957–1963.
10. **Ovsiyuk V. N., Toropov A. I., Shashkin V. V.** Matrix photodetectors on base on multilayered heterostructures with quantum wells GaAs/AlGaAs. In: *Matrix Photodetectors of the Infrared Range*. Ed. Sinitsa S. P. Novosibirsk: Science, 2001, pp. 242–264. (in Russ.)
11. **Toropov A. I., Shashkin V. V.** IR-photodetectors on multilayered heterostructures GaAs/AlGaAs. In: *Nanotechnologies in Semiconductor Electronics*. Ed. Aseev A. L. SB RAS Publ., 2004, pp. 252–272. (in Russ.)
12. Fabrication of matrix photosensitive elements on the base of multilayered structures GaAs/AlGaAs with quantum wells. In: *Actual problems of semiconductor physics. Nanostructures, epitaxy, photonics and electronics*. Ed. A.V. Latyshev, A.V. Dvurechenskiy. IFP SB RAS Publ., 2017, pp. 123–124. (in Russ.)
13. **Kazarinov R. F., Suris R. A.** Possibility of the amplification of electromagnetic waves in a semiconductors with a superlattice. *Physics and technology of semiconductors*, 1971, vol. 5, no. 4, p. 797. (in Russ.)
14. **Faist J., Capasso F., Siveo D.I., Hutchison A. I., Cho A. Y.** Quantum Cascade Laser. *Science*, 1994, no. 264, pp. 553–556.
15. **Zhukov A. E., Zirlin G. E., Alferov Zh. I. et al.** Multilayered heterostructures for quantum cascade lasers of terahertz range. *Physics and technology of semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 5, pp. 674. (in Russ.)
16. **Khabibullin R. A., Seredina M. A., Suris R. A.** Application of quantum cascade lasers of terahertz range. *Terahertz photonics and optoelectronics*. Ed. V. Ya. Panchenko. Moscow, Russian Academy of Sciences, 2024, pp. 464–521. (in Russ.)

17. **Paulish A. G., Novgorodov B. N., Khryashchev S. V., Kuznetsov S. A.** Terahertz visualizer on the base of THz-IR-converter. *Autometry*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 55–63. (in Russ.)
18. Terahertz visualizer on the base of THz-IR-converter. *Actual problems of semiconductor physics. Nanostructures, epitaxy, photonics and electronics*. Ed. A.V. Latyshev. IFP SB RAS Publ., 2020, pp.186–188. (in Russ.)
19. **Sale T. E.** Vertical Cavity Surface Emitting Lasers. John Wiley & Sons. Inc. New York., 1995.
20. Vertical Cavity Surface Emitting Lasers: Design, Fabrication, Characterization and Application. Ed. C.W. Wilsen, H. Temkin, L. Coldren. Cambridge University Press, 1999.
21. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Technology and Applications. Ed. J. Cheng, N. K. Dutta. Gordon and Breach Science Publ., 2000.
22. **Gaisler V. A., Toropov A. I.** Nanotechnology in semiconductor electronics. 2004. Ed. A. L. Aseev. SB RAS Publ., pp. 272–298. (in Russ.)
23. **Gutakovsky A. K., Latyshev A. V., Chuvilin A. L.** The structure of defects and interfaces in semiconductor heterosystems. Novosibirsk, Parallel Publ, 2016, pp. 179–182. (in Russ.)
24. **Gaisler V. A., Geisler A. V., Derebezov I. A., Yaroshevich A. S., Bakarov A. K., Dmitriev D. V., Kalagin A. K., Toropov A. I. et al.** Superminiature radiation sources based on semiconductor nanostructure. *Jubilee collection of Selected works of the Rzhannov Institute of Semiconductor Physics*, Ed. A.V. Latyshev, A.V. Dvurechenskiy, A.L. Aseev. Novosibirsk, Parallel Publ., 2014, pp. 378–400. (in Russ.)
25. **Gaisler V. A., Derebezov I. A., Gaisler A. V., Yaroshevich A. S., Bakarov A. K., Dmitriev D. V., Toropov A. I. et al.** Vertical cavity lasers for miniature quantum frequency standards. *Autometry*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 4–10. (in Russ.)
26. **Skvortsov M. N., Ignatovich S. M., Vishnyakov V. I., Kvashnin N. L., Mesenzova I. S. et al.** Miniature quantum frequency standard based on phenomenon of quantum level trapping in vapour of ^{87}Rb atoms. *Quantum electronics*, 2020, vol. 50, no. 6, pp. 576–580. (in Russ.)
27. **Gaisler V. A., Derebezov I. A., Gaisler A. V., Bakarov A. K., Toropov A. I., Shcheglov D. V., Laiyshev A. V., Aseev A. L.** Non-classical emitters based on quantum dots. *Bulletin of the Russian Foundation for Basic Research*, 2015, no. 4, pp. 42–54. (in Russ.)
28. **Haisler V. A., Haisler A. V., Derebezov I. A., Yaroshevich A. S., Bakarov A. K., Dmitriev D. V., Kalagin A. K., Toropov A. I.** Superminiature radiation sources based on semiconductor nanostructures. *Advances of semiconductor nanostructures. Growth, Characteristics, Properties and Applications*. Eds. A. V. Latyshev, A. V. Dvurechensky, A. L. Aseev. Elsevier, 2017, pp. 437–461.
29. **Gaisler V. A., Derebezov I. A., Gaisler A. V., Dmitriev D. V., Toropov A. I. et al.** Superminiature radiation sources based on AlInAs quantum dots. *Actual problems of semiconductor physics. Nanostructures, epitaxy, photonics and electronics*. Ed. A. V. Latyshev. Ed. IFP SB RAS Publ., 2018, pp. 104–105. (in Russ.)
30. **Derebezov I. A., 24. Gaisler V. A., Gaisler A. V., Dmitriev D. V., Toropov A. I., Von Helversen M., de la Haye K., S. Bunoar, Raizenshtein S.** Nonclassic light sources ,fised on selective positioned microlens structures and (111) In(Ga)As quantum dots. *Physics and Technics of semiconductors*, 2019, vol. 53, no. 10, pp. 1338–1342. (in Russ.)
31. **Dvurechenskii A. V., Yakimov A. I.** Nanoheterostructures with quantum dots based on Silicon. *Jubilee collection of Selected works of the Rzhannov Institute of Semiconductor Physics*. Eds. A. V. Latyshev, A. V. Dvurechenskiy, A. L. Aseev. Novosibirsk, Parallel Publ., 2014, pp. 76–101. (in Russ.)
32. **Phillips J.** Evaluation of the fundamental properties of quantum dot detectors. *Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 91, no. 7, pp. 4590–4594.
33. **Yakimov A. I., Kiriyeenko V. V., Bloshkin A. A., Armbrister V. A., Dvurechenskiy A. V.** Plasmon-polariton photodetectors of the mid-infrared range based on Ge quantum dots in Si. *J. Appl. Phys*, 2017, vol. 122, no. 313, pp. 133101.

34. **Zinovieva A. F., Timofeev V. A., Nenashev A. V., Dvurechenskiy A. V., Kulik A. V.** Localization of electrons in Ge/Si heterostructures with double quantum dots detected by the electron spin resonance method. *Phys. Rev. B.*, 2013, vol. 88, pp. 255308.
35. **Zinovieva A. F., Dvurechenskiy A. V., Gornov A. Yu., Zarodnyuk T. S., Koshkarev A. A., Nenashev A. V.** Quantum logic operations on spin states in a continuous microwave field. *Microelectronics*, 2018, vol. 47, no. 4, pp. 49–58. (in Russ.)
36. **Aseev A. L.** Semiconductors and Nanotechnologies. Novosibirsk, NSU publ., 2023, 143 p. (in Russ.)

Сведения об авторе

Асеев Александр Леонидович, доктор физико-математических наук, академик РАН

Information about the Author

Aleksander L. Aseev, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Academician of RAS

*Статья поступила в редакцию 09.06.2025;
одобрена после рецензирования 16.06.2025; принята к публикации 25.06.2025*

*The article was submitted 09.06.2025;
approved after reviewing 16.06.2025; accepted for publication 25.06.2025*