

УДК 537.311.322:535.37:535–47

МНОГОМОДОВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ СВЕТА В ИНЖЕКЦИОННОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ЛАЗЕРЕ НА ОСНОВЕ ХИРАЛЬНОГО $\text{AlAs}/(\text{Al}, \text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$ МИКРОРЕЗОНАТОРА

© 2024 г. А. А. Максимов^{1,*}, И. И. Тартаковский¹

¹Федеральное 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 25.09.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

Выполнены экспериментальные исследования инжекционных поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным хиральным микрорезонатором на основе $\text{AlAs}/(\text{Al}, \text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$ в режиме многомодовой генерации. Продемонстрирована высокая степень циркулярной поляризации излучения $> 70\%$ различных мод генерации, измеренных с высоким спектральным разрешением. Построены подробные карты пространственного и углового распределения интенсивности лазерного излучения.

DOI: 10.31857/S0367676524020032, EDN: RTRYBS

ВВЕДЕНИЕ

Лазерные источники циркулярно поляризованного излучения являются важными компонентами для широкого круга приложений в современной фотонике, биомедицинском зондировании, квантовых вычислениях и технологиях хранения данных, трехмерных дисплеях и во многих других областях [1–6]. Преимущественно, лазеры обладают линейной поляризацией излучения. Для получения лазерного излучения, обладающего циркулярной поляризацией, обычно используют линейные поляризаторы и четвертьволновые пластины, которые бывают относительно громоздкими. В связи с этим традиционные методы генерации света с круговой поляризацией имеют определенные ограничения при миниатюризации устройств.

В последнее время значительное внимание уделяется исследованиям диэлектрических метаповерхностей [1, 7–9], которые при их сверхтонкой структуре и низких потерях на поглощение обладают исключительными возможностями для управления светом, включая и контроль его поляризации. С другой стороны, полупроводниковые поверхностно-излучающие микролазеры с вертикальными резонаторами (VCSEL), имеющие малую площадь основания и с излучением, выходящим по направлению, близким к нормали к поверхности, могут быть достаточно просто интегрированы со сверхтонкими метаповерхностями, что дает возможность реализовать сверхкомпактные лазеры циркулярно поляризованного излучения.

В работах [10–17] было продемонстрирована возможность реализации компактных устройств циркулярно поляризованного излучения на основе плоских наноструктур из обычных ахиральных $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ полупроводников и изучены их свойства. Главной особенностью таких гетероструктур был сформированный в их верхнем слое за счет частичного травления на определенную глубину с помощью современных полупроводниковых технологий фотонный кристалл с квадратной решеткой, обладающий хиральной симметрией. Неэквивалентность собственных электромагнитных мод системы с различной циркулярной поляризацией, возникающая из-за такой симметрии, позволило создать разнообразные компактные источники циркулярно поляризованного излучения без приложения внешнего магнитного поля.

Важное прикладное значение имела демонстрация возможности реализации инжекционных полупроводниковых лазеров с высокой степенью циркулярной поляризации излучения вплоть до значений $\sim 90\%$ в отдельных модах генерации при гелиевых температурах [13, 14]. Знак циркулярной поляризации основных полос генерации такого лазера определялся при изготовлении знаком хиральности фотонного кристалла [14]. Несмотря на то, что исследованные в этих работах структуры не были оптимизированы для более высоких температур, они оставались работоспособными вплоть до температур ~ 150 К [15, 16]. В работе [17] была изучена кинетика неравновесных процессов,

происходящих в фононной и электронной подсистемах при работающем полупроводниковом лазере.

Настоящая работа посвящена подробным экспериментальным исследованиям пространственного и углового распределения интенсивности излучения различных мод таких лазеров в режиме многомодовой генерации при их возбуждении электрическими импульсами.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАЗЦЫ

В работе исследовались полупроводниковые вертикально излучающие инжекционные лазеры, в которых при приложении импульсного электрического напряжения в режиме развитой лазерной генерации излучался циркулярно поляризованный свет [13–16]. Образец, содержащий несколько сотен лазерных структур на основе λ -микрорезонатора $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{As}$, был выращен на ориентированной (100) *n*-допированной GaAs подложке методом молекулярно-пучковой эпитаксии. 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. Брэгговские зеркала состояли из *n*- и *p*-допированных пар слоев AlAs/ $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$. Каждая отдельная вертикально излучающая лазерная структура представляла собой параллелепипед с размерами основания 60×60 мкм², на верхнем зеркале которого, внутри площади, ограниченной золотым кольцевым контактом, размещался вытравленный на глубину до середины пятого сверху слоя $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$ фотонный кристалл размером 36×36 мкм². Подробные структурные характеристики исследованных лазеров описаны в работах [13–16].

Образец с лазерами помещался в сверхтекучий гелий при температуре ~ 1.8 К в оптическом криостате. Возбуждение свечения наноструктуры осуществлялось с помощью генератора электрических прямоугольных импульсов с длительностью ~ 1 мкс и частотой следования 3–10 кГц. К каждой отдельной лазерной структуре прикладывалось импульсное напряжение величиной до ~ 15 В, при этом значения импульсного тока J , текущего через различные лазерные структуры, не превышали величины ~ 25 мА. В таких условиях в качественных наноструктурах наблюдалась лазерная генерация излучения с высокой степенью циркулярной поляризации ($\rho_C > 0.7$) в отсутствие внешнего магнитного поля.

Спектры лазерного излучения регистрировались с помощью оснащенного охлаждаемым Si-CCD детектором тройного спектрометра Dilor XY — 500, который имел разрешение ≤ 40 мкЭВ в исследуемом спектральном диапазоне.

Для построения пространственной карты распределения интенсивности лазерной гене-

рации увеличенное изображение открытой части (36×36 мкм²) излучающей лазерной структуры передавалось в плоскость скрещенных щелей, которые позволяли выделять интересующий участок на поверхности образца с пространственным разрешением ~ 3 мкм.

Для измерения спектрально-угловой зависимости интенсивности генерации поверхность образца ориентировалась перпендикулярно оптической оси и располагалась в фокальной плоскости объектива, собирающего излучение. В результате свет, выходящий под определенным углом к поверхности образца и имеющий определенные значения компонент волнового вектора k_x и k_y вдоль x и y направлений в пространстве, после прохождения через объектив распространяется вдоль соответствующего пути в поперечном сечении параллельного пучка излучения. Регистрируя спектр выделенной части излучения, проходящего через малую диафрагму, которая располагалась за собирающим объективом в параллельном пучке и могла контролируемым образом перемещаться в нормальной к оптической оси плоскости, достигалось угловое разрешение измерительной системы ~ 0.3 градуса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показан пример спектров излучения, зарегистрированных с высоким спектральным разрешением, одной из лазерных структур в режиме развитой генерации при значении импульсного тока, текущего через образец $J \approx 25$ мА. Спектр излучения в σ^+ циркулярной поляризации показан сплошной кривой, а в σ^- — точечной кривой. На рис. 1 показана также степень циркулярной поляризации (пунктирная кривая), которая определялась из соотношения $\rho_C = (I^+ - I^-)/(I^+ + I^-)$, где I^+ и I^- — интенсивности излучения в σ^+ и σ^- циркулярной поляризации, соответственно.

Из данных, приведенных на рис. 1, видно, что спектр лазерного излучения состоит из нескольких узких полос, отвечающих различным модам генерации исследуемой структуры. Многомодовый режим генерации лазера связан, по-видимому, в первую очередь с его плоской геометрией, поскольку размеры лазерной структуры в плоскости существенно превышают ее толщину [17]. Видно также, что наиболее сильные моды генерации данного лазера имеют σ^+ циркулярную поляризацию, что определяется знаком хиральности фотонного кристалла на верхнем брэгговском зеркале структуры [14]. Однако высокая чувствительность степени циркулярной поляризации ρ_C к длине волны излучения и к точной геометрии резонатора [12] может приводить к изменению ее величины и даже ее знака, что и наблюдается в более слабых по интенсивности модах генерации лазера на высокочастотном краю (рис. 1).

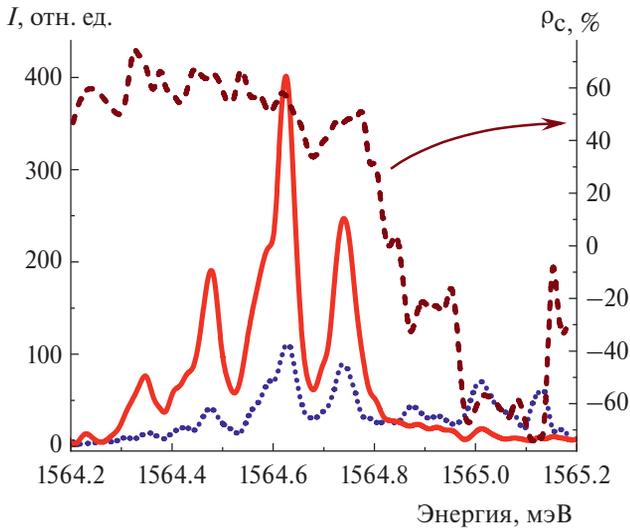


Рис. 1. Спектры излучения лазерной структуры при различной циркулярной поляризации в режиме развитой генерации при значении импульсного тока, текущего через образец $J \approx 25$ мА; температура $T = 1.8$ К. Сплошная кривая – спектр излучения в σ^+ циркулярной поляризации, точечная кривая – в σ^- ; пунктирная кривая – степень циркулярной поляризации ρ_c .

При этом модуль величины $|\rho_c|$ в спектральной области свечения мод генерации лазера достигает весьма значительной величины $\sim 70\%$.

Исследования распределения интенсивности излучения различных мод генерации лазера из различных участков его поверхности (36×36 мкм²) показали, что эти распределения могут существенно отличаться друг от друга, т.е. излучение мод происходит с разных мест на поверхности образца. Как пример, на рис. 2 (с использованием шкалы серого цвета) показано распределение интенсивности

I моды с энергией излучения ~ 1564.62 мэВ в σ^+ и σ^- циркулярной поляризации с различных участков поверхности лазера. Видно, что характерные линейные размеры Δl области интенсивного излучения этой моды составляют величину порядка 5–10 мкм. Близкие к таким же размерам областей свечения наблюдались и для других мод излучения этой лазерной структуры, хотя, как уже отмечалось, эти области находились в различных местах на поверхности лазерной структуры. Фактически это может означать, что наблюдаемый на рис. 1 спектр генерации отвечает излучению нескольких независимых лазеров, реализующихся в одной данной лазерной структуре.

На рис. 3 (с использованием шкалы серого цвета) показаны двумерные зависимости интенсивностей моды с энергией излучения ~ 1564.62 мэВ в σ^+ и σ^- циркулярной поляризации (масштабы интенсивностей I^+ и I^- различны) от угла выхода излучения по отношению к нормали к поверхности образца вдоль x и y направлений в пространстве. Картины распределения интенсивностей по углу, так же как пространственные распределения, для разных мод генерации лазера отличаются друг от друга. Типичные значения ширины углового распределения интенсивностей и отличий в расположении их максимумов для разных мод могут достигать порядка нескольких угловых градусов. При этом наибольшие отличия в расположении максимумов углового распределения интенсивностей наблюдается для мод с различным знаком степени циркулярной поляризации излучения.

На рис. 4 представлен срез угловой зависимости интенсивности моды лазерной генерации, представленной на рис. 3, вдоль пространственного направления x (вблизи значения $k_y \approx 0$) в двух циркулярных поляризациях σ^+ (закрытые

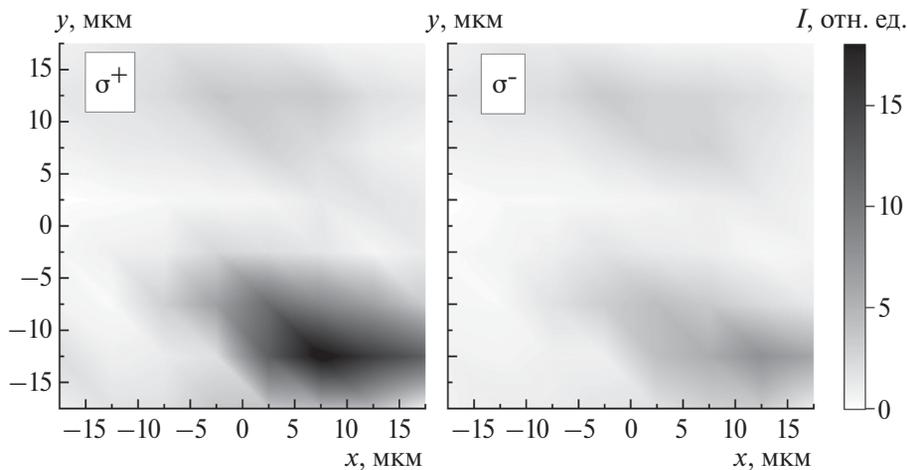


Рис. 2. Пространственное распределение интенсивности I моды лазерной генерации с энергией излучения ~ 1564.62 мэВ в σ^+ и σ^- циркулярных поляризациях с различных участков поверхности лазера.

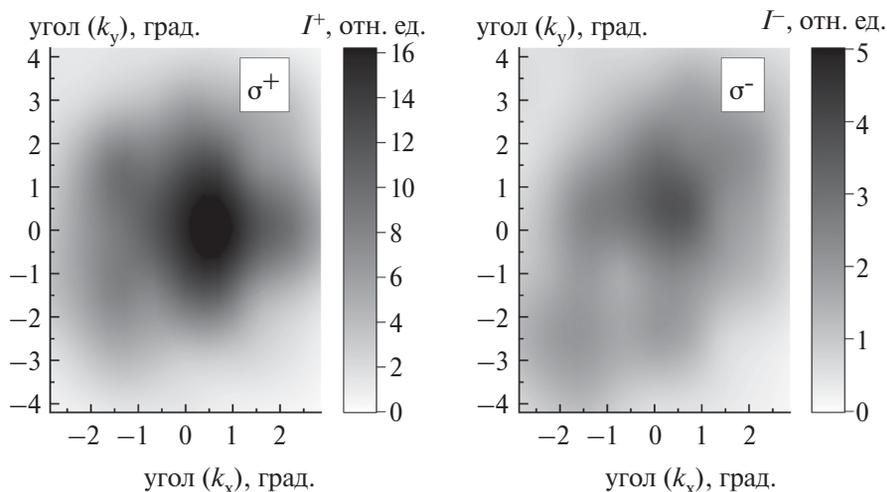


Рис. 3. Зависимости распределения интенсивностей I^+ и I^- моды с энергией излучения ~ 1564.62 мэВ в σ^+ и σ^- циркулярных поляризациях, соответственно, от угла выхода излучения по отношению к нормали к поверхности образца вдоль x и y направлений в пространстве.

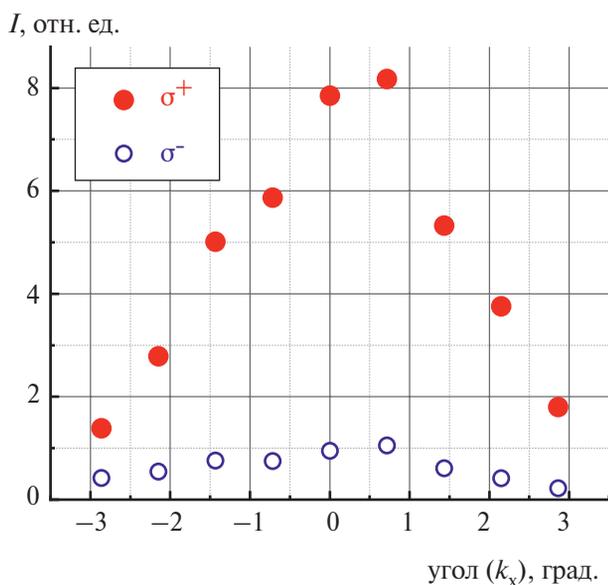


Рис. 4. Угловая зависимость интенсивности моды лазерной генерации I вдоль пространственного направления x ($k_y \approx 0$) в двух циркулярных поляризациях σ^+ (закрытые символы) и σ^- (открытые символы).

символы) и σ^- (открытые символы). Видно, что угловая расходимость Θ полосы генерации этой моды в дальней зоне составляет величину порядка несколько градусов, что, учитывая размер излучающей зоны Δl (рис. 2), неплохо согласуется с формулой для расходимости гауссова пучка $\Delta l \approx \lambda / \pi \cdot \Theta$, где λ — длина волны излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполнены подробные экспериментальные исследования пространственного и углового распределения интенсивности излучения различных мод инжекционных поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным хиральным микрорезонатором на основе AlAs/(Al, Ga)As/GaAs в режиме многомодовой генерации. Степень циркулярной поляризации излучения различных мод генерации в качественных лазерных структурах оказывается $> 70\%$. На основании проведенных исследований сделано предположение о возможности реализации нескольких независимых лазеров на одной лазерной структуре.

Авторы выражают благодарность С. Хёффлингу (S. Höffling) и Х. Шнайдеру (C. Schneider) за предоставленные образцы для исследований, В.Д. Кулаковскому и С.Г. Тиходееву за многочисленные полезные обсуждения, а Е.В. Филатову за помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Genevet P., Capasso F., Aieta F. et al. // Optica. 2017. V. 4. P. 139.
2. Hübener H., De Giovannini U., Schäfer C. et al. // Nature Mater. 2021. V. 20. P. 438.
3. Sherson J.F., Krauter H., Olsson R.K. et al. // Nature. 2006. V. 443. P. 557.
4. He C., He H., Chang J. et al. // Light Sci. Appl. 2021. V. 10. P. 194.

5. *Stanciu C.D., Hansteen F., Kimel A.V. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. Art. No. 047601.
6. *Zhan X., Xu F.–F., Zhou Z. et al.* // Adv. Mater. 2021. V. 33. Art. No. 2104418.
7. *Xie Y.–Y., Ni P.–N., Wang Q.–H. et al.* // Nat. Nanotechnol. 2020. V. 15. P. 125.
8. *Wen D., Crozier K.B.* // APL Photon. 2021. V. 6. Art. No. 080902.
9. *Jia X., Kapraun J., Wang J. et al.* // Optica. 2023. V. 10. P. 1093.
10. *Maksimov A.A., Tartakovskii I.I., Filatov E.V. et al.* // Phys. Rev. B. 2014. V. 89. Art. No. 045316.
11. *Lobanov S.V., Tikhodeev S.G., Gippius N.A. et al.* // Phys. Rev. B. 2015. V. 92. Art. No. 205309.
12. *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 Letters. 2017. V. 106. No. 10. P. 615.
13. *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.
14. *Максимов А.А., Филатов Е.В., Тартаковский И.И. et al.* // Phys. Rev. Appl. 2022. V. 17. Art. No. L021001.
15. *Максимов А.А., Филатов Е.В., Тартаковский И.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 4. С. 494; *Maksimov A.A., Filatov E.V., Tartakovskii I.I.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 4. P. 404.
16. *Максимов А.А., Филатов Е.В., Тартаковский И.И.* // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 116. № 8. С. 500; *Maksimov A.A., Filatov E.V., Tartakovskii I.I.* // JETP Letters. 2022. V. 116. No. 8. P. 500.
17. *Максимов А.А., Филатов Е.В., Филатов В.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 2. С. 182; *Maksimov A.A., Filatov E.V., Filatov V.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 2. P. 155.

Multimode light generation in an injection semiconductor laser based on a chiral AlAs/(Al, Ga)As/GaAs microcavity

A. A. Maksimov^{1, *}, I. I. Tartakovskii¹

¹*Osipyan Institute of Solid-State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*
*e-mail: maksimov@issp.ac.ru

Experimental investigations of chiral injection AlAs/(Al, Ga)As/GaAs vertical-cavity surface-emitting lasers in the multimode generation regime are performed. A high circular polarization degree > 70% of different generation modes measured with a high spectral resolution, is demonstrated. Detailed maps of spatial and angular distribution of laser radiation intensity were constructed.