Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» Физтех-школа физики и исследований им. Ландау Кафедра физики твердого тела

Направление подготовки / специальность: 03.03.01 Прикладные математика и физика (бакалавриат)

Направленность (профиль) подготовки: Фундаментальная и прикладная физика

СПЕКТРАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СПОНТАННОГО И СТИМУЛИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ХИРАЛЬНЫХ GAAS/ALGAAS МИКРОРЕЗОНАТОРАХ

(бакалаврская работа)

Студент: Покотило Богдан Александрович

(подпись студента)

Научный руководитель: Тартаковский Илья Иосифович, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.

(подпись научного руководителя)

Консультант (при наличии):

(подпись консультанта)

Москва 2020

Аннотация

Целью данной работы было изучение характеристик лазерного излучения GaAs/AlGaAs микрорезонатора с GaAs квантовыми ямами активной области и с хирально модулированным верхним В брэгговским зеркалом. Основной задачей было определение оптимальных режимов возбуждения генерации света с высокой циркулярной поляризации лазерного степенью излучения электрическими импульсами накачки. Было установлено, что с ростом сверхлинейная длительности импульса зависимость накачки интенсивности лазерного излучения переходит В линейную длительности электрического импульса. Эти зависимость OT изменения связываются с релаксационными процессами В микрорезонаторе при импульсной электрической накачке. Также было изучено поведение степени поляризации лазерного излучения в зависимости от длительности импульса электрической накачки. Получено, что с ростом длительности импульса степень поляризации растёт, достигает максимума и выходит почти на постоянное значение.

Оглавление

- 1. Введение
- 2. Литературный обзор
- 3. Цели и задачи
- 4. Экспериментальная часть
 - 4.1. Образец
 - 4.2. Схема установки
 - 4.3. Схема проведения эксперимента
 - 4.4. Экспериментальные особенности
- 5. Результаты измерений
- 6. Заключение
- 7. Список литературы

1. Введение

Одна из центральных проблем нанофотоники — создание компактных устройств, размерами порядка нескольких нанометров, которые позволяют управлять состоянием поляризации излучаемого света, т.е. делать его линейно- или циркулярно-поляризованным. Обычно изменение поляризации света получают с помощью волновых пластинок из двулучепреломляющего материала. Но размеры этих пластинок больше необходимых для данной задачи, что и заставило устройств задуматься создании таких меньшего 0 размера. Применение компактных источников циркулярно-поляризованного излучения откроет новые возможности в интенсивно развивающихся областях информационных технологий для передачи и записи информации, таких как оптоэлектроника и нанофотоника.

Для создания компактных поляризационных устройств с циркулярнополяризованным излучением можно использовать наноструктуры на основе обычных ахиральных A3B5 полупроводников, в которых с помощью специальных технологических методов в верхнем слое формируется модулированная структура с хиральной симметрией. Это позволяет, в зависимости от знака хиральности верхнего слоя, получать право- и лево-циркулярно-поляризованное излучение.

Сравнительно недавно в исследовательской группе в Лаборатории ИФТТ было неравновесных электронных процессов получено циркулярно-поляризованное лазерное излучение света при возбуждении электролюминесценции в планарных GaAs/AlGaAs микрорезонаторах с GaAs квантовыми ямами в активной области и с хирально модулированным верхним брэгговским зеркалом.

В данной работе мы изучаем характеристики лазерного излучения в планарных GaAs/AlGaAs микрорезонаторах с GaAs квантовыми ямами в активной области и с хирально модулированным верхним брэгговским зеркалом и стараемся определить оптимальные режимы возбуждения генерации света с высокой степенью циркулярной поляризации лазерного излучения электрическими импульсами накачки.

2.Литературный обзор

В настоящее время с помощью полупроводниковых нанотехнологий реализованы разные фотонные структуры, в том числе фотонные кристаллы с необычными оптическими свойствами.

В фотонных кристаллах оказывается возможным существенно влиять как на излучательное время жизни помещенного в структуру излучателя, так и на спектр и угловые характеристики выходящего излучения [1-4]. В последнее время в фотонных наноструктурах с хиральной симметрией было также выявлено наличие гигантской оптической активности [5, 6].

Сравнительно недавно было продемонстрировано, что включение фотонной хиральной структуры В полупроводниковый микрорезонатор или плоский GaAs волновод со встроенным слоем InAs ахиральных квантовых точек позволяет получать люминесценцию этих точек с очень высокой степенью циркулярной поляризации (до 96% в случае плоского GaAs волновода) света без внешнего магнитного поля и без использования приложения сравнительно толстых четвертьволновых пластин [7,8].

В работе [9] было продемонстрировано, что при высоком уровне оптической накачки может быть также получено и стимулированное излучение с достаточно высокой степенью циркулярной поляризации из AlGaAs/AlAs микрорезонатора с квантовыми ямами GaAs в активной области и с вытравленным на верхнем брэгговском зеркале хиральной фотонным Лальнейшие кристаллом симметрии. исследования показали возможность реализации инжекционных полупроводниковых лазеров с циркулярно-поляризованным излучением на подобных фотонных структурах [10].

В случае инжекционных полупроводниковых лазеров на основе AlGaAs/AlAs микрорезонатора с фотонным кристаллом хиральной симметрии на верхнем брэгговском зеркале использовалась импульсная электрическая накачка, что позволяло достигнуть режима развитой лазерной генерации света.

На рисунке 1 представлены зависимость интенсивности и спектров излучения в σ^+ поляризации от величины тока (приложенного напряжения) при длительности импульсов электрической накачки ~ 1 мкс. Видно, что при низких величинах тока спектр излучения является спонтанным, а с ростом тока в спектре хорошо видно полосу, отвечающую лазерной генерации света в области $\hbar\omega = 1.5653$ мэВ.



Рис.1. Зависимость спектров излучения микрорезонатора при возбуждении электрическими импульсами с длительностью ≈1 мкс от величины тока.

На рисунке 2 видно также, что при развитой генерации света спектральное положение полосы генерации сдвигается в длинноволновую сторону. Этот сдвиг, по-видимому, связан с частичным нагревом области микрорезонатора при максимальных токах импульса возбуждения.



Рис.2. Зависимость спектров излучения микрорезонатора при возбуждении электрическими импульсами с длительностью ≈1 мкс от величины тока при максимальных величинах приложенного напряжения.

Как показывают пространственные измерения выходящего лазерного излучения, выход излучения локализован в определенных местах на поверхности структуры, обычно в областях вблизи углов (см. рис.3). Такая частичная локализация может определяться неоднородностью плотности тока в объеме наноструктуры и приводить, соответственно, к локальному перегреву при максимально используемых импульсных токах.



Рис.3. Пространственное распределение выходящего излучения из микрорезонатора при возбуждении электрическими импульсами с длительностью ≈1 мкс при максимальных величинах приложенного напряжения.

Зависимость интенсивности в максимуме полосы фотолюминесценции при малых значениях тока, проходящего через микрорезонатор при импульсном возбуждении имеет линейную зависимость, которая затем с увеличением амплитуды токовых импульсов пороговым образом переходит в сильную нелинейную зависимость интенсивности, и к тому же сужается спектральная ширина полосы стимулированного излучения (см. рис. 4). При этом в

начальной области сверхлинейного роста интенсивности полосы стимулированного излучения со спектрально шириной ~ 1 мэВ наблюдался также ее постепенный спектральный сдвиг на величину ~ 1.5 мэВ в коротковолновую область. При дальнейшем увеличении тока обычно возникало несколько мод лазерной генерации со спектральной шириной ≤ 40 мкэВ.



Рис.4. Зависимость интенсивности полосы излучения микрорезонатора от величины тока при возбуждении электрическими импульсами с длительностью ≈1 мкс и частотой следования 10 – 100 кГц.

Типичное поведение степени циркулярной поляризации (CPD) излучения при увеличении импульсного тока заключалось В резком увеличении от относительно небольших достаточно ee значений $\rho \le 10\%$ в спонтанном режиме до величин $\rho \approx 50 - 70\%$ в режиме развитой лазерной генерации (рис.5а). Некоторые узкие линии лазерной генерации могли показывать и более сильную степень

циркулярной поляризации, достигающей почти $\rho \approx 90\%$ (см. пример на рис. 5*b*).



Рис.5. (а) Зависимость степени циркулярной поляризации (CPD) излучения микрорезонатора от величины тока при возбуждении электрическими импульсами с длительностью ≈ 1 мкс и частотой следования импульсов 10 – 100 кГц.

(b) Пример высокой степени циркулярной поляризации, достигающей ρ ≈90 % в условиях развитой генерации света

3. Цели и задачи

Цель дипломной работы — изучение характеристик лазерного излучения в планарных GaAs/AlGaAs микрорезонаторах с GaAs квантовыми ямами в активной области и с хирально модулированным верхним брэгговским зеркалом при электрической накачке.

было Основной задачей определение оптимальных режимов возбуждения генерации света с высокой степенью циркулярной поляризации лазерного излучения электрическими импульсами накачки. Планировалось изучение зависимости интенсивности генерации света и степени циркулярной поляризации инжекционных полупроводниковых лазеров на основе AlGaAs/AlAs микрорезонатора с фотонным кристаллом хиральной симметрии на верхнем брэгговском зеркале от параметров импульсной электрической накачки.

4. Экспериментальная часть

4.1. Образец

Образец представляет собой планарный GaAs/AlGaAs микрорезонатор, состоящий из брэгговских зеркал (Рис.6а). В центре этого микрорезонатора расположены 4 GaAs квантовых ямы (Рис.6b).



Рис.6.(*a*) Структура микрорезонатора, в центре которого (b) расположены 4x7nm GaAs-QWs и 4nm Al0.40Ga0.60As-Barriers

Верхнее брэгговское зеркало микрорезонатора частично вытравлено на глубину, меньшую половины толщины зеркала. В результате травления на верхней системе зеркал возникает набор из ~ 500 мез (Рис. 7а) с размерами 50х50 мкм². Каждая меза — это периодически модулированная структура с квадратной решёткой, период которой от 800 до 880 нм (Рис. 7b и 7c). Элементарная ячейка данной решётки состоит из 4-х прямоугольных пилларов, повернутых на 90° относительно друг друга (Рис. 7d), и обладает хиральной симметрией.

Нижнее брэгговское зеркало микрорезонатора состоит из 27 пдопированных кремнием пар слоев AlAs/Al_{0.20}Ga_{0.80}As, концентрация Si постепенно изменялась в пределах от $3x10^{18}$ см⁻³ до $1x10^{18}$ см⁻³. Верхнее зеркало состоит из 23.5 AlAs/Al_{0.20}Ga_{0.80}As пар слоев, рдопированных углеродом, с постепенно изменяющейся концентрацией в тех же пределах $3x10^{18}$ см⁻³ – $1x10^{18}$ см⁻³.

К каждой мезе подведен электрический контакт для возбуждения электролюминесценции.



Рис.7. (а) - вид сверху на верхнее брэгговское зеркало микрорезонатора с мезами и подведенными к ним контактами; (b) - вид отдельной мезы с хиральной симметрией с размером 50x50 мкм2 с (с) - периодически модулированной структурой (с периодом от 800 до 880 нм) в виде квадратной решетки,(d) - элементарная ячейка решетки.

4.2. Схема экспериментальной установки

Общая схема установки представлена на рисунках 8-9.

Образец закреплён в оптическом криостате в сверхтекучем Не. В используемом гелиевом оптическом криостате деполяризация на

окнах не превышала 5%, что важно для исследования поляризационных свойств излучения.

Криостат можно было перемещать в любом направлении с точностью ~ 1 мкм, это обеспечивало возможность сдвигать образец вместе с криостатом с такой же точностью. Таким образом, можно было осуществить:

- попадание образца в фокус микроскопного объектива (линза 1) за счёт движения криостата вдоль оптической оси;
- попадание изображения нужного участка образца (мезы) в скрещенные щели за счёт движения криостата с образцом в направлениях, перпендикулярных оптической оси.

Оптическая система содержит необходимые элементы для анализа циркулярной И линейной поляризации степени излучения, фотонной наноструктуры. В установке выходящего ИЗ есть возможность визуализации увеличенного изображения участка образца. С помощью визуализации скрещенных И щелей, плоскости расположенных В изображения, ΜЫ можем контролируемым образом выделять излучение, которое выходит из наблюдаемой части поверхности образца, с пространственным разрешением до ≤ 1 мкм.



Рис. 8. Схематическое изображение оптической системы. О - образец, Л1-Л4 - собирающие линзы, Д- диафрагма, Л/4 - четвертьволновая пластинка, Щ-скрещенные щели, Плинейный поляризатор.

Используя объектив микроскопа с большим рабочим расстоянием (Л1), удается исследовать излучение, выходящее из различных областей фотонного кристалла с поверхности образца.

Скрещенные щели позволяют ограничить излучение от других областей образца, "обрезая" его действительное изображение. Изображение в плоскости скрещенных щелей контролируется при помощи микроскопа, оснащённого видеокамерой. Это основной метод контроля, какая именно меза исследуется и какую её часть ограничивают скрещенные щели.

После ЛЗ интересующий нас сигнал проходит через вертикально ориентированный линейный поляризатор, необходимый для анализа той или иной циркулярной поляризации σ + и σ -, и фокусируется с помощью линзы Л4 на входную щель спектрометра (МДР-23), оснащённого ССD-детектором. Таким образом, регистрируется спектр излучения $I(\lambda)$ в одной или другой циркулярной поляризации.

Разделение правой и левой круговой поляризации

Для определения право- и левополяризованных составляющих лазерного излучения была использована комбинация из четвертьволновой пластинки и линейного поляризатора, позволявшая различать разные (σ^+ и σ^-) круговые поляризации.

Четвертьволновая пластинка вносит разность фаз в $\pi/2$ между лучами, поляризованными в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В результате этого, циркулярно поляризованный свет после прохождения через пластинку становится линейно поляризованным (разность фаз 0 или π), причём для левой и правой циркулярной поляризации излучения результирующий сигнал будет поляризован во взаимно перпендикулярных направлениях. Таким образом, поворачивая четвертьволновую пластинку на угол $\pi/2$, можно добиться того, что поляризованной по вертикали будет либо правая циркулярная поляризация, либо левая.

После четвертьволновой пластинки, главная ось которой располагается под углом 45° к вертикали, установлен вертикально ориентированный линейный поляризатор, что позволяет отдельно изучать право- и левополяризованный свет, «переключаясь» между поляризациями поворотом четвертьволновой пластинки на 90°.

Степень циркулярной поляризации исследуемого излучения определяется по формуле

$$\rho = \left| \frac{I^+ - I^-}{I^+ + I^-} \right|$$

где *I*⁺ и *I*⁻ — интенсивности полосы лазерной генерации в ее максимуме для правой - (+) и левой - (—) поляризации, соответственно.

9 блок-схема Ha рисунке представлена возбуждения электролюминесценции и лазерной генерации света в планарных GaAs/AlGaAs микрорезонаторах электрическими импульсами накачки. Для того, чтобы имелась возможность использовать возбуждение электролюминесценции электрическими импульсами нижнее брэгговское зеркало микрорезонатора было n-допированным кремнием, а верхнее зеркало — р-допированным углеродом, с постепенно изменяющейся концентрацией n- и p-допирования в пределах 3х10¹⁸см⁻³÷ 1х10¹⁸см⁻³.



Рис.9. Блок-схема возбуждения лазерной генерации света электрическими импульсами и контроля их параметров.

4.3. Схема проведения эксперимента

Измерения заключались в определении зависимости интенсивности лазерного излучения и степени его циркулярной поляризации от параметров импульса электрической накачки.

Было проведено несколько серий измерений при изменении следующих параметров:

- длительности импульса
- периода повторения импульсов

Для возбуждения лазерного излучения в исследуемом микрорезонаторе к наноструктуре прикладывалось импульсное напряжение в виде периодических электрических импульсов с амплитудой до 75 В. Импульсная накачка позволяла использовать большую амплитуду электрического поля накачки, чем при непрерывной накачке и, соответственно, достигать значительно более высокой интенсивности стимулированного излучения.

4.4. Экспериментальные особенности

Измерения проводились на одной фиксированной мезе, параметры которой оказалось сложно выяснить. В излучении этого

микрорезонатора с хиральной фотонной структурой на верхнем Брэгговском зеркале наблюдались две спектральные полосы с различной циркулярной поляризацией. Мы следили за областью лазерной наноструктуры размером 15x15 мкм². Перед каждой новой серией измерений необходимо было контролировать позицию на поверхности микрорезонатора, с которой регистрировались спектры и поляризация лазерного излучения, так как со временем, несмотря на все предосторожности, наблюдалось небольшое смещение ~ 2 - 3 мкм, что могло сказываться на величине сигнала. По этой же причине измерения проводились в основном при откачке жидкого He, что лучше стабилизировало пространственное положение исследуемой области. Тем не менее, нам удалось добиться того, что за одно измерение подобное смещение не превышало ~ 1 мкм.

Также следует избегать перегрева образца, чтобы не привести к изменению режима генерации света или, в принципе, к повреждению структуры. Именно импульсная электрическая накачка лазера не приводит к существенному перегреву образца под действием больших полей. При увеличении длительности импульса предпочтительнее увеличивать период импульсов, чтобы образец успевал остыть между импульсами накачки.

Проверкой того, что образец не сдвинулся в процессе измерений, были спектры, снятые при конкретной длительности импульса. Мы снимали спектры на длительности импульса 1 мкс в начале серии измерений, непосредственно в процессе измерений, а также в конце серии. Если начальный и конечный проверочные спектры совпадают, то можно говорить о том, что пространственный сдвиг образца оставался в пределах допустимого. Проверочные спектры нашего эксперимента можно увидеть на Рис.10.



Puc.10. Спектры излучения в условиях развитой генерации света в σ⁺ и σ⁻ поляризации в начале и в конце измерений на длительности импульса ~ 1 мкс.

5. Результаты измерений

Мы провели серию экспериментов, в которой исследовали зависимость интенсивности и степени циркулярной поляризации полосы излучения микрорезонатора от длительности импульса накачки. Длительность импульса накачки менялась в пределах от 0.1 мкс до 1 мс.

На рисунке 11 представлены зависимости интенсивности и степени циркулярной поляризации полосы излучения лазерной наноструктуры от длительности импульса накачки.

Как это следует из данных рис. 11а, при малых длительностях наблюдается нелинейная импульса накачки зависимость интенсивности лазерного излучения от длительности электрического импульса. При больших длительностях импульса эта зависимость на линейную. Иными выходит словами, длительностях при возбуждающего импульса $\tau \ge 10$ мкс лазерное излучение В микрорезонаторе выходит на стационарный режим.



В этих условиях и степень циркулярной поляризации лазерного излучения заметно возрастает и при τ ≥ 50 мкс достигает своих максимальных значений (см. рис.11*b*).



Рис.11. (а) Зависимость интенсивности полосы излучения лазерной наноструктуры от длительности импульса накачки. (b) Зависимость степени циркулярной поляризации (CPD) излучения микрорезонатора от длительности возбуждающего электрического импульса.

Следует отметить, что при дальнейшем увеличении длительности импульса электрической накачки наблюдается слабый "красный сдвиг" полосы лазерной генерации, что может быть связано с нагревом образца за время действия импульса накачки (рис.12). Этот сдвиг сопровождается также частичным уменьшением степени циркулярной поляризации лазерного излучения.



Рис.12. Изменение спектров излучения в σ⁺ и σ⁻ поляризации при увеличении длительности импульса электрической накачки.

6. Заключение

Установлено, что с ростом длительности импульса накачки сверхлинейная зависимость интенсивности лазерного излучения при $\tau \approx 10$ мкс переходит в линейную зависимость от длительности электрического импульса. Кроме того, при длительности электрического импульса накачки $\tau \approx 1$ мкс степень циркулярной поляризации лазерного излучения составляет около $\rho < 50\%$, а при длительностях $\tau \geq 50$ мкс выходит на насыщение $\rho \gtrsim 75\%$.

Эти изменения связываются с релаксационными процессами в микрорезонаторе при импульсной электрической накачке.

7. Список литературы

- [1]. E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. 58, 2059 (1987).
- [2]. S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, and E. F. Schubert, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 3294 (1997).
- [3]. J. P. Reithmaier, G. Sek, A. Loffler, C. Hofmann, S. Kuhn, S. Reitzenstein, L. V. Keldysh, V. D. Kulakovskii, T. L. Reinecke, and A. Forchel, *Nature* 432, 197-200 (2004)
- [4]. .D. Englund, D. Fattal, E. Waks, G. Solomon, B. Zhang, T. Nakaoka, Y. Arakawa, Y. Yamamoto, and J. Vučković, *Phys. Rev. Lett.* 95, 013904 (2005).
- [5]. M. Kuwata-Gonokami, N. Saito, Y. Ino, M. Kauranen, K. Jefimovs, T. Vallius, J. Turunen, and Y. Svirko, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 227401(2005).
- [6]. K. Konishi, B. Bai, X. Meng, P. Karvinen, J. Turunen, Y. P. Svirko, and M. Kuwata-Gonokami, *Opt. Express* 16, 7189 (2008).
- [7]. A. A. Maksimov, I. I. Tartakovskii, E. V. Filatov, S. V. Lobanov, N. A. Gippius, S. G. Tikhodeev, C. Schneider, M. Kamp, S. Maier, S. Höfling, and V. D. Kulakovskii, *Phys. Rev. B89*, 045316 (2014).
- [8]. S. V. Lobanov, S. G. Tikhodeev, N. A. Gippius, A. A. Maksimov, E. V. Filatov, I. I. Tartakovskii, V. D. Kulakovskii, T. Weiss, C. Schneider, J. Geßler, M. Kamp, S. Höfling, *Phys. Rev. B92*, 205309 (2015).
- [9]. A.A. Demenev, V.D. Kulakovskii, C. Schneider et al. Appl. Phys. Lett. 109, 171106 (2016).
- [10]. А. А. Максимов, Е. В. Филатов, И. И. Тартаковский, В. Д. Кулаковский, С. Schneider, S. Höfling Труды XXIII Международного симпозиума 11–14 марта 2019 г., Нижний Новгород, т.2, 742-743.