

На правах рукописи

Акпаров Владимир Валерьевич

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЛАЗЕР И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В КАЧЕСТВЕ
ДАТЧИКА ВРАЩЕНИЯ**

Специальность:

01.04.21 – лазерная физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2011

Работа выполнена в ЗАО «Новая лазерная техника»

Научный руководитель: Доктор технических наук
Дураев Владимир Петрович

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
профессор
Митягин Александр Юрьевич (ИРЭ РАН)

Кандидат физико-математических наук
Пятаков Александр Павлович (МГУ им. М.В.
Ломоносова)

Ведущая организация: ОАО «Центральный научно-
исследовательский технологический институт
«Техномаш» (Москва)

Защита состоится «25» мая 2011 г. в 15 часов на заседании
диссертационного совета Д212.156.01 при Государственном
образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт (государственный университет)» по
адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9,
ауд. 204НК

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико-
технологического института (государственного университета)

Автореферат разослан « » 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Батурин А.С.

Актуальность проблемы

Полупроводниковые лазеры представляют наиболее динамично развивающуюся часть физики и технологии полупроводников, а уровень фундаментальных и прикладных исследований в этой области определяет прогресс мировой оптоэлектронной промышленности.

За последние несколько десятилетий для решения многих практических задач были создан ряд конструкций полупроводниковых лазеров:

- Лазеры с резонатором Фабри-Перо (ФП)
- Лазеры с распределенной обратной связью (РОС)
- Лазеры с распределенными брэгговскими зеркалами (РБЗ)
- Лазеры с внешними гибридными зеркалами
- Лазеры с волоконно-брэгговской решеткой (ВБР)
- Лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL)
- Полупроводниковый кольцевой лазер (ПКЛ)

Одним из важнейших измерительных приборов, определяющих уровень развития навигационной техники летательных аппаратов различного назначения, являются датчики вращения. От их совершенства зависит точность автономного полета. В настоящее время существуют как датчики вращения, основанные на микроэлектромеханических системах, так и не имеющие подвижных частей и потому чрезвычайно надежные волоконно-оптические гироскопы и гироскопы на газовых кольцевых лазерах, основанные на эффекте Саньяка [1]. Важной и до сих пор не нашедшей своего решения практической проблемой является создание датчика вращения на основе полупроводникового кольцевого лазера (ПКЛ). С созданием такого датчика вращения связывают возможность принципиального улучшения таких важных характеристик датчика вращения, как массогабаритные характеристики, стоимость и простота изготовления, а, возможно, и точность и чувствительность к другим, отличным от вращения, воздействиям. Для создания датчика вращения на основе кольцевого полупроводникового лазера необходимо

решить ряд фундаментальных и прикладных проблем, таких как уменьшение массогабаритных характеристик датчика, повышение его чувствительности, снижение влияния окружающей среды на работу датчика.

Таким образом, создание датчиков вращения на основе полупроводниковых кольцевых лазеров, их исследование и разработка технологии изготовления является актуальной задачей как с научной, так и с практической точек зрения.

Настоящая работа посвящена созданию датчика вращения на основе полупроводниковых лазеров с кольцевым резонатором и исследованию его характеристик.

Цель работы

Целью работы явилось исследование особенностей функционирования ПКЛ и исследование ПКЛ с кольцевым резонатором в качестве датчика вращения на основе эффекта Саньяка.

Для достижения поставленной цели решался следующий комплекс задач:

- Разработка физико-технологических основ создания полупроводникового кольцевого лазера.
- Расчет, конструирование и изготовление ПКЛ.
- Исследование факторов, влияющих на электрофизические параметры ПКЛ.
- Исследование основных электрофизических и оптических характеристик полупроводникового кольцевого лазера.
- Физико-математическое моделирование полупроводникового кольцевого лазера.
- Исследование основных характеристик работы полупроводникового лазера в режиме датчика вращения.

Научная новизна

1. Определены необходимые и достаточные условия работы полупроводниковых кольцевых лазеров в режиме датчика вращения.

2. Исследовано влияние длины кольцевого резонатора ПКЛ на чувствительность к вращению датчика на основе ПКЛ.
3. Создана адекватная математическая модель ПКЛ, описывающая режимы и динамику генерации ПКЛ.
4. Впервые получен режим синхронизации продольных мод ПКЛ путем модуляции тока накачки лазера.

Практическая значимость

1. Предложена и реализована конструкция полупроводникового кольцевого лазера и создана технология его изготовления.
2. Созданы и исследованы датчики вращения на базе полупроводникового кольцевого лазера с порогом чувствительности 1 град/с.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается согласием теоретических оценок и экспериментальных результатов.

На защиту выносятся следующие положения:

- Использование волоконного резонатора на основе световода с сохранением поляризации в ПКЛ обеспечивает более узкий (менее 0,1 нм) оптический спектр излучения и меньшую чувствительность к изменениям в окружающей среде по сравнению с резонатором из одномодового волокна без сохранения поляризации.
- Чувствительность к вращению зависит от спектральной ширины продольных мод кольцевого резонатора.
- При увеличении длины резонатора сужаются спектральные ширины линий биений продольных мод, и увеличивается порог чувствительности к вращению.
- Спектральная ширина линии биений значительно сужается при синхронизации продольных мод кольцевого лазера путем модуляции тока накачки.

Перспективы использования результатов работы

Созданные в процессе выполнения диссертационной работы ПКЛ и датчики вращения на их основе найдут самое широкое применение в различных областях науки и техники, в том числе в навигационной аппаратуре, при исследованиях колебаний скорости вращений земли, в датчиках вращения быстровращающихся объектов.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских, международных конференциях и симпозиумах. В частности:

- 2005, Конференция «Ломоносов 2005», г. Москва
- 2006, Международный семинар "Физико-математическое моделирование систем", г. Воронеж
- 2007, Международный семинар "Физико-математическое моделирование систем", г. Воронеж
- 2010, 11-й Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике, г. Сочи.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11-ти научных работах, в том числе в 4-х тезисах, 7-ми публикациях в научных журналах из них в 6-ти публикациях в научных журналах из списка ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, **шести глав**, заключения и списка литературы. Работа содержит **144** страницы, включающих **1** таблицу и **59** рисунков.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность разработки технологии изготовления и исследований полупроводниковых кольцевых лазеров с волоконным резонатором, перспективных для создания датчиков вращения. Формулируется цель работы и задачи, решаемые для достижения поставленной цели, перечислены научные результаты, выносимые на защиту, показаны научная новизна исследования и его практическая ценность.

В первой главе представлен обзор имеющихся публикаций по современному состоянию и путям создания полупроводниковых кольцевых лазеров и их использованию в качестве датчиков вращения.

Рассматриваются теоретические основы эффекта Саньяка в лазерах, а также принципы работы датчиков вращения на основе этого эффекта.

ПКЛ являются перспективным направлением исследований. В частности создание датчика угловых скоростей на основе ПКЛ может дать существенный толчок в развитии инерциальной навигации. Такой датчик будет миниатюрным, иметь меньшую массу, а также больший временной ресурс работы по сравнению с имеющимися лазерными гироскопами на базе газовых кольцевых лазеров (ЛГ-ГКЛ). Датчик сможет найти свою нишу в области гироскопии даже при сравнительно невысоких уровнях чувствительности.

В этой главе рассмотрены отличия ПКЛ от лазеров с линейным резонатором, в частности рассмотрены такие лазеры, как лазеры с РБЗ и РОС-лазеры. Приведена конструкция ПКЛ и проведен обзор возможных применений ПКЛ.

Обзор работ в области исследования ПКЛ и создания датчика вращения на его основе показывает интерес научного сообщества к ПКЛ, а также показывает широкие перспективы его применения. ПКЛ могут быть использованы в оптических линиях связи, в составе различных устройств полностью оптической обработки информации, в навигационных системах, в составе лазерного гироскопа, в качестве задающего генератора в ВЧ и СВЧ генераторах, и во многих других устройствах.

На основании анализа имеющихся материалов показана необходимость решения проблемы создания полупроводниковых лазеров на основе InP с внешним кольцевым резонатором [2] на основе световода с сохранением поляризации с целью использования в качестве датчиков вращения. Определены конкретные проблемы и необходимые исследования для достижения поставленной цели.

Во второй главе рассматриваются основные требования к эпитаксиальным структурам, к активному элементу ПКЛ, способы их формирования. Представлены результаты конструирования и технологии изготовления ПКЛ на основе гетероэпитаксиальной структуры InGaAsP/InP с волоконно-оптическим резонатором.

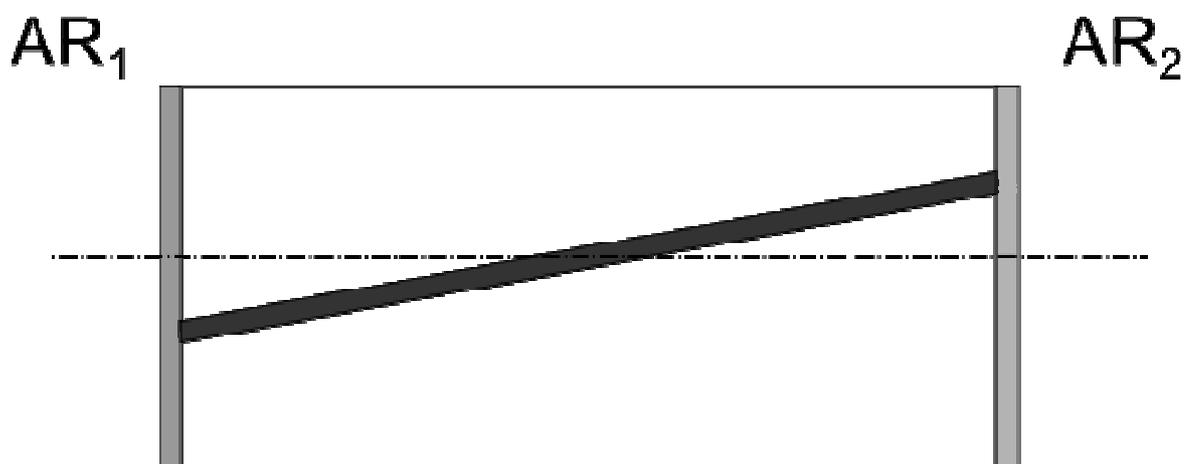


Рис. 1. Схематическое изображение активного элемента ПКЛ.

Обоснована базовая конструкция активного элемента на основе зарощенной мезаполосковой конструкции и гребневидной мезаполоски [3]. Мезаполоска сформирована под углом 7 градусов к просветленным граням активного элемента (рис. 1). В зарощенной мезаполосковой конструкции осуществлено травление структуры за активную область и последующее зарощивание в боковом направлении широкозонным материалом со встречно-включенным p-n переходом или изолирующим слоем InP, легированным Fe. В гребневидной мезаполоски осуществлен недотрав активной области на глубину 0,15 мкм с последующей изоляцией в боковом направлении пленкой ZnSe. Обе конструкции обеспечивают

малые размеры тела свечения (1...2 мкм), малые токи накачки, одномодовый режим генерации, линейность ватт-амперных характеристик, стабильное пространственное распределение поля, хороший теплоотвод, надежность и долговечность.

Рассмотрены процессы изготовления цилиндрических линз на торцах оптического волокна для согласования с активным элементом ПКЛ.

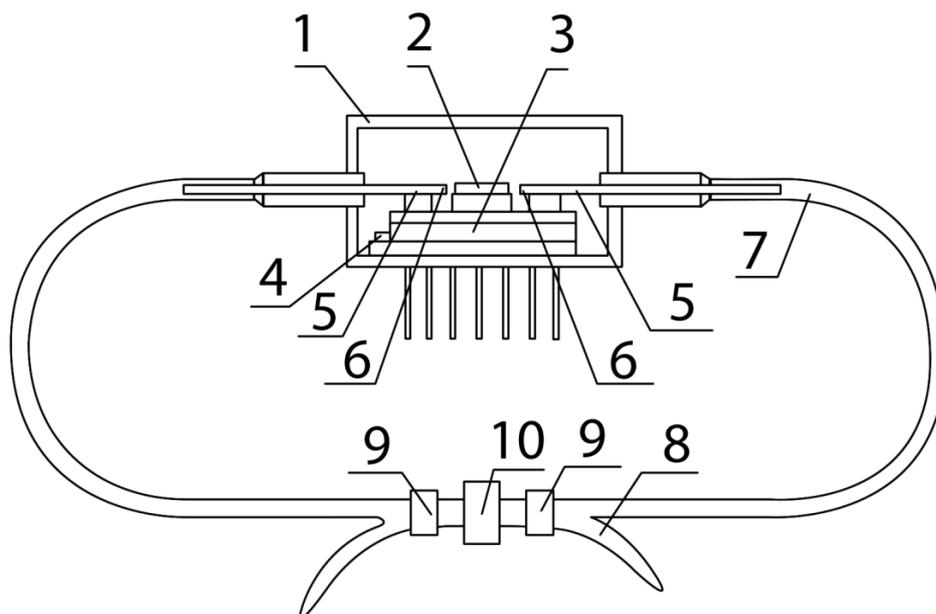


Рис. 2. Схема кольцевого лазера на основе полупроводникового оптического усилителя. 1 – металлокерамический корпус, 2 – активный элемент, 3 – микроохладитель, 4 – термистор, 5 – одномодовое волокно, 6 – микролинзы, 7 – кольцевой резонатор, 8 – волоконные выводы, 9 – оптические коннекторы, 10 – оптическая розетка.

Описаны разработанные принципы конструирования полупроводниковых кольцевых лазеров и технология сборки ПКЛ на базе одномодового световода с сохранением поляризации. Схема кольцевого лазера на основе полупроводникового оптического усилителя (ПОУ) приведена на рис. 2.

В третьей главе представлены результаты исследований основных характеристик ПКЛ, используемых в датчиках вращения.

Ватт-амперные характеристики ПКЛ на длину волны 1540 нм до замыкания и после замыкания кольца резонатора показаны на рис. 3а и рис. 3б, соответственно. Мощность сверхлюминесцентного излучения, т.е. до замыкания кольца (режим усилителя бегущей волны), составляла 1,9 мВт при токе накачки 250 мА. В режиме замыкания кольца пороговый ток генерации ПКЛ составил 70 мА, в режиме генерации при токе накачки 140 мА мощность излучения составила 12 мВт.

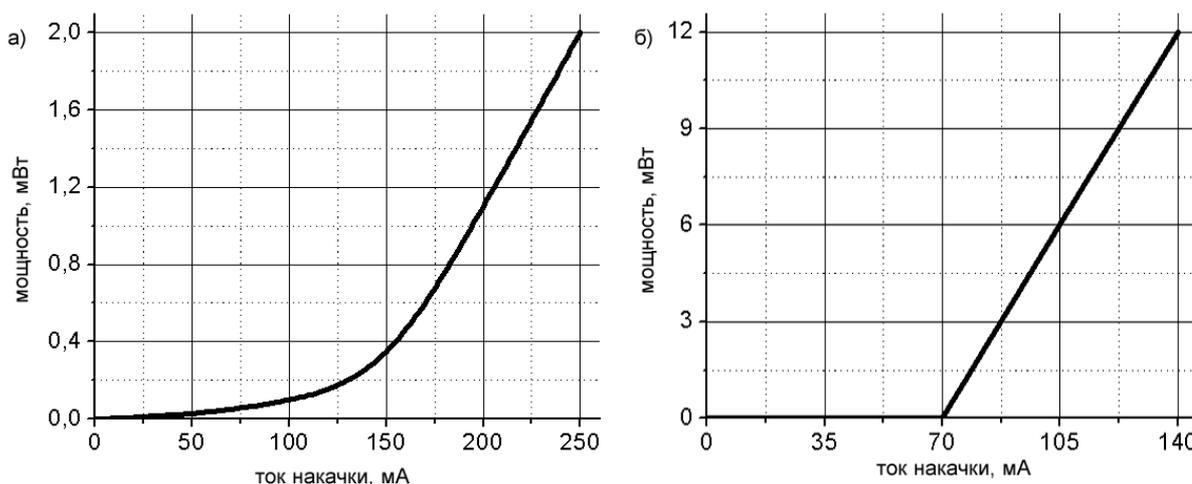


Рис. 3. Ватт-амперные характеристики (ВтАХ) ПКЛ в разомкнутом (а) и замкнутом (б) состоянии.

Спектр сверхлюминесцентного излучения усилителя бегущей волны (до замыкания кольца) имел спектральную полуширину линии излучения 30 нм на длине волны 1536.4 нм (рис. 4а), в то время как спектр генерации ПКЛ (рис. 4б) имел полуширину линии 0,1 нм на длине волны 1540,2 нм. Таким образом, наблюдается увеличение длины волны излучения с 1536.4 нм (в режиме сверхлюминесцентного излучения) до 1540.2 нм (в режиме генерации) и резкое сужение спектра в режиме генерации. Ток накачки при этом составлял 100 мА, как для ПОУ, так и для ПКЛ, а длина резонатора ПКЛ была также равна 3,5 м.

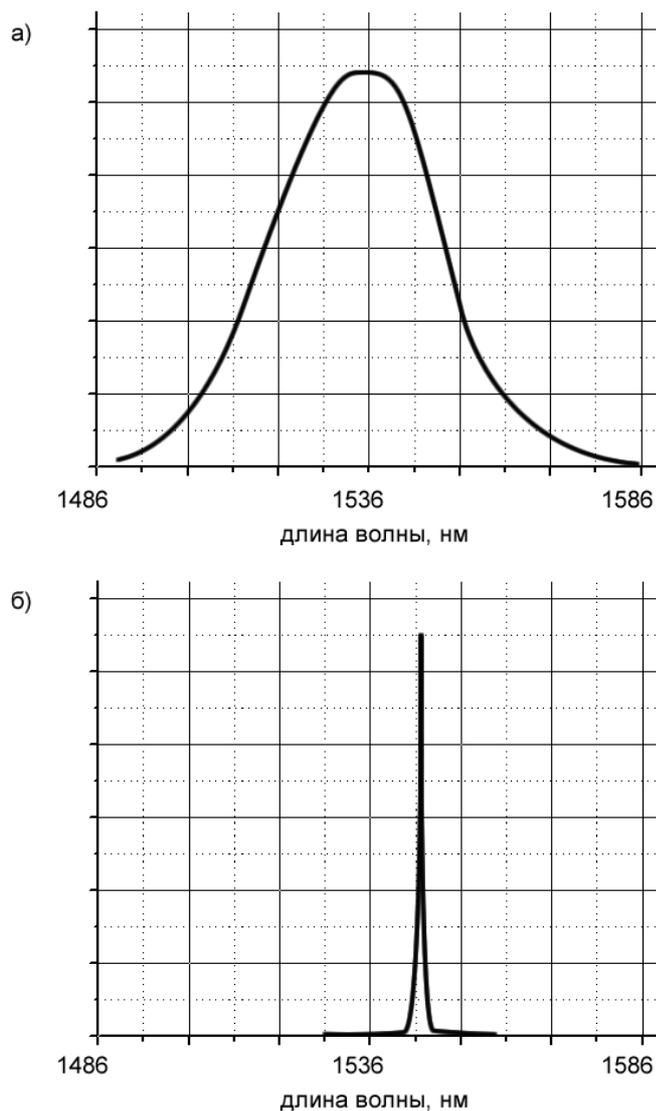


Рис. 4. Оптический спектр излучения ПОУ (а) и ПКЛ (б).

Видно, что широкий спектр ПОУ после замыкания волоконного кольца сузился. Его спектральная ширина составила менее 0,5 нм, что также говорит о переходе в режим лазерной генерации.

Из сравнения этих характеристик видно, что у ПКЛ появился порог генерации на уровне 70 мА, у ПОУ порог генерации отсутствует, т.к. ПОУ работает в режиме суперлюминесценции. Максимальная выходная мощность значительно возросла, что тоже говорит о наличии лазерного режима.

В этой главе также рассмотрено явление синхронизации продольных мод [4] кольцевого лазера путем модуляции тока накачки на частоте, равной частотному интервалу мод резонатора.

$$J(t) = J_0(1 + m \cos(\omega t)), \quad (1)$$

здесь J_0 – постоянная составляющая тока накачки, m – глубина модуляции тока, ω – частота модуляции.

Подавая ток, изменяющийся по закону (1) на ПОУ, можно устанавливать частоту модуляции равной межмодовому расстоянию, при этом спектральная ширина линии биений значительно сужается (с 5МГц до 3 кГц), а сами они многократно вырастают по амплитуде. Постоянная составляющая тока накачки была равна 1,1 порогового тока. На выходе ПКЛ наблюдались оптические импульсы с частотой повторения, равной частоте межмодового интервала, длительность импульсов была менее 4 нс.

В четвертой главе представлены результаты изготовления и испытаний датчиков вращения на базе ПКЛ.

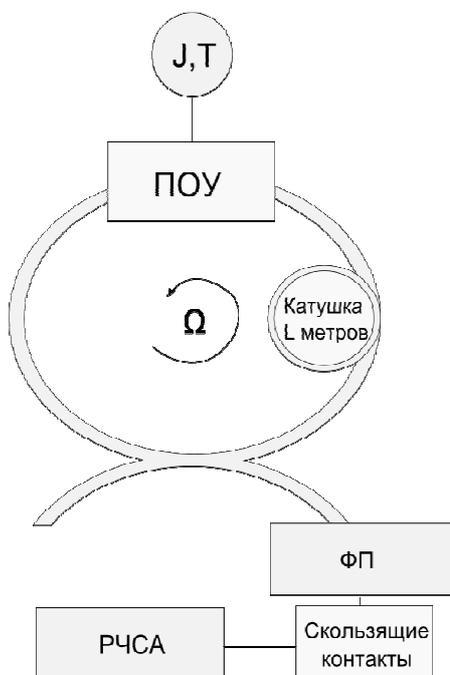


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для исследования гироскопических свойств ПКЛ.

Схема экспериментальной установки для исследования эффекта Саньяка в ПКЛ приведена на рис. 5. В данной конфигурации в резонатор ПКЛ вставлена катушка оптического волокна. Сам ПКЛ помещён на вращающийся стол производства французской компании Actidyn. Стол позволяет производить вращение с угловыми скоростями в диапазоне 0-1000 град/сек. В проводимых исследованиях скорость вращения изменялась в интервале от 0 град/сек до 180 град/сек.

Изменение саньяковской частоты биений Δf определялось по формуле (2) [5]:

$$\Delta f = (2R\Omega)/(n\lambda), \quad (2)$$

где R- радиус кольца, Ω - угловая скорость вращения стола, λ - длина волны, n - показатель преломления среды.

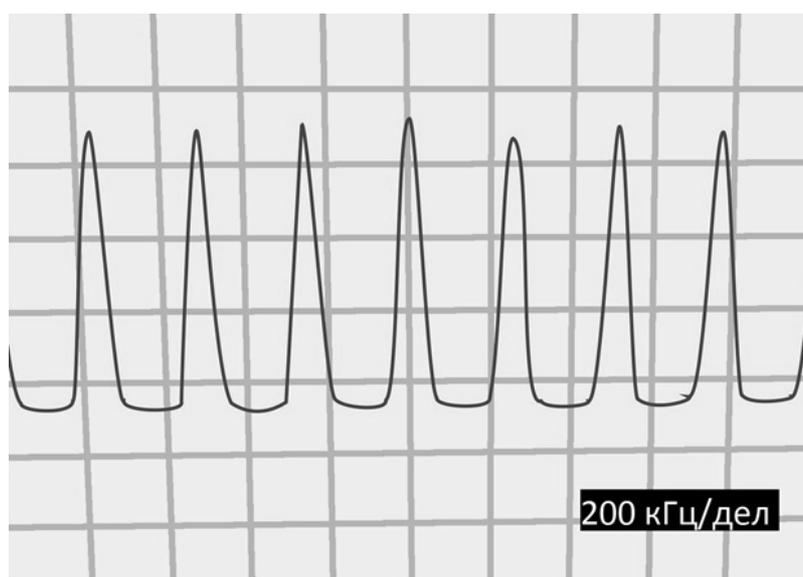


Рис. 6. Радиочастотный спектр, регистрируемого излучения с ПКЛ с катушкой длиной 800 метров в отсутствие вращения.

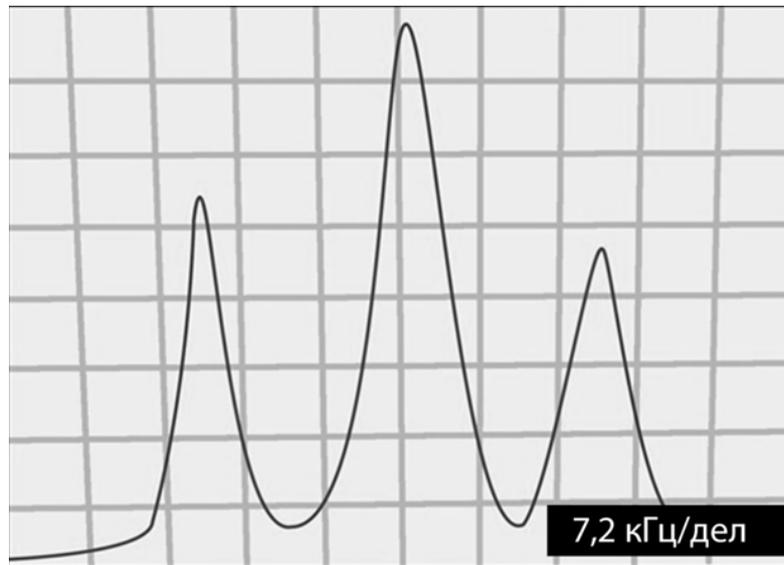


Рис. 7. Спектр биений частот встречных волн при вращении ПКЛ вне области захвата.

На рис. 7 приведен радиочастотный спектр биений частот встречных волн при вращении ПКЛ вне области захвата со скоростью ~ 20 град/с. Этот спектр содержит три частотные компоненты – центральную и две боковых. Центральная компонента точно соответствует частоте межмодовых биений двух соседних оптических мод при неподвижном ПКЛ, но при вращении ПКЛ каждая из этих двух оптических мод расщепляется на две оптические компоненты (назовем их «нижней» и «верхней») с расстоянием между ними, равном величине расщепления вследствие эффекта Саньяка. В этом случае центральная частота радиочастотного спектра остается на месте и равна разности оптических частот между «нижними» (или «верхними») частотами двух соседних оптических расщепленных мод.

Низкочастотная (левая) радиочастотная компонента на спектре рис. 7 соответствует разности частот «верхней» оптической компоненты более низкочастотной оптической моды и «нижней» оптической компоненты более высокочастотной оптической моды. Соответственно, высокочастотная (правая) радиочастотная компонента на спектре рис. 7 соответствует разности частот «нижней» оптической компоненты более низкочастотной оптической моды и «верхней» оптической компоненты более высокочастотной оптической моды. Расстояние между соседними компонентами радиочастотного спектра точно равно

саньяковской частоте биений, пропорциональной угловой скорости вращения. При изучении радиочастотного спектра не было обнаружено линии биений на частоте Δf . Это может быть связано с несовершенством измерительного тракта.

На рис. 8 приведена зависимость величины расщепления частот встречных волн от скорости вращения ПКЛ вследствие эффекта Саньяка.

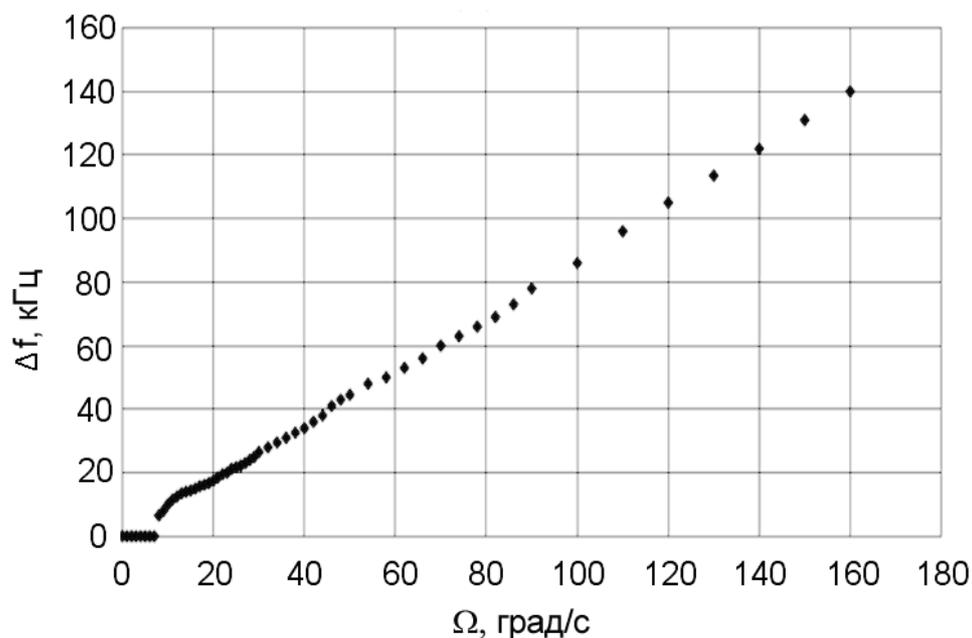


Рис. 8. Зависимость величины расщепления частот встречных волн от угловой скорости вращения ПКЛ.

Характерный загиб характеристики в диапазоне 10-15 град/с говорит в пользу того, что на рис. 8 мы наблюдаем эффект захвата частот встречных волн при угловой скорости менее 10 град/с.

Были проведены исследования спектральной ширины линии биений Саньяка при различных длинах резонатора.

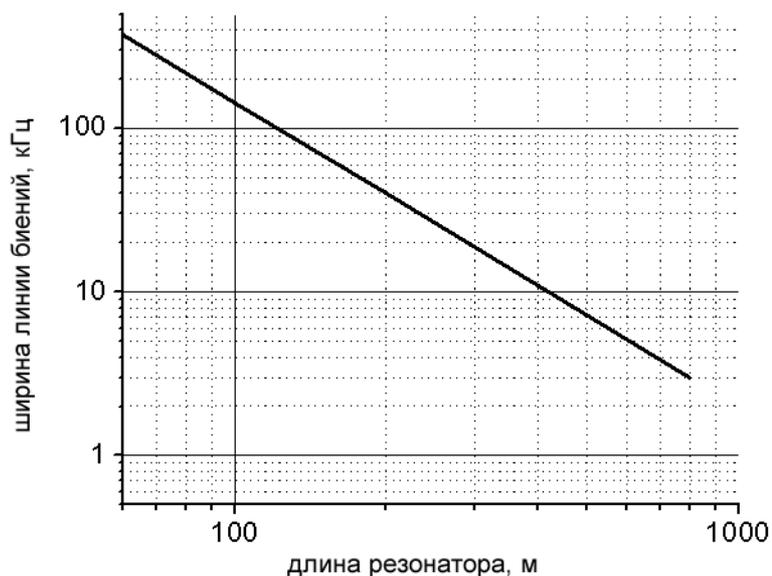


Рис. 9. Зависимость спектральной ширины линии биений Саньяка от длины резонатора.

Эта зависимость носит такой же характер, как и зависимость спектральной ширины линии биений продольных мод от длины резонатора. Она хорошо аппроксимируется формулой $\delta\nu = \frac{a}{L^{1.86}}$.

В пятой главе представлена математическая модель ПКЛ и результаты моделирования.

В основе построения математической модели ПКЛ были использованы волновые уравнения в приближении медленно меняющихся амплитуд [6]. Для учета дисперсии коэффициента усиления дополнительно решались уравнения для поляризации среды. Использование уравнений бегущих волн обосновано в связи с наличием «хорошего» волновода в кристалле ПОУ. Моделирование волоконного резонатора производилось с учётом того, что дисперсия в волокне длиной несколько метров мала и ей можно пренебречь. Поэтому волоконный резонатор рассматривался только как линия задержки. На стыках волокна и кристалла ПОУ введены граничные условия, которые учитывают отражение, пропускание и потери.

Уравнение бегущих волн для волны, распространяющейся в положительном направлении оси z записывается следующим образом:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + v_g \frac{\partial}{\partial z}\right) E_+(z, t) = -i v_g \beta E_+(z, t), \quad (3)$$

где v_g – групповая скорость волны, E_+ – компонента поля волны, распространяющейся в положительном направлении, β – постоянная распространения.

Аналогичным образом записывается уравнение для волны, распространяющейся в обратном направлении. Для поляризации среды используется одноосцилляторная модель, в которой кривая усиления активной среды описывается одной кривой Лоренца [7]. Данное описание хорошо подходит для исследуемого объекта.

$$\frac{\partial}{\partial t} P^\pm = \bar{\gamma}(E^\pm - P^\pm) + i\omega P^\pm, \quad (4)$$

здесь $\bar{\gamma}$ – ширина кривой Лоренца, ω – сдвиг центральной частоты относительно частоты отсчета, P_\pm – компонента вектора поляризации среды. Для описания динамики коэффициента усиления в модели используется уравнение динамики концентрации носителей – модифицированное стандартное скоростное уравнение (5).

$$\frac{d}{dt} n(z, t) = J(t) - R(n) - 2v_g \operatorname{Im}(E^* \beta E), \quad (5)$$

здесь $J(t)$ – член описывающий инжекцию носителей через контакт, $R(n)$ – слагаемое, отвечающее за убыль носителей на спонтанную и безызлучательную рекомбинацию, последний член уравнения описывает убыль носителей на вынужденное излучение.

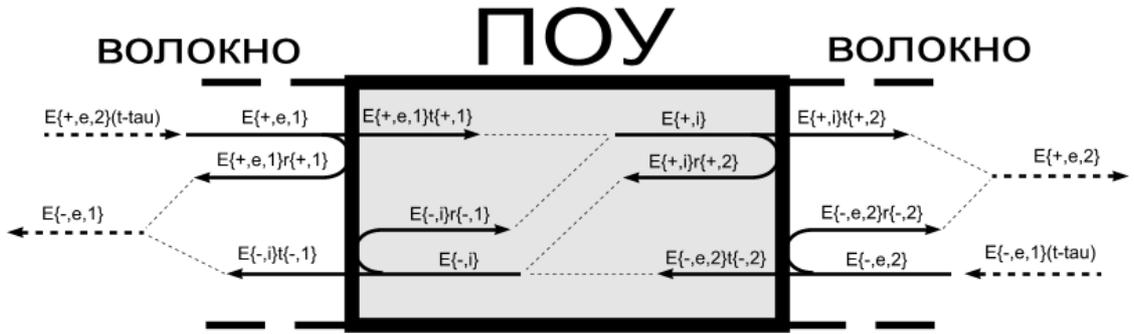


Рис. 10. Иллюстрация граничных условий.

Чтобы корректно сформулировать граничные условия, необходимо разобраться, что же происходит на границе волокно/кристалл. Наша система представляет собой составной кольцевой резонатор, состоящий из одного резонатора с активной средой – полупроводниковый кристалл и одного пассивного резонатора – волокно. Рассмотрим одну из границ волокно/кристалл. Строго говоря, такой границы нет – есть граница трёх сред волокно/воздух/кристалл. Обозначим E_1^+ и E_1^- – волны, набегающие на граничную область слева и справа соответственно, а E_2^+ и E_2^- – волны, распространяющиеся налево и направо соответственно, после прохождения через границу. Будем для простоты считать, что граница является бесконечно тонкой. Ясно, что на границе двух одномерных сред могут происходить только следующие явления – прохождение, отражение и поглощение. Будем рассматривать только прохождение и отражение, считая, что всё, что не учитывается этими двумя явлениями, поглощается на границе. Поглощение учитывает, как поглощение средой, так и рассеяние под такими углами, что излучение выходит из волноведущих областей. Тогда в общем виде условия отражения и прохождения на границе сред можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} E_2^+ = t^+ E_1^+ + r^- E_1^- \\ E_2^- = r^+ E_1^+ + t^- E_1^- \end{cases} \quad (6)$$

где t^\pm и r^\pm – коэффициенты пропускания и отражения для границ, соответственно. Эти коэффициенты могут зависеть от частоты излучения и

направления его распространения. Выражение (6) можно записать также в виде матричного произведения:

$$\begin{pmatrix} E_2^+ \\ E_2^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t^+ & r^- \\ r^+ & t^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Такое выражение применяется к каждой из двух границ.

Используя эту модель, можно описать как одномодовую, так и многомодовую генерацию, в зависимости от параметров лазера.

Приведенная модель позволяет:

1. Проанализировать работу многомодового кольцевого лазера, как интегрального, так и на основе ПОУ.
2. Проанализировать работу многомодового лазера с резонатором Фабри-Перо.
3. Учесть влияние невзаимных фазовых элементов в кольцевой резонатор, для моделирования эффекта Саньяка при вращении кольцевого лазера.

Результаты расчетов находятся в качественном соответствии с экспериментальными данными. Получение количественного соответствия затруднено в связи с неопределенностью реальных параметров лазера.

В шестой главе представлено заключение и описаны перспективы дальнейших исследований ПКЛ и датчика вращения на его основе.

В настоящей работе представлены результаты создания и исследований полупроводникового кольцевого лазера с длиной волны излучения ~ 1540 нм с волоконно-оптическим кольцевым резонатором в некоторых основных режимах генерации, в т.ч. в режиме датчика угловой скорости. Рассмотрена конструкция ПКЛ на базе полупроводникового оптического усилителя бегущей волны и резонатора, состоящего из кольцевого одномодового волокна с сохранением поляризации. При замыкании и размыкании кольцевого резонатора ПКЛ, а также при изменении его радиуса исследованы изменения порогового тока, длины волны и спектра излучения.

С помощью измерения радиочастотного спектра биений встречных волн проведены исследования ПКЛ в режиме датчика угловой скорости. Величина сдвига частот встречных волн ПКЛ пропорциональна угловой скорости вращения ПКЛ. Минимальная обнаружимая с помощью созданного ПКЛ угловая скорость вращения зависит от длины резонатора и составила в данном эксперименте 1 град/с. Масштабный коэффициент равен 900 Гц/град·с.

Основные результаты работы:

1. Впервые создан полупроводниковый кольцевой лазер на основе полупроводникового оптического усилителя и оптического волоконного резонатора с сохранением поляризации с применением цилиндрических микролинз.
2. Проведен анализ модовой структуры ПКЛ с помощью метода переноса спектра из оптического диапазона в радиочастотный. Исследована зависимость спектральной ширины линии биений на разностных частотах продольных мод ПКЛ от длины резонатора. Показано, что зависимость спектральной ширины линии биений на разностных частотах продольных мод ПКЛ от длины резонатора описывается формулой $\delta\nu = \frac{a}{L^{1.86}}$, где L – длина резонатора, a – константа.
3. Впервые получен режим синхронизации продольных мод кольцевого лазера с помощью активной синхронизации модуляцией тока накачки на частоте межмодового интервала ПКЛ.
4. Показано, что режим генерации оптических импульсов с помощью ПКЛ в режиме активной синхронизации мод может достигаться при условии сохранения угла поворота поляризации входящего и исходящего лучей в волоконном резонаторе.
5. Создан датчик вращения на основе ПКЛ, реализующий эффект Саньяка, имеющий на порядок меньший вес, чем датчики на ГКЛ. Такой датчик обладает простотой сборки, дешевой конструкцией, не требует высоких напряжений и обладает сниженным энергопотреблением (до 3 Вт).

6. Обнаружен захват встречных волн в диапазоне скоростей вращения, зависящем от спектральной ширины линии биений продольных мод ПКЛ.
7. Показано, что зависимость величины расщепления частот встречных волн от угловой скорости вращения ПКЛ в области скоростей вращения выше зоны захвата описывается формулой $\Delta f = (4A\Omega)/(Pn\lambda)$, где A – площадь кольцевого резонатора, а P – его периметр.
8. Впервые обнаружено явление аномального расщепления линии биений встречных волн при вращении полупроводникового кольцевого лазера.
9. Предложен новый метод измерения угловой скорости вращения с помощью ПКЛ, состоящий в том, что сигнал биений встречных волн детектируется, например, квадратичным детектором, затем фильтруется полосовым фильтром с полосой равной половине расстояния между продольными модами настроенным на одну из частот биений продольных мод. Далее в полученном сигнале регистрируется величина расщепления частот, зависящая известным образом от скорости вращения.
10. Создана адекватная математическая модель для описания ПКЛ с составным резонатором в состоянии покоя.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Акпаров В.В., Дмитриев В.Г., Дураев В.П., Казаков А.А., «Полупроводниковый кольцевой лазер и исследование его характеристик в режиме датчика вращения», Квантовая электроника, 2010, 40, № 10, с.851.
2. Акпаров В.В., Дураев В.П., Логгинов А.С., Неделин Е.Т., «Кольцевой лазер на основе полупроводникового оптического усилителя», Фотон-Экспресс, 2005, №6(46), с.23.
3. Акпаров В.В., Дмитриев В.Г., Дураев В.П., «Расчет и конструирование полупроводниковых кольцевых лазеров», Обзорение прикладной и промышленной математики, 2010, том. 17, вып.4, с.525.
4. Акпаров В.В., Дураев В.П., Логгинов А.С., Неделин Е.Т., «Активная синхронизация мод в кольцевом лазере на основе полупроводникового оптического усилителя», Вестник Моск.Ун-та, Сер. Физика, астрономия, 2006, №3, с. 45.
5. Акпаров В.В., Шенин Ф.А., «Математическое моделирование многомодового полупроводникового кольцевого лазера», Вестник ВГТУ, 2007, т. 3, № 8, с. 125.
6. Акпаров В.В., Шенин Ф.А., «Численное моделирование процесса конкуренции электромагнитных волн, распространяющихся в полупроводниковом оптическом усилителе, за счет термализации неравновесных носителей», Вестник ВГТУ, 2007, т. 3, № 8, с. 127.
7. Акпаров В.В., Шенин Ф.А., «Математическое моделирование взаимодействия встречных электромагнитных волн в полупроводниковом оптическом усилителе», Вестник ВГТУ, 2006, т. 2, № 8, с. 98.

Цитируемая в автореферате литература:

1. Ароновиц Ф., Лазерные гироскопы. / В «Применения лазеров» пер. с английского под ред. Тычинского В.П., Москва, «Мир», 1974.
2. Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П., Сумароков М.А., Патент №41924, Кольцевой лазер, 2004.
3. Кейси Х., Паниш М., Лазеры на гетероструктурах, Москва, «Мир», 1981.
4. Качмарек Ф., Введение в физику лазеров, Москва, «Мир», 1981.
5. Taguchi K., Fukushima K., Ishitani A. and Ikeda M., Optical and Quantum Electronics, 1999, 31, p.1219.
6. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П., Теория волн. Москва, «Наука», 1979.
7. Ning C.Z., Indik R.A., and Moloney J.V., "Effective Bloch Equations for Semiconductor Lasers and Amplifiers", IEEE J. Quant. Electron., 1997, Vol. 33, p.1543.