

УДК 537.311.322:535.37:535-47

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЦИРКУЛЯРНО-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ХИРАЛЬНЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

© 2022 г. А. А. Максимов<sup>1</sup>, \*, Е. В. Филатов<sup>1</sup>, И. И. Тартаковский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

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

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 22.12.2021 г.

Выполнены исследования температурной зависимости вплоть до температуры ~140 К генерации света и степени циркулярной поляризации излучения полупроводникового лазера с электрической накачкой на основе AlAs/AlGaAs микрорезонатора с GaAs квантовыми ямами в активной области, верхнее брэгговское зеркало которого представляло собой квадратную решетку фотонного кристалла с хиральной симметрией. При максимальных значениях импульсного тока накачки ~25 мА развита многомодовая лазерная генерация в виде спектрально узких полос с высокой степенью величины циркулярной поляризации излучения >70% наблюдалась вплоть до температур ~90 К.

DOI: 10.31857/S0367676522040159

### ВВЕДЕНИЕ

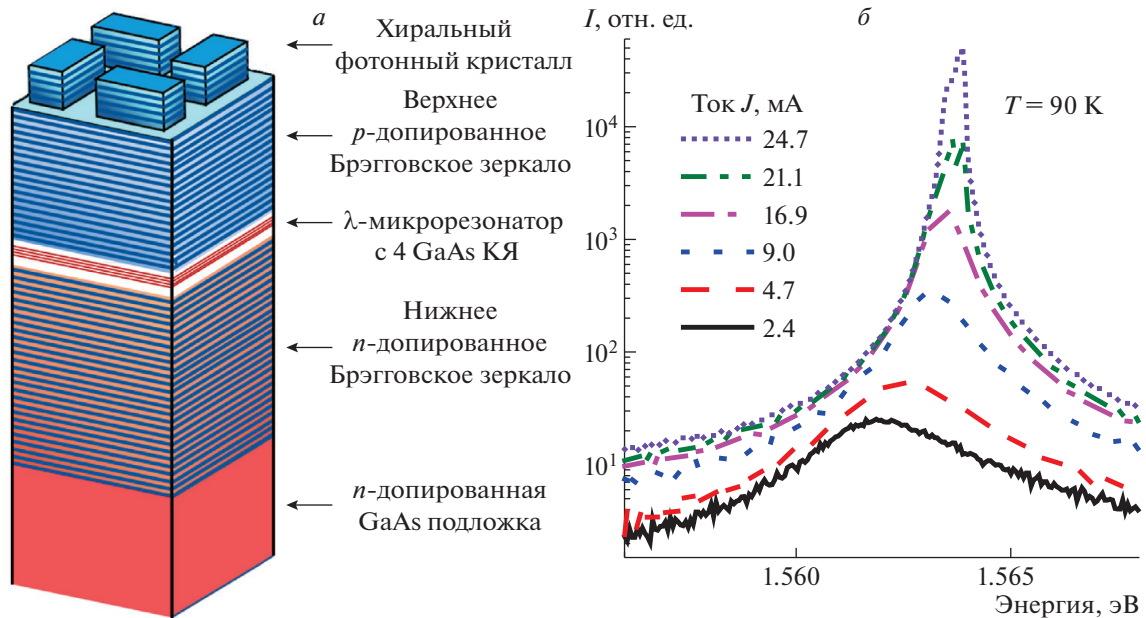
В течение последних лет достигнут значительный прогресс в решении задач, сфокусированных на поиске и реализации компактных как однофотонных, так и лазерных источников света, обладающих контролируемой циркулярной поляризацией излучения. Практические приложения источников циркулярно-поляризованного света являются чрезвычайно актуальными для создания элементной базы в интенсивно развивающихся областях, таких как оптоэлектроника и квантовые технологии передачи и записи информации (аналогично спинам отдельных электронов и дырок и спин-поляризованным токам в спинтронике).

Понятно, что устройства, в которых используются традиционные способы получения циркулярно-поляризованного излучения с помощью четвертьволновых пластинок, не удовлетворяют требованиям компактности. Другой подход к реализации компактных лазеров, которые могут излучать циркулярно-поляризованный свет, предполагает использование оптической либо электрической спиновой накачки (так называемые спин-лазеры) [1–4], или оптических хиральных сред в активной области таких лазеров. В то же время, как было продемонстрировано в целом ряде работ [5–8], создание компактных устройств циркулярно-поляризованного излучения может быть осуществлено при использовании для этой цели наноструктур на основе обычных ахиральных

A<sup>III</sup>V полупроводников. Отличительной особенностью данных наноструктур является наличие в их верхнем слое сформированного с помощью современных полупроводниковых технологий фотонного кристалла с квадратной решеткой, обладающей хиральной симметрией. Благодаря общей хиральной симметрии такой системы возникает неэквивалентность право- и лево-поляризованных электромагнитных мод, что, тем самым, открывает возможности для создания компактных источников циркулярно-поляризованного излучения без приложения внешнего магнитного поля.

Циркулярно-поляризованное лазерное излучение 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 было получено в работе [9]. Следующим шагом в этом направлении, имеющим также важное прикладное значение, было получение циркулярно-поляризованного лазерного излучения в подобных наноструктурах при электрической накачке.

В нашей предыдущей работе [10] сообщалось о получении лазерной генерации света с высокой степенью циркулярной поляризации излучения полупроводникового лазера с электрической накачкой на основе AlAs/AlGaAs микрорезонатора с GaAs квантовыми ямами (КЯ) в активной области, верхний слой которых представлял собой



**Рис. 1.** Схема структуры полупроводникового микрорезонатора с хиральным фотонным кристаллом на верхнем брэгговском зеркале (показана элементарная ячейка кристалла) с  $\lambda$ -микрорезонатором, содержащим 4 GaAs квантовые ямы (а). Изменения спектров излучения хиральной полупроводниковой лазерной структуры в  $\sigma^+$  циркулярной поляризации с ростом значений импульсного тока  $J$ : 2.4, 4.7, 9.0, 16.9, 21.1 и 24.7 мА. Температура  $T \approx 90$  К (б).

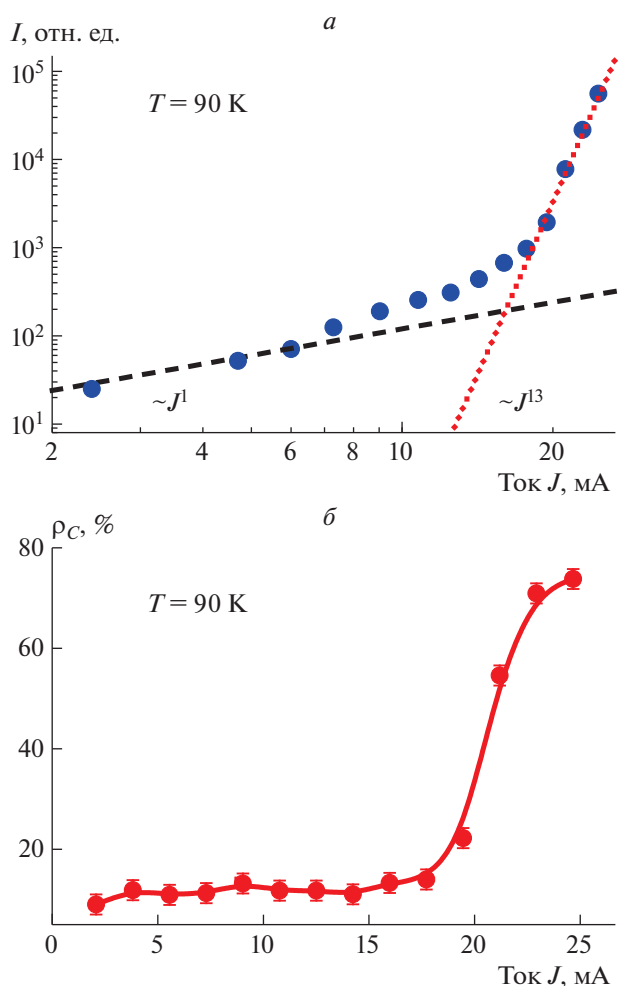
квадратную решетку фотонного кристалла с хиральной симметрией (см. рис. 1а) при низких температурах  $T \approx 2$  К. Параметры микрорезонатора, в частности, показатель преломления его внутреннего  $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{As}$   $\lambda$ -слоя, спектральное положение экситонных резонансов в GaAs квантовых ямах зависят от температуры. Целью настоящей работы является выяснение того, в каком температурном диапазоне достижимо получение лазерной генерации света с высокой степенью циркулярной поляризации излучения в данных микрорезонаторах с электрической накачкой, иными словами, насколько критичным на свойства лазерного излучения оказываются температурные изменения диэлектрических постоянных материалов, из которых изготовлены лазерные структуры.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В настоящей работе представлены результаты исследования лазерных структур, выращенных на основе  $\lambda$ -микрорезонатора  $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{As}$ . В пучности электрического поля в центре микрорезонатора располагались четыре квантовые ямы из GaAs шириной 7 нм, разделенные 4 нм  $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{As}$  барьерами. 27  $n$ -допированных кремнием пар слоев  $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$  составляли нижнее брэгговское зеркало микрорезонатора, а верхнее содержало 23.5 пары слоев,  $p$ -допированных углеродом. На верхнем брэгговском зеркале были вы-

травлены на глубину до середины пятого сверху слоя  $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$  фотонные кристаллы с квадратными элементарными ячейками с различным знаком хиральности. Знак хиральности определялся направлением закрученности прямоугольников, лежащих в основаниях микростолбиков, из которых состоит элементарная ячейка фотонного кристалла [6, 7]. Каждая отдельная лазерная структура представляла собой параллелепипед с размерами основания  $60 \times 60$  мкм<sup>2</sup>, на верхнем зеркале которого, внутри площади, ограниченной золотым кольцевым контактом, размещался фотонный кристалл размером  $36 \times 36$  мкм<sup>2</sup>. Элементарная ячейка фотонного кристалла (см. рис. 1а) образована четырьмя микростолбиками с основаниями в виде вытянутых прямоугольников, повернутых “влево” или “вправо” на  $90^\circ$  относительно друг друга. Период фотонного кристалла составлял  $d = 880$  нм, а линейный размер длинной стороны прямоугольника, лежащего в основании микростолбика, изменялся в диапазоне 256–280 нм. Микрорезонатор имел плавно меняющуюся от места на образце толщину, что обеспечивало изменение спектрального положения фотонного резонанса микрорезонатора в разных лазерных структурах и его отстройку от экситонного уровня в GaAs квантовых ямах.

Образцы размещали в парах He в оптическом гелиевом криостате с регулируемой температурой



**Рис. 2.** Зависимость интенсивности  $I$  (а) и степени циркулярной поляризации  $\rho_c$  (б) излучения полупроводникового лазера на основе хирального микрорезонатора от величины импульсного тока  $J$ . Температура  $T \approx 90$  К.

в диапазоне  $T = 5\text{--}150$  К с точностью регулировки температуры  $\Delta T = \pm 0.2$  К.

Для возбуждения излучения к каждому отдельному лазеру прикладывалось импульсное напряжение величиной до  $\sim 15$  В. Было установлено, что оптимальные условия для наблюдения мощной лазерной генерации в исследованных структурах достигаются при импульсном электрическом возбуждении с длительностями импульсов в диапазоне от  $\sim 100$  нс до  $\sim 1$  мс со скважностью  $\sim 1 : 100$ . Максимальные значения импульсного тока  $J$ , текущего через различные лазерные структуры, не превышали  $\sim 25$  мА.

Спектры излучения регистрировались с помощью спектрометра МДР-23 или тройного спектрометра Dilor-500 (с разрешением  $\leq 40$  мкэВ), оснащенных охлаждаемым Si-CCD-детектором.

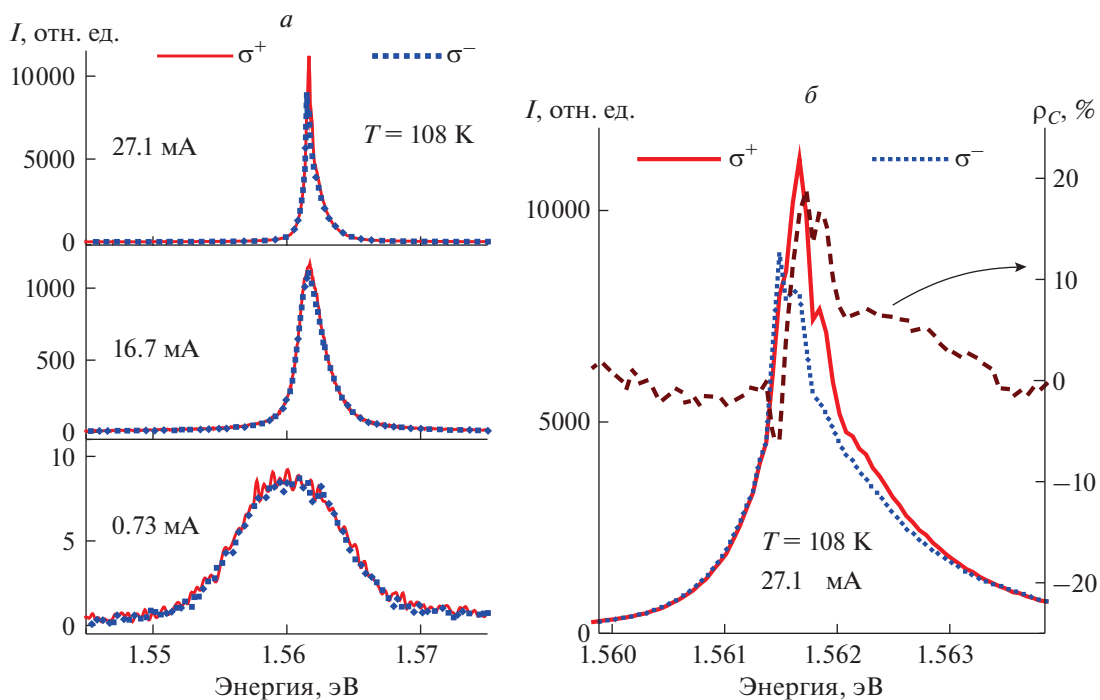
## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Ранее нами сообщалось о получении лазерной генерации света с высокой степенью циркулярной поляризации излучения полупроводникового лазера с электрической накачкой при температурах  $T \approx 2$  К [10]. Повышение температуры в диапазоне температур  $T < 100$  К, как показали дальнейшие исследования, в целом не изменяют основных характеристик лазерного излучения кроме небольшого увеличения величины порогового тока с ростом температуры. На рис. 1б представлены спектры излучения одного из таких лазеров в  $\sigma^+$ -поляризации при температуре  $T \approx 90$  К и различных значениях текущего через образец импульсного тока  $J$ . Так же, как и при  $T \approx 2$  К, с увеличением тока наблюдается резкий сверхлинейный рост интенсивности линии излучения, который сопровождался сужением ее спектральной ширины до величины  $\leq 40$  мкэВ. Типичная зависимость интенсивности  $I$  лазерного излучения от текущего через образец импульсного тока  $J$  представлена на рис. 2а. Видно, что при достижении пороговых значений тока линейная зависимость интенсивности излучения  $I$  при малых токах сменяется резким ее сверхлинейным ростом.

Степень циркулярной поляризации определялась из соотношения  $\rho_c = (I^+ - I^-)/(I^+ + I^-)$ , где  $I^+$  и  $I^-$  интенсивности излучения в  $\sigma^+$ - и  $\sigma^-$ -циркулярной поляризации, соответственно. Относительно малая ( $\rho_c \leq 10\%$ ) степень циркулярной поляризации излучения в спонтанном режиме (при низких токах импульсной накачки) начиная с пороговых значений импульсного тока при его увеличении резко возрастала и достигала величины  $\rho_c \approx 75\%$  в режиме развитой лазерной генерации (рис. 2б).

Дальнейшее увеличение температуры  $T > 100$  К приводит к существенному уменьшению степени циркулярной поляризации излучения в режиме лазерной генерации света. Спектры излучения лазерной структуры, представленные на рис. 3а и 3б, получены при  $T \approx 108$  К. Видно, что при данной температуре можно получить вполне развитую лазерную генерацию света, однако степень циркулярной поляризации излучения в этом режиме уменьшается до значений  $\rho_c \approx 10\text{--}20\%$  (рис. 3б).

В исследованных наноструктурах было получено лазерное излучение при электрической накачке вплоть до температур  $T \approx 140$  К. При этом наблюдалось спектральное смещение линий лазерной генерации в красную сторону на величины  $\sim 5$  мэВ при изменении температуры от 2 до 140 К, что хорошо согласуется с изменением показателя преломления  $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{As}$   $\lambda$ -микрорезонатора.



**Рис. 3.** Спектры излучения хиральной полупроводниковой лазерной структуры в  $\sigma^+$  (сплошные кривые) и  $\sigma^-$  (точечные кривые) циркулярных поляризациях при различных значениях импульсного тока  $J$ : 0.73, 16.7 и 27.1 мА – нижняя, средняя и верхняя панель, соответственно (а). Спектры в  $\sigma^+$  (сплошная кривая) и  $\sigma^-$  (точечная кривая) циркулярной поляризации при величине импульсного тока  $J = 27.1$  мА и степень циркулярной поляризации излучения  $\rho_c$  (пунктирная кривая) полупроводникового лазера на основе хирального микрорезонатора (б). Температура  $T \approx 108$  К.

натора на величину  $\sim 0.01$  в этом же температурном интервале [11].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования температурной зависимости спектров и поляризационных свойств излучения полупроводникового лазера с электрической накачкой на основе AlAs/AlGaAs микрорезонатора с GaAs квантовыми ямами в активной области, верхний слой которого представлял собой квадратную решетку фотонного кристалла с хиральной симметрией, показали возможность получения лазерной генерации света с высокой степенью циркулярной поляризации излучения в достаточно широком температурном диапазоне  $\sim 100$  К. Таким образом, изменение температуры не является критичным для устойчивой работы данных лазерных микрорезонаторов на основе хирально-модулированных полупроводниковых наноструктур с электрической накачкой и с контролируемым циркулярно-поляризованным излучением. Понятно, что предпочтительным температурным диапазоном для практических приложений инжекционных полупроводниковых микролазеров с циркулярно-поляризованным излучением является об-

ласть комнатных температур. Можно полагать, что соответствующая оптимизация параметров структуры микрорезонатора позволит получить лазерную генерацию света с циркулярной поляризацией при комнатных температурах.

Авторы выражают благодарность С. Хёффлингу (S. Höffling) и Х. Шнайдеру (C. Schneider) за предоставленные образцы для исследований, а также В.Д. Кулаковскому и С.Г. Тиходеву за многочисленные полезные обсуждения. Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты №№ 19-02-00697 и 20-02-00534).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ando H., Sogawa T., Gotoh H. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. P. 566.
2. Holub M., Bhattacharya P. // J. Phys. D. 2007. V. 40. Art. No. R179.
3. Chen J.-Y., Wong T.-M., Chang C.-W. et al. // Nature Nanotech. 2014. V. 9. P. 845.
4. Lindemann M., Xu G., Pusch T. et al. // Nature. 2019. V. 568. P. 212.
5. Konishi K., Nomura M., Kumagai N. et al. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. Art. No. 057402.

6. Maksimov A.A., Tartakovskii I.I., Filatov E.V. et al. // Phys. Rev. B. 2014. V. 89. Art. No. 045316.
7. Lobanov S.V., Tikhodeev S.G., Gippius N.A. et al. // Phys. Rev. B. 2015. V. 92. Art. No. 205309.
8. 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.
9. Demenev A.A., Kulakovskii V.D., Schneider C. et al. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109. Art. No. 171106.
10. Максимов А.А., Филатов Е.В., Тартаковский И.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 2. С. 241; Maksimov A.A., Filatov E.V., Tartakovskii I.I. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 2. P. 176.
11. Afromowitz M.F. // Solid. State Commun. 1974. V. 15. P. 59.

## Temperature dependence of circularly polarized emission of chiral injection semiconductor lasers

A. A. Maksimov<sup>a, \*</sup>, E. V. Filatov<sup>a</sup>, I. I. Tartakovskii<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

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

The temperature dependence of lasing and the circular polarization degree of the emission of an electrically pumped semiconductor laser based on an AlAs/AlGaAs microcavity with GaAs quantum wells in the active region and with a photonic crystal with chiral symmetry in the top layer of the upper Bragg mirror have been investigated up to  $T \approx 140$  K. At maximum values of the pulsed pump current of  $\sim 25$  mA developed multi-mode lasing in the form of spectral narrow bands with a high degree of circular polarization of radiation  $>70\%$  is observed up to temperatures  $T \approx 90$  K.