ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 2, с. 241–244

УДК 537.311.322:535.37:535-47

ИНЖЕКЦИОННЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР С ЦИРКУЛЯРНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2021 г. А. А. Максимов[1], *, Е. В. Филатов[1], И. И. Тартаковский[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт физики твердого тела Российской академии наук”, Черноголовка, Россия*

**E-mail: maksimov@issp.ac.ru*

Поступила в редакцию 28.08.2020 г.
После доработки 25.09.2020 г.
Принята к публикации 28.10.2020 г.

Измерены спектры и степени циркулярной поляризации излучения одиночных квантовых точек InAs, внедренных в планарный GaAs волновод полупроводниковой наноструктуры, и полупроводникового лазера с электрической накачкой на основе AlAs/AlGaAs микрорезонатора с квантовыми ямами GaAs в активной области, верхний слой которых представлял собой квадратную решетку фотонного кристалла с хиральной симметрией.

DOI: 10.31857/S0367676521020204

ВВЕДЕНИЕ

Создание компактных устройств, с помощью которых можно управлять состоянием поляризации излучаемого света является одной из центральных проблем нанофотоники. Компактные источники циркулярно-поляризованного излучения открывают (подобно спину в спинтронике) возможности их дальнейшего практического приложения в таких интенсивно развивающихся областях как квантовые технологии для передачи и записи информации и оптоэлектроника.

Одним из возможных решений задачи создания компактных поляризационных устройств является использование для этой цели наноструктур на основе обычных ахиральных $A^{III}B^{V}$ полупроводников, в которых с помощью частичного травления в верхнем слое формируется модулированная структура, обладающая хиральной симметрией. Таким образом, подобные наноструктуры, в которых неэквивалентность право- и лево-поляризованных электромагнитных мод возникает из-за общей хиральной симметрии системы, могут быть использованы для создания компактных источников циркулярно-поляризованного излучения без приложения внешнего магнитного поля.

В настоящей работе представлены результаты исследования спектрально-поляризационных особенностей излучения одиночных InAs квантовых точек, внедренных в планарный GaAs волновод, верхний слой которого с помощью травления выполнен в виде квадратной решетки фотонного кристалла с хиральной симметрией, а также данные по изучению в планарных GaAs/AlGaAs микрорезонаторах с квантовыми ямами в активной области и с хирально модулированным верхним брэгговским зеркалом циркулярно-поляризованного лазерного излучения, возникающего при токовой инжекции носителей заряда.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Циркулярно-поляризованное излучение одиночных квантовых точек

В работах [1–3] было продемонстрировано, что в наноструктурах с планарным GaAs волноводом и в AlAs/AlGaAs микрорезонаторах с брэгговскими зеркалами, в которых верхний слой структур в результате частичного травления представлял собой квадратную решетку фотонного кристалла с хиральной симметрией, излучение внедренного слоя InAs квантовых точек (КТ) при оптической накачке обладало циркулярной поляризацией. Степень циркулярной поляризации ρ_C в зависимости от параметров наноструктуры могла достигать величины $\rho_C \approx 96\%$ относительно слабого неполяризованного бесструктурного фона и ≈81% с учетом фона [3] и обладала сильной угловой зависимостью спектров излучения [4], а знак (σ^+ или σ^-) циркулярной поляризации коррелировал с соответствующей хиральностью фотонного кристалла на поверхности наноструктуры в полном согласии с теоретическими расчетами [2, 5].

Экспериментальные результаты, приведенные в работах [1–4], относятся к исследованию излучения ансамбля квантовых InAs точек. Полуширины полос излучения при этом, измеренные с высоким угловым разрешением в лучшем случае составляли ~2.3 нм [4]. Одиночная квантовая точка, помещенная в наноструктуру с хирально-модулированным верхним слоем в виде квадратной

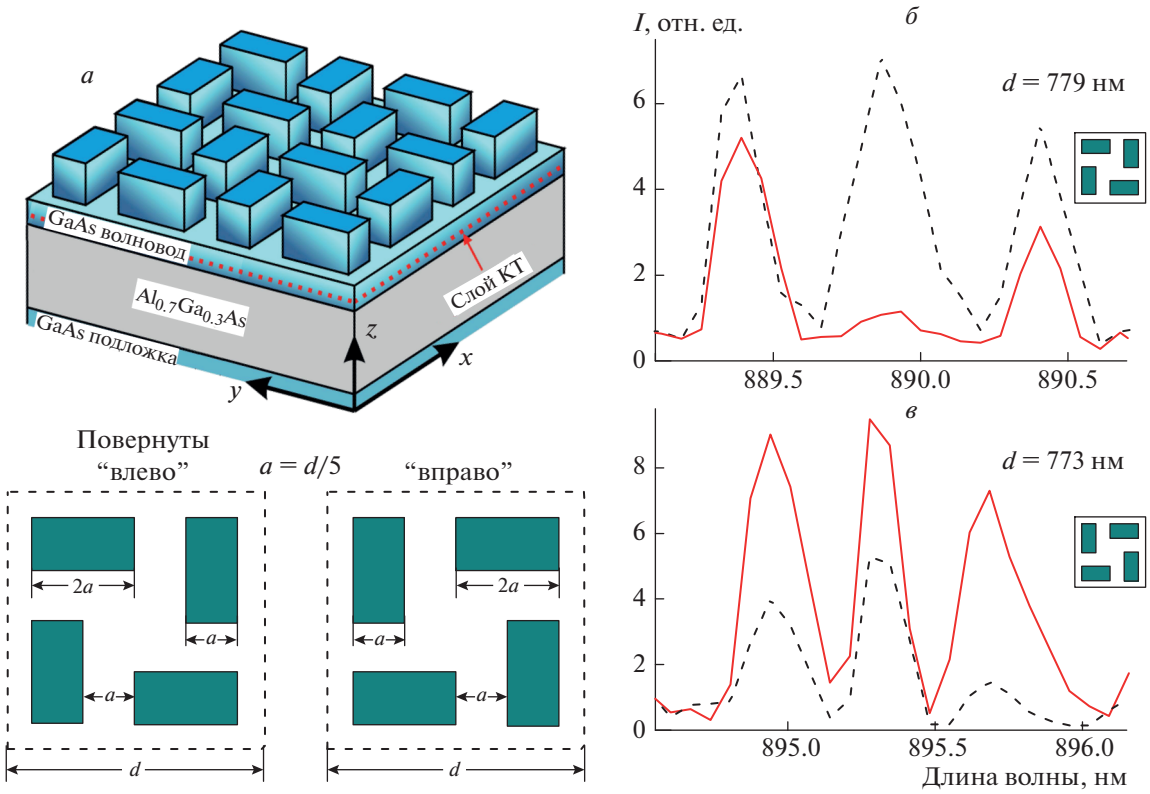

Рис. 1. Схема полупроводниковой наноструктуры с волноводным хиральным слоем GaAs, содержащим слой квантовых точек; внизу – вид сверху на элементарные ячейки фотонных кристаллов с различной хиральностью (*а*). Спектры излучения одиночных КТ в σ^+ (сплошные кривые) и σ^- (пунктирные кривые) циркулярной поляризации из мез с различной хиральностью и периодом квадратной решетки фотонного кристалла $d = 779$ нм (*б*) и $d = 773$ нм (*в*).

решетки фотонного кристалла, является, по существу, однофотонным источником света с контролируемым знаком циркулярной поляризации излучения, который определяется хиральностью и периодом кристалла, а также длиной волны излучения [2–4]. Поэтому, несомненный интерес представляет изучение поляризационных особенностей излучения одиночных КТ в подобных наноструктурах.

В настоящей работе исследования проводились на образцах, которые представляли собой планарный GaAs волновод с внедренным слоем InAs квантовых точек. Верхний слой образца (рис. 1*а*) – мембрана из GaAs толщиной 691 нм, выращенная на буферном слое $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$ толщиной 1 мкм методом молекулярно-пучковой эпитаксии, которая состоит из планарного волновода толщиной 263 нм с внедренным слоем квантовых точек InAs (излучающих в диапазоне $\lambda = 860–930$ нм). На поверхности волновода в результате частичного травления мембраны GaAs на глубину 428 нм сформированы фотонные кристаллы в виде мез размером 100×100 мкм^2. Верхний слой структуры с помощью травления выполнен в виде квадратной решетки фотонного кристалла с различным периодом ($d = 750–1005$ нм). Элементарная ячейка фотонного кристалла состояла из 4 вытянутых прямоугольных микростолбиков GaAs, повернутых на 90° относительно друг друга “влево” или “вправо”, и обладала хиральной симметрией, как показано внизу на рис. 1*а*.

Обычно при исследовании излучения одиночных КТ используют маску с субмикронными отверстиями, которую наносят на поверхность образца. В нашем случае при наличии фотонного кристалла в верхнем слое планарного волновода наноструктуры этот метод принципиально не может быть применен. Плотность квантовых точек в слое была достаточно высока и составляла 10–20 КТ/мкм^2 в исследуемых образцах. Поэтому для исследования поляризационных зависимостей излучения одиночных КТ (а не ансамбля КТ) требуется сформировать пятно фотовозбуждения с минимальными поперечными размерами на поверхности образца ≤1 мкм и осуществлять регистрацию излучения с одного и того же фиксированного участка выбранной мезы образца, помещенного в гелиевый оптический криостат при $T = 1.8$ K. Этого удалось достичь благодаря использованию объектива микроскопа с большим рабочим расстоянием (34 мм), с помощью которого одновременно осуществлялась как фокусиров-

ка излучения He-Ne лазера на поверхности образца, так и собиралось выходящее излучение из пятна возбуждения с пространственным разрешением ~1 мкм. Кроме того, специально обеспечивалась стабилизация пространственного положения (≤0.5 мкм) образца за время измерения. Спектр излучения регистрировался с помощью спектрометра МДР-23, оснащенного охлаждаемым Si-CCD-детектором.

Полученные результаты по изучению циркулярной поляризации излучения одиночных квантовых точек с планарным GaAs волноводом (без углового разрешения) представлены на рис. 1*б* и 1*в*. Легко видеть, что в целом знак циркулярной поляризации отдельных узких полос излучения одиночных КТ коррелирует с хиральностью фотонного кристалла на мембране из GaAs. Однако степень циркулярной поляризации излучения отличается для разных КТ. Природа такого отличия может быть связана как с геометрической формой самой КТ, так и с положением КТ относительно элементарной ячейки (в центре или на периферии [2, 3, 5]). Чтобы ответить на этот вопрос, требуются эксперименты на специально выращенных наноструктурах, обладающих хиральной симметрией.

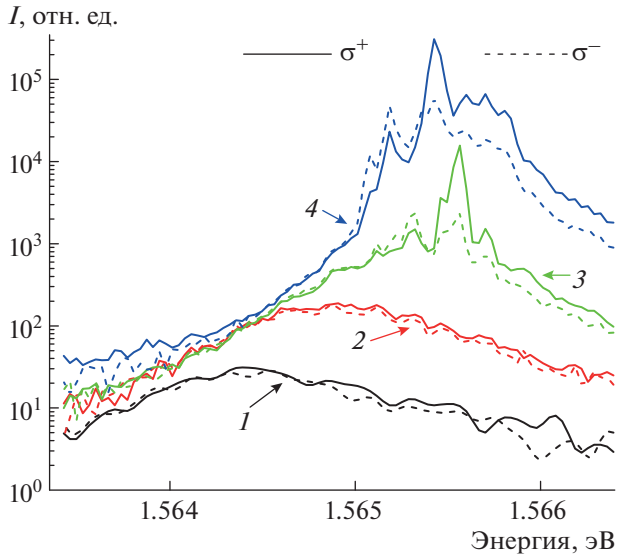

Рис. 2. Спектры излучения хиральной полупроводниковой лазерной структуры в σ^+ (сплошные кривые) и σ^- (пунктирные кривые) циркулярной поляризации при различных значениях импульсного тока *J*: 1.7 (кривые *1*), 6.8 (кривые *2*), 12.7 (кривые *3*), 27 мА (кривые *4*).

Циркулярно-поляризованное излучение полупроводникого лазера с электрической накачкой

Возможность получения циркулярно-поляризованного лазерного излучения была продемонстрирована в работе [6] при возбуждении оптической накачкой AlAs/AlGaAs микрорезонаторов с GaAs квантовыми ямами (КЯ) в активной области и с вытравленным на верхнем брэгговском зеркале фотонным кристаллом с хиральной симметрией. Исследования высококачественных полупроводниковых микрорезонаторов с высоким коэффициентом добротности и с допированными брэгговскими зеркалами позволило впервые реализовать поляритонный лазер с электрической накачкой, обладающий существенно более низким порогом генерации, чем обычные инжекционные полупроводниковые лазеры [7]. Следующим шагом в этом направлении, имеющим также прикладное значение, является получение циркулярно-поляризованного лазерного излучения в микрорезонаторах с КЯ в активной области и с хирально модулированным верхним брэгговским зеркалом при электрической накачке [8].

В настоящей работе представлены результаты исследования поляризационных и спектральных характеристик излучения лазерных структур на основе λ-микрорезонатора $Al_{0.40}Ga_{0.60}As$ с четырьмя GaAs квантовыми ямами толщиной 7 нм, разделенными 4 нм $Al_{0.40}Ga_{0.60}As$ барьерами. Нижнее брэгговское зеркало состояло из 27 допированных кремнием пар слоев $AlAs/Al_{0.20}Ga_{0.80}As$, а верхнее – из 23.5 пар слоев, допированных углеродом. Отдельный лазер представлял собой микростолбик размером 60 × 60 мкм^2. На верхнем зеркале внутри площадки, ограниченной золотым кольцевым контактом, в результате частичного травления был сформирован фотонный кристалл размером 36 × 36 мкм^2, элементарная ячейка которого образована за счет вытравливания на глубину, равную толщине 4.75 пар слоев $AlAs/Al_{0.20}Ga_{0.80}As$ четырьмя микростолбиками с основаниями в виде вытянутых прямоугольников, повернутых “влево” или “вправо” на 90° относительно друг друга. Период фотонного кристалла составлял $d = 880$ нм, а линейный размер хирального элемента изменялся в диапазоне 256–280 нм.

Для возбуждения излучения к каждому отдельному лазеру прикладывалось импульсное напряжение величиной до ~75 В. Импульсное возбуждение позволяло прикладывать более высокое напряжение, которое не приводило к повреждению (пробою) лазерной структуры. Длительность прямоугольных импульсов возбуждения составляла ~1 мкс при частоте следования 10 кГц.

На рис. 2 представлены спектры излучения одного из таких лазеров в различных циркулярных поляризациях при различных значениях текущего через образец импульсного тока *J*. При увеличении тока возникает несколько мод лазерной генерации и наблюдается резкий сверхлинейный рост интенсивности линий излучения, который сопровождался сужением их спектральной ширины до величин ≤40 мкэВ (аппаратное разрешение спектрометра с высоким разрешением) и углового пространственного распределения до 1.5°–2°.

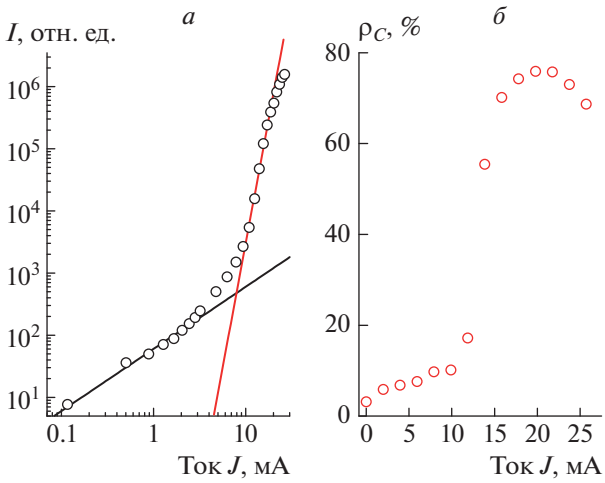

Рис. 3. Зависимость интенсивности I (*а*) и степени циркулярной поляризации ρ_C (*б*) излучения полупроводникового лазера на основе хирального микрорезонатора от величины импульсного тока J.

Степень циркулярной поляризации ρ_C лазерной генерации при этом в некоторых узких линиях могла достигать величины более 90%.

Типичная зависимость интенсивности лазерного излучения от текущего через образец импульсного тока J представлена на рис. 3*а*. Видно, что линейная зависимость интенсивности излучения I при малых токах, сменяется резким ее сверхлинейным ростом при достижении пороговых значений тока. Следует также отметить, что степень циркулярной поляризации излучения при низких токах (в спонтанном режиме) была относительно низкой $\rho_C \leq 10\%$, а начиная с пороговых значений импульсного тока при его увеличении наблюдается резкий рост степени циркулярной поляризации лазерного излучения (рис. 3*б*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования спектров и поляризационных свойств излучения одиночных InAs квантовых точек, внедренных в планарный GaAs волновод полупроводниковой наноструктуры с хиральной симметрией, и излучения полупроводникового лазера с электрической накачкой на основе AlAs/AlGaAs микрорезонатора с GaAs квантовыми ямами в активной области, верхний слой которых представлял собой квадратную решетку фотонного кристалла с хиральной симметрией показали возможность получения в наноструктурах, обладающих хиральной симметрией, циркулярно-поляризованного излучения без приложения магнитного поля. Тем самым продемонстрирована возможность реализации компактных однофотонных источников света и лазерных источников света с контролируемым циркулярно-поляризованным излучением на основе хирально-модулированных полупроводниковых наноструктур.

Авторы выражают благодарность В.Д. Кулаковскому и С.Г. Тиходееву за многочисленные полезные обсуждения, а также С. Хёфлингу и Х. Шнайдеру за предоставленные образцы для исследований. Работа частично поддержана РФФИ (проекты № 19-02-00697 и № 20-02-00534).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Konishi K., Nomura M., Kumagai N. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. Art. No 057402.
2. *Maksimov A.A., Tartakovskii I.I., Filatov E.V. et al.* // Phys. Rev. B. 2014. V. 89. Art. No 045316.
3. *Lobanov S.V., Tikhodeev S.G., Gippius N.A. et al.* // Phys. Rev. B. 2015. V. 92. Art. No 205309.
4. *Максимов А.А., Пещеренко А.Б., Филатов Е.В. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. № 10. С. 615; *Maksimov A.A., Peshcherenko A.B., Filatov E.V. et al.* // JETP Lett. 2017. V. 106. No 10. P. 643.
5. *Lobanov S.V., Weiss T., Gippius N.A. et al.* // Opt. Lett. 2015. V. 40. No 7. P. 1528.
6. *Demenev A.A., Kulakovskii V.D., Schneider C. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109. Art. No 171106.
7. *Schneider C., Rahimi-Iman A., Kim N.Y. et al.* // Nature. 2013. V. 497. No 7449. P. 348.
8. *Максимов А.А., Филатов Е.В., Тартаковский И.И. и др.* // Тр. XXIV междунар. симп. (Нижний Новгород, 2020). Т. 2. С. 653.

Electrically pumped semiconductor laser with circularly polarized radiation

A. A. Maksimov[a], *, E. V. Filatov[a], I. I. Tartakovskii[a]

[a] *Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

**e-mail: maksimov@issp.ac.ru*

The radiation and circular polarization degree spectra were studied from single InAs quantum dots embedded in a planar GaAs waveguide and an electrically pumped semiconductor laser based on an AlAs/AlGaAs microcavity with GaAs quantum wells in the active region. The upper layers of the investigated semiconductor nanostructures were fabricated as a square lattice of a photonic crystal with chiral symmetry.