

На правах рукописи



**Савинов Константин Николаевич**

**МНОГОЧАСТОТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ДИОДНОГО ЛАЗЕРА С ВНЕШНИМ  
РЕЗОНАТОРОМ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ КПН РЕЗОНАНСОВ В РУБИДИИ-87**

1.3.6 – Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном  
учреждении высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель:

**Дмитриев Александр Капитонович,**  
доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

**Кобцев Сергей Михайлович,** доктор физико-математических наук, доцент,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет», отдел Лазерной физики и инновационных  
технологий, заведующий отделом, г. Новосибирск;

**Баранцев Константин Анатольевич,** кандидат физико-математических  
наук, Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого», Высшая школа прикладной физики и  
космических технологий, доцент, г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт  
физики полупроводников им. А.В. Ржанова» Сибирского отделения  
Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «14» мая 2024 г. в 9:30 часов на заседании  
диссертационного совета 24.1.028.01 (Д 003.005.02) при Федеральном  
государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматизации и  
электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу:  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Институт  
автоматизации и электрометрии СО РАН и на сайте [www.iae.nsk.su/ru/](http://www.iae.nsk.su/ru/)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, доктор физико-математических  
наук, профессор



Леонид Вениаминович  
Ильичёв

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Квантовые стандарты частоты нашли широкое применение в различных областях науки и техники [1, 2]. Перспективными в настоящее время являются рубидиевые часы на основе резонанса когерентного пленения населенности (КПН), открытого в 1970-е годы [3, 4].

В случае попадания каждой спектральной составляющей излучения в соответствующие линии оптического поглощения, а также при наличии системы автоподстройки частоты появляется возможность стабилизировать по резонансу КПН частоту сверхвысокочастотного (СВЧ) генератора, представляя эту часть устройства в качестве стандарта частоты радиодиапазона. Стабилизация оптической частоты, например, по центру линии поглощения при низкочастотной модуляции частоты позволяет получить стандарт частоты в оптическом диапазоне.

В настоящее время для возбуждения резонансов КПН в рубидиевых стандартах широко используются поверхностно-излучающие лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL), миниатюрные размеры которых позволяют не только снизить уровень энергопотребления, но и дают возможность для эффективной СВЧ модуляции тока инжекции в широком диапазоне частот, в том числе и на частоте часового перехода [5, 6]. Однако, несмотря на работы по подстройке оптической частоты излучения на центр линии поглощения [7, 8], ширина спектра подобных лазеров порядка 50 МГц [9], т.е. отношение ширины линии к оптической частоте порядка  $10^{-7}$ , что не позволяет создать на их основе оптический стандарт частоты. Диодные лазеры с внешним резонатором (ДЛВР) обладают существенно меньшей шириной линии, порядка  $10^4$  Гц, что позволяет перейти к созданию стандарта частоты, застabilизированного одновременно в оптическом и радиодиапазонах. Вместе с тем узкая линия ДЛВР позволяет проводить прецизионные интерферометрические измерения.

### Степень разработанности темы исследования

Для создания оптического стандарта на основе резонанса КПН было предложено использование фемтосекундного лазера (ФСЛ) с самосинхронизацией мод, частота повторения импульсов которого напрямую может быть привязана к сверхтонкому переходу  $5S_{1/2}F_2-5S_{1/2}F_1$  (6,835 ГГц) основного состояния D1 линии рубидия-87 на  $\lambda=795$  нм [10]. Однако, поскольку вклад в образование КПН резонанса вносят только те частоты, которые попадают в спектр оптических переходов, отношение сигнал/шум при наблюдении резонанса с оптической накачкой ФСЛ будет чрезвычайно низким, чем, по-видимому, объясняется отсутствие данных об успешных экспериментах в этом направлении.

Согласование ширины спектра с используемыми оптическими переходами может быть реализовано в диодном лазере с внешним резонатором (ДЛВР). При

многочастотном возбуждении (когда вклад в резонанс дают одновременно несколько пар компонент) подобным лазером зарегистрирована серия резонансов КПН при зеемановском расщеплении одного из сверхтонких подуровней основного состояния [11]. В этом случае, в отличие от классического резонанса КПН на частоте часового перехода  $f_0$  [3], резонанс наблюдается при совпадении частоты модуляции с частотным интервалом между зеемановскими подуровнями.

В представленной диссертации исследованы методы модуляции тока инжекции диодного лазера с внешним резонатором сверхвысокими (СВЧ, 3-30 ГГц) и очень высокими частотами (ОВЧ, 30-300 МГц). Также экспериментально продемонстрирована возможность регистрации резонансов КПН при возбуждении одновременно несколькими парами спектральных компонент («многочастотное возбуждение»). Использование ДЛВР, как было сказано выше, позволяет перейти к созданию комбинированного стандарта частоты оптического и СВЧ диапазонов.

**Целью** данной работы являлась разработка методов управления спектром излучения диодного лазера с внешним резонатором для возбуждения резонансов когерентного пленения населенности в рубидии-87.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1) Разработка и создание экспериментальной установки для исследования спектров излучения при модуляции тока инжекции диодного лазера с внешним резонатором.

2) Измерение амплитуд спектральных компонент при СВЧ модуляции тока инжекции диодного лазера.

3) Реализация многочастотного спектра излучения при ОВЧ модуляции и совместном действии СВЧ и ОВЧ модуляции тока инжекции диодного лазера.

4) Исследование влияния параметров модуляции на управление спектром излучения диодного лазера.

5) Регистрация резонансов КПН при СВЧ модуляции и совместном действии СВЧ и ОВЧ модуляции тока инжекции диодного лазера с внешним резонатором.

#### **Научная новизна:**

1. Установлено, что при ОВЧ модуляции тока инжекции диодного лазера с внешним резонатором на соседних модах возникают структуры компонент; положение выделенной компоненты определяется частотой соседней моды лазера;

2. Установлено, что при совместном действии СВЧ и ОВЧ модуляции тока инжекции диодного лазера с внешним резонатором частотный интервал между соответствующими компонентами структур на боковых полосах спектра определяется частотой СВЧ модуляции;

3. Зарегистрирована серия резонансов КПН при многочастотном возбуждении несколькими парами спектральных компонент диодного лазера с внешним резонатором.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. ОВЧ модуляция тока инжекции диодного лазера приводит к возникновению многочастотного спектра вблизи соседних мод внешнего резонатора.

2. Совместное действие СВЧ и ОВЧ модуляции тока инжекции приводит к возникновению на боковых полосах спектра структуры компонент, разделенных на частоту ОВЧ модуляции. Положение выделенной компоненты структуры относительно несущей определяется частотой СВЧ модуляции.

3. При прохождении излучения диодного лазера с внешним резонатором, ток инжекции которого модулируется СВЧ и ОВЧ сигналами, через ячейку с рубидием-87 на частотах модуляции ( $f_0/2 \pm n f_{ОВЧ}/2$ ) формируется серия резонансов КПН, каждый из которых образован одновременно несколькими парами оптических частот, разнесенных на частоту часового перехода.

### **Методология и методы исследования**

Экспериментальные исследования спектров излучения диодного лазера проведены на базе экспериментальных и опытных установок, разработанных соискателем в ЦКП «Оптические и лазерные технологии».

Расчеты и обработка экспериментальных данных выполнены с помощью математического пакета Matlab.

### **Практическая значимость работы**

Продемонстрировано, что использование экспериментально записанной функции пропускания интерферометра Фабри-Перо позволяет повысить точность обработки спектров, состоящих из нескольких компонент;

Экспериментально показано, что увеличение тока инжекции диодного лазера приводит к сглаживанию зависимости амплитуд боковых компонент спектра от частоты СВЧ модуляции;

Показано, что использование комбинированной СВЧ и ОВЧ модуляции позволяет управлять отношением амплитуд боковых полос спектра, что может привести к уменьшению световых сдвигов.

### **Апробация результатов работы**

Промежуточные результаты работы докладывались на ряде международных конференций: Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП) 2016, 2018, 2021, Новосибирск; Modern Problem of Laser Physics (MPLP) 2016, 2018, 2021, Новосибирск; International Conference on lasers and electro-optics Europe & European quantum electronics conference (CLEO/Europe-EQEC) 2019, Мюнхен, Германия; International Conference of Laser Optics (ICLO) 2018, Санкт-Петербург; Симпозиум Метрология времени и пространства 2021, Менделеево, Московская область; International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) 2022, Эрлагол, Республика Алтай.

Представленные в диссертации результаты были поддержаны рядом грантов:

- «Стабилизация фемтосекундного стандарта частоты с когерентным сложением импульсов» (РФФИ, №18-02-00316, 2018-2020 гг.);
- «Фемтосекундная интерферометрия» (государственное задание № 3.6835.2017/БЧ, 2017-2019 гг.);
- «Прецизионные методы и средства оптического и СВЧ диапазонов» (государственное задание №FSUN-2020-0007, 2020-2022 гг.);

Диссертант являлся руководителем научного проекта №С22-21 «Влияние параметров модуляции диодного лазера на характеристики серии КПН резонансов» (2022г), выполненного в рамках реализации программы развития Новосибирского государственного технического университета.

**Достоверность результатов** обеспечивается применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных. Положения, выносимые на защиту, сформулированные автором, обоснованы теоретически и подтверждены данными экспериментов.

#### **Личный вклад**

Все экспериментальные результаты, представленные в работе, получены самим автором, либо при его непосредственном участии. Подготовка публикаций проводилась совместно с другими соавторами, при этом вклад диссертанта был определяющим. Постановка целей и задач, а также анализ полученных экспериментальных результатов осуществлялась совместно с научным руководителем.

#### **Публикации**

Основные результаты диссертации содержатся в 24 работах. Из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ) – 7, опубликованных в научных журналах, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science – 2, в сборниках тезисов докладов международных конференций – 12, из которых 6 индексируются базами Scopus и/или Web of Science. Также диссертантом получен 1 патент на изобретение.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Объем диссертационной работы – 115 страниц, в том числе рисунков – 56.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит общую характеристику работы, обзор литературных данных по теме исследования, сведения об актуальности темы исследования, научную новизну, цели и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводятся результаты исследования характеристик излучения используемого диодного лазера с внешним резонатором. Приведены зависимости длины волны от тока инжекции и напряжения на пьезокерамике внешнего резонатора. На основании полученных данных сформулированы способы грубой (током инжекции) и плавной (напряжением на пьезокерамике) перестройки оптической частоты излучения. Также описаны измерения ширины линии с помощью преобразования Фурье для сигнала биений с гетеродинным лазером. В результате спектральная ширина излучения исследуемого лазера оценена в 50 кГц. Экспериментально получена зависимость мощности излучения исследуемого лазера от тока инжекции. Это позволило определить пороговое значение тока (50 мА) и коэффициент наклона зависимости (1 мВт/мА).

**Во второй главе** приводятся результаты исследований спектра излучения при СВЧ модуляции тока инжекции.

Предварительно описываются физические принципы регистрации КПН резонансов при СВЧ модуляции излучения. Также рассматриваются методы оптического возбуждения с помощью различных типов лазеров, таких как VCSEL и ДЛВР.

Затем описан разработанный соискателем метод обработки составных спектров излучения лазера с помощью экспериментально записанной формы пропускания сканируемого интерферометра Фабри-Перо, позволяющий снизить погрешность обработки примерно на порядок по сравнению с использованием широко известной формулы Эйри. С помощью разработанного метода получены зависимости амплитуд спектральных компонент от частоты СВЧ модуляции при различных токах инжекции (рисунки 1 и 2).

При токе 52 мА наблюдается скачок амплитуды с уровня 0.01 до 0.08 и затем до 0.05, при этом он происходит в узком диапазоне частот модуляции  $\sim 0.16$  ГГц. При выходе на “полку” эффективной модуляции в диапазоне от 3,32 до 3,62 ГГц абсолютная величина боковых компонент остаётся низкой, что фактически может быть недостаточным для экспериментального наблюдения резонанса КПН, который требователен к интенсивности. Также наблюдаются явные осцилляции компонент до и после “полки”. С увеличением силы тока накачки размах скачков амплитуд компонент существенно падает.

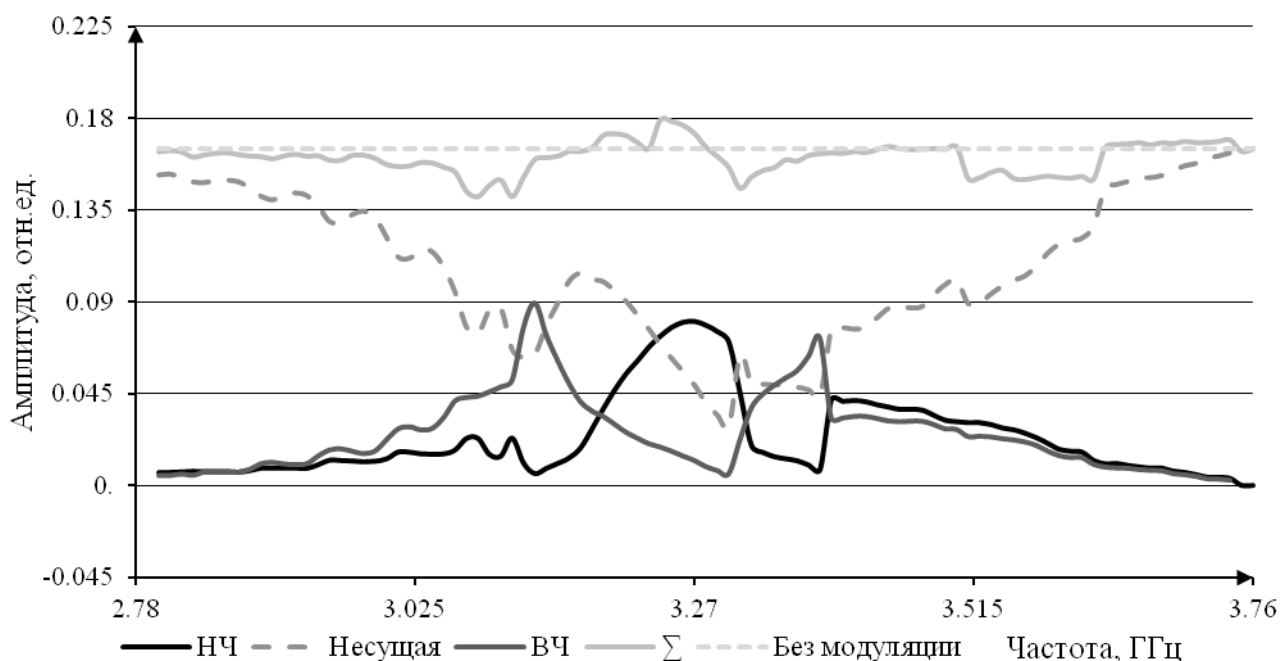


Рисунок 1 – Зависимость амплитуд компонент от частоты СВЧ модуляции при токе инжекции 52 мА.

При силе тока 67 мА виден практически гладкий контур эффективной модуляции шириной ~0,5 ГГц.

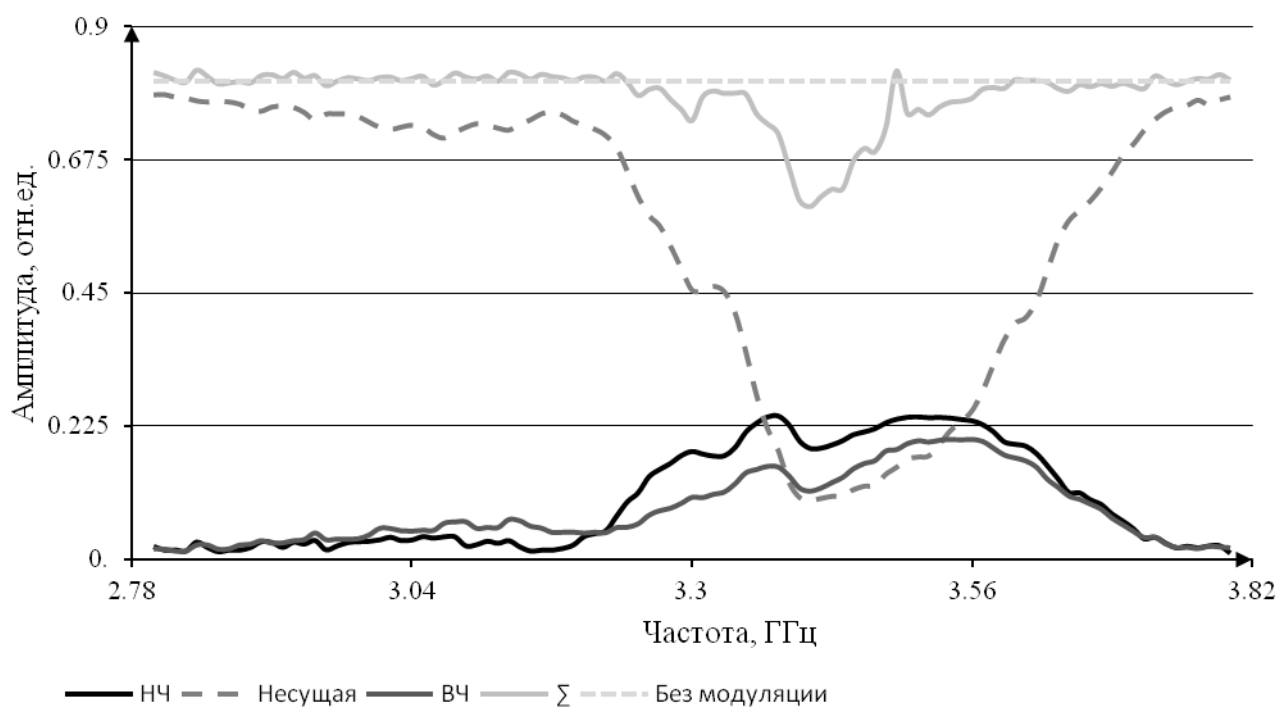


Рисунок 2 – Зависимость амплитуд компонент от частоты СВЧ модуляции при токе инжекции 67 мА.

Два провала в зависимости на частотах 3,33 ГГц и 3,41 ГГц отличаются от максимального значения примерно на 22% и в абсолютных значениях остаются



высокими. То есть, на необходимой для возбуждения частоте модуляции 3,42 ГГц уровень интенсивности будет, скорее, достаточным для регистрации резонансов КПН. Стоит заметить, что максимальная интенсивность боковых компонент первого порядка достигается при частоте модуляции 3,51 ГГц, что говорит о недостаточном согласовании длины резонатора с половиной частоты часового перехода  $f_0/2$ . Длина резонатора в этом случае равна примерно 43 мм, однако из-за сложности задачи изменения на 1 мм и достаточной интенсивности боковых полос на частоте  $f_0/2$  исследования выполнялись при описанной выше длине.

В завершение главы приводятся результаты по регистрации резонансов КПН при возбуждении СВЧ-модулированным излучением диодного лазера. При модуляции частотой  $f_0/2$  в ячейке с рубидием-87 зарегистрирован резонанс КПН с шириной около 2,68 кГц (рисунок 3). С помощью добавления внешнего магнитного поля было устранено влияние магнитозависимых резонансов на «центральный». Некоторая асимметрия резонанса является одним из свойств этого явления [12] и не связана с точностью регистрации, поскольку и на растущем, и на падающем склоне сканирующего сигнала круче оказывается высокочастотный склон резонанса.

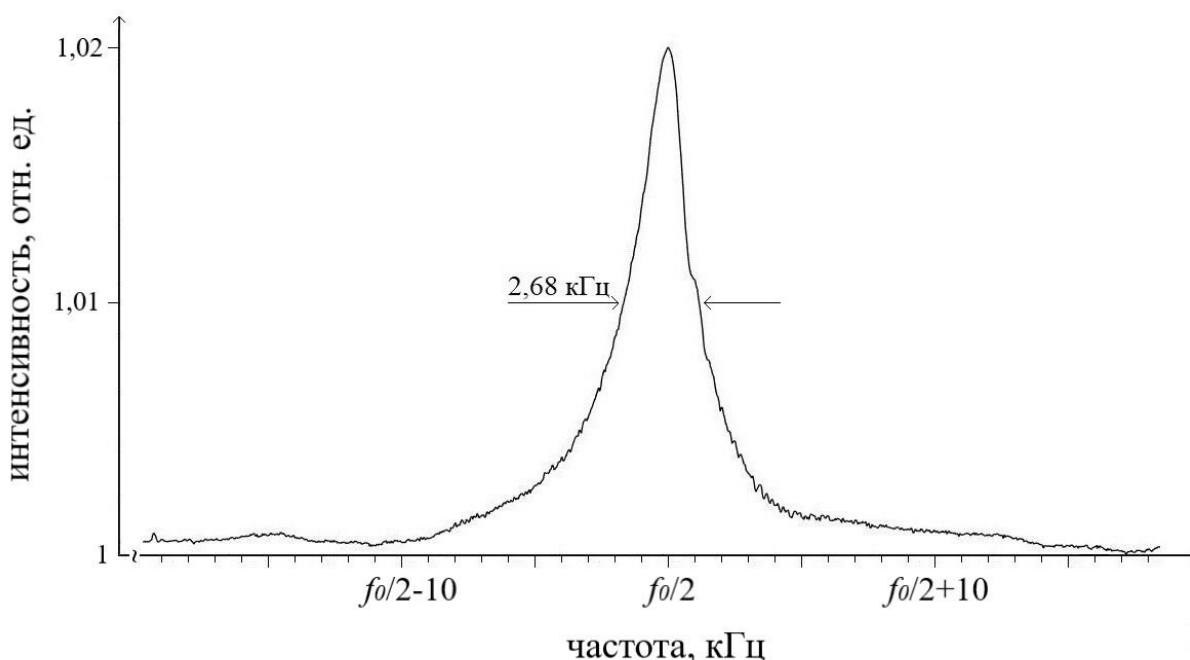


Рисунок 3 – КПН резонанс при сканировании частоты СВЧ модуляции вблизи 3,417 ГГц.

**В третьей главе** приведены результаты исследования спектров излучения ДЛВР при модуляции тока инжекции ОВЧ сигналами. Использование частот данного диапазона для модуляции позволяет получить структуру из ОВЧ компонент на различных полосах спектра («тонкую структуру»), что может быть использовано для многочастотного возбуждения резонансов КПН.

В первом разделе главы описываются физические принципы многочастотного оптического возбуждения резонансов КПН и существующие методы снижения светового сдвига. Утверждается, что суммарный световой сдвиг при многочастотном возбуждении определяется по формуле [13]:

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_n \Delta_n, \quad \Delta_n = \Omega_n (\kappa_n - \kappa_{n-q}), \quad (1)$$

где  $\Omega$  – отстройка от середины верхнего уровня,  $\kappa$  – параметр насыщения, а  $n$  и  $n-q$  – номера ОВЧ компонент на низкочастотной и высокочастотной боковых полосах первого порядка соответственной. При увеличении числа компонент световой сдвиг будет меньше, поскольку в сумму будут входить члены с разными знаками, т.к.  $\Omega_n$  отсчитывается от середины 3 уровня и будет принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Для исследования тонкой структуры на боковых полосах спектра был записан сигнал биений с гетеродинным лазером при ОВЧ модуляции тока инжекции набором частот, полученных от целочисленного деления часовой частоты  $f_0$  (34 МГц, 68 МГц, 85 МГц, 100 МГц). Исследования показали, что при ОВЧ модуляции амплитудой свыше 2 мА на соседних модах возникает генерация. Это можно объяснить следующими соображениями. При включении ОВЧ модуляции на несущей полосе формируется серия компонент. Амплитуда каждой из ОВЧ компонент существенно меньше, чем амплитуда несущей в отсутствие модуляции, поэтому инверсия заселенности снимается в меньшей степени. Это приводит к тому, что на соседних модах в этом случае усиление превышает потери и возникает генерация.

Экспериментально показано, что амплитуды компонент тонкой структуры спектра пропорциональны амплитуде огибающих. Поэтому предложено было ограничиться рассмотрением огибающих спектра, записанных с помощью сканируемого интерферометра Фабри-Перо. Поскольку для снижения световых сдвигов резонансов КПН требуется равенство боковых полос, дающих вклад в накачку, было построено отношение амплитуд боковых полос при различных параметрах модуляции (рисунок 4).

Видно, что при любом из представленных значений частоты ОВЧ модуляции достигается равенство амплитуд боковых полос. Случай модуляции частотой 85 МГц рассмотрен в диссертации отдельно, равенство амплитуд боковых полос достигается при модуляции амплитудой 6,4 мА.

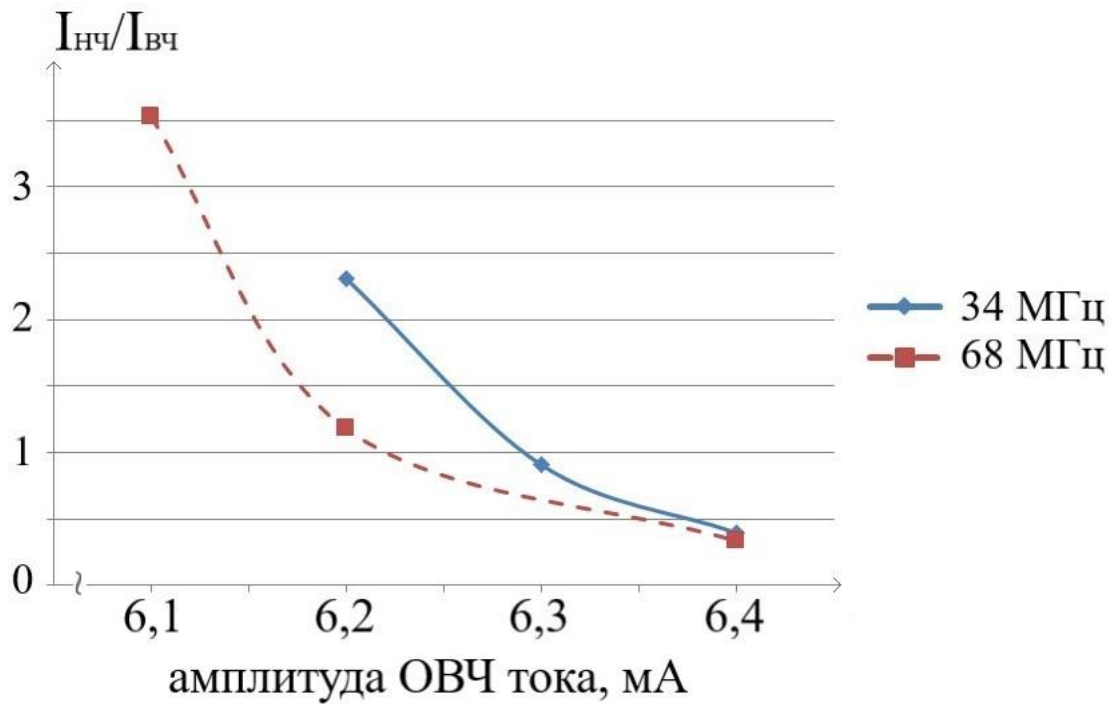


Рисунок 4 – Зависимость отношения амплитуд НЧ и ВЧ боковых полос спектра от амплитуды модулирующего сигнала.

Также в этой главе исследуется механизм управления положением спектральных компонент при ОВЧ модуляции тока инжекции. Было высказано предположение, что положение спектральных компонент, как и в случае фемтосекундного лазера [13], описывается формулой:

$$\omega_m = m * f_{mod} + f_1, \quad (2)$$

где  $f_{mod}$  – частота модуляции,  $f_1$  – частота смещения,  $m$  – целое число. Согласно формуле (2) для частот модуляции 100 МГц и 101,5 МГц компонента с номером  $m = 34$  (центр боковых полос) будет смещена на 51 МГц. Была проведена серия экспериментов, в которой записывались структуры спектра на боковых полосах при изменении частоты модуляции от 100 МГц к 101,5 МГц и обратно. Пример записи приведен на рисунке 5.

Установлено, что интервал между ОВЧ компонентами на боковых полосах с учетом погрешности изменяется на величину менее 20 МГц, что не согласуется с формулой (2). Это позволяет сделать вывод о том, что частота ОВЧ модуляции напрямую не влияет на интервалы между ОВЧ компонентами на различных полосах спектра. Экспериментально измеренное отношение интервалов между компонентами спектра для низкочастотной и высокочастотной полос составило  $1.018 \pm 0.005$ , что, как и следовало ожидать, согласуется с отношением частот модуляции (1.015).

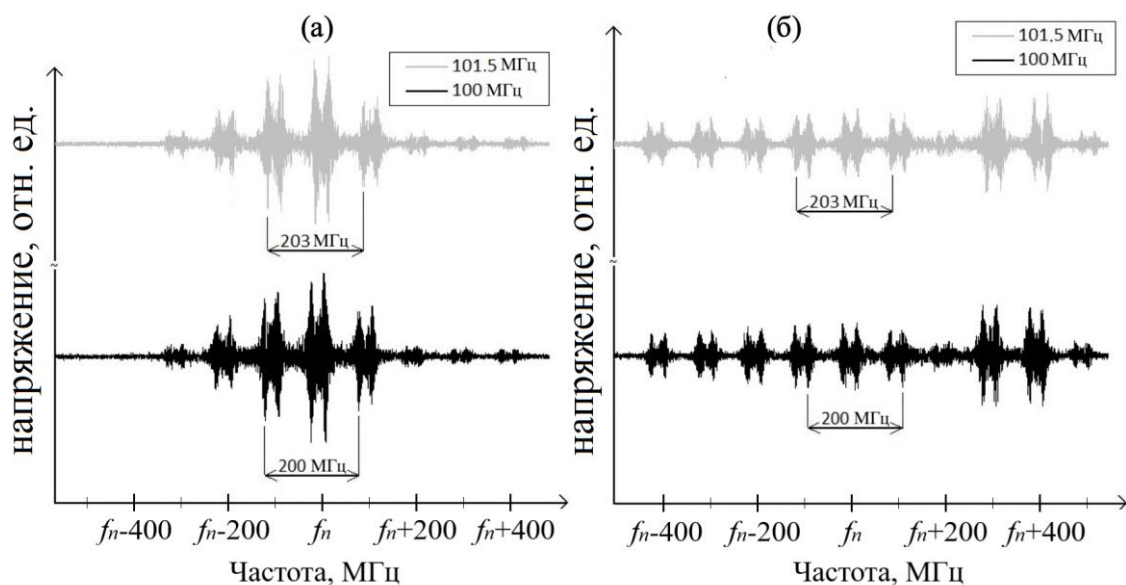


Рисунок 5 – Биения на НЧ (а) и ВЧ (б) боковых полосах спектра при ОВЧ модуляции с частотами 100 и 101,5 МГц.  $f_n$  – частота полосы.

Для того чтобы выяснить связь между тонкими структурами на различных полосах спектра излучения лазера при ОВЧ модуляции, были записаны биения исследуемого и гетеродинного лазеров на боковых полосах в широком диапазоне частот модуляции (рисунок 6).

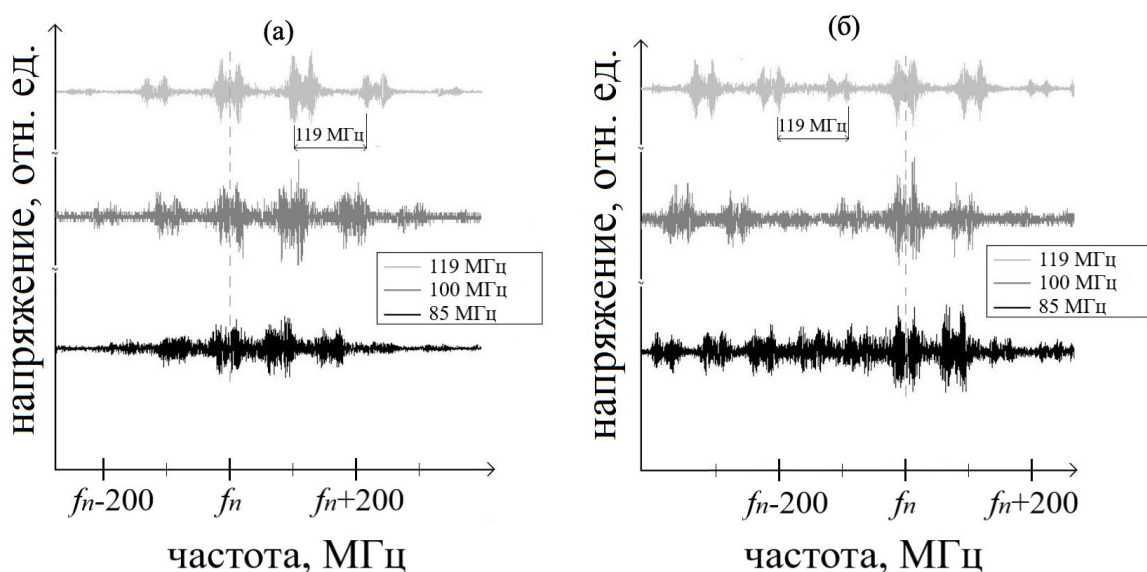


Рисунок 6 – Биения на НЧ (а) и ВЧ (б) полосах при различных частотах ОВЧ модуляции.  $f_n$  – частота полосы.

Экспериментально показано, что положение одной из ОВЧ компонент, которую можно считать «центральной», на каждой из боковых полос остается неизменным (пунктирная линия на рисунке 6) с погрешностью  $\pm 5$  МГц, в то время как интервалы между ОВЧ компонентами, как и предполагалось, определяются частотой модуляции. Погрешность измерений связана с флуктуациями и тепловым

дрейфом длины внешнего резонатора лазера. Такая ситуация возможна, когда ОВЧ структура формируется вокруг определенных мод резонатора. При этом управление положением ОВЧ структуры на боковых полосах спектра возможно за счет изменения длины резонатора, что накладывает существенные ограничения на возможность управления спектром и регистрацию КПН резонансов, поскольку требуется внесение изменений в конструкцию лазера.

**Четвертая глава** посвящена исследованию спектра излучения при совместном действии СВЧ и ОВЧ модуляции тока инжекции.

Приводятся результаты регистрации тонкой структуры и огибающих спектра при различных параметрах СВЧ и ОВЧ модуляции. На рисунке 7 приведены спектры излучения исследуемого лазера при токе инжекции 56 мА, СВЧ модуляции амплитудой 28,2 мА на частоте 3,4 ГГц для различных амплитуд ОВЧ сигнала на частоте 68 МГц.

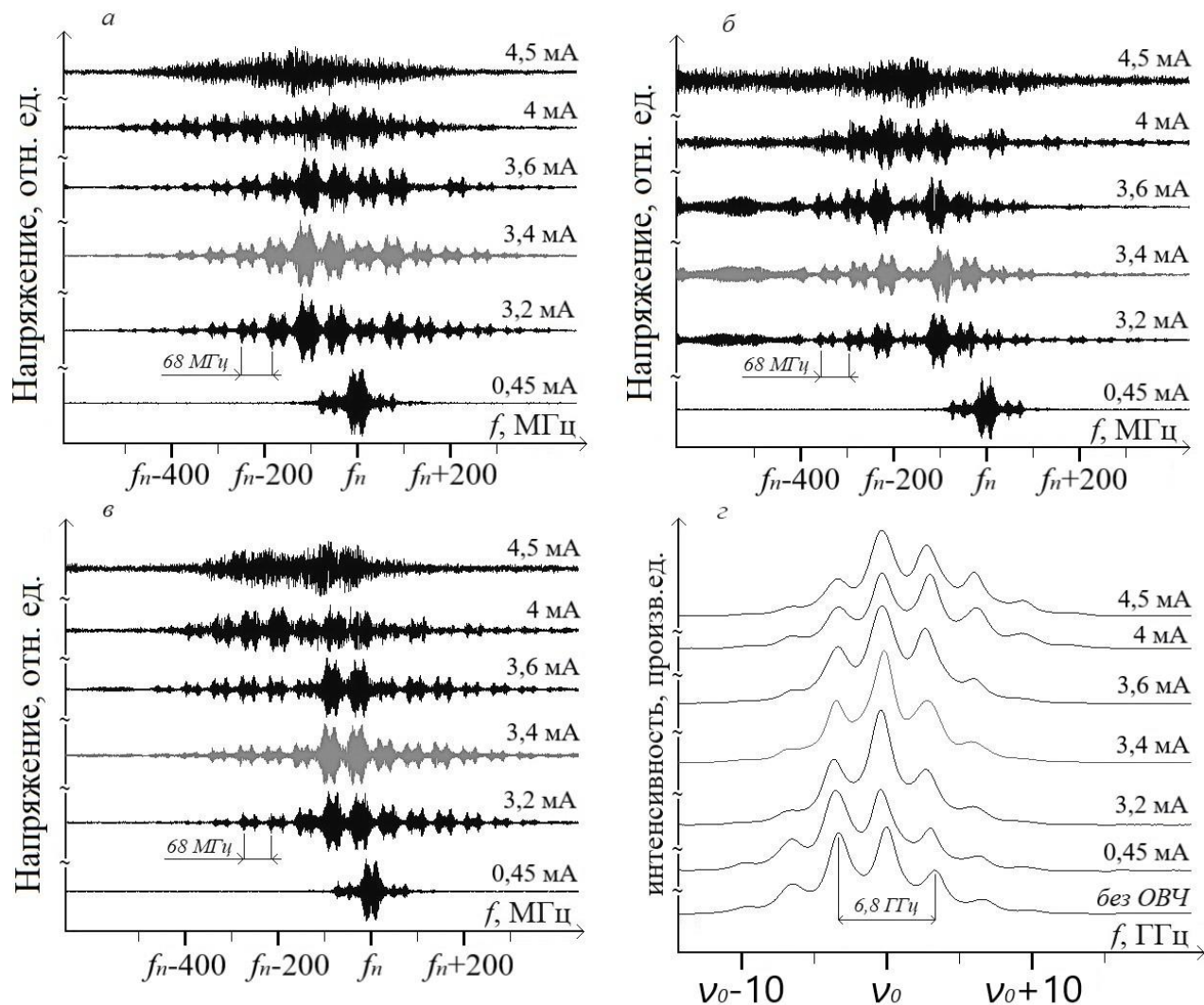


Рисунок 7 – Спектры излучения исследуемого лазера при токе инжекции 56 мА с одновременной СВЧ (на частоте 3,4 ГГц и амплитудой 28,2 мА) и ОВЧ (на частоте 68 МГц) модуляцией; а, б, в – записи ВЧ структуры для низкочастотной, высокочастотной и центральной спектральных полос соответственно; г – спектр интенсивности излучения,

записанный с помощью сканируемого интерферометра Фабри-Перо.  $f_n$  – частота полосы,  $\nu_0$  – оптическая частота лазера в отсутствие модуляции.

При токах инжекции 53 мА и 54 мА тонкая структура наблюдается при слабых ОВЧ сигналах. Однако еще до достижения равенства амплитуд боковых СВЧ полос структура размывается.

В этой же главе, по аналогии с предыдущей, рассматривается механизм управления спектром с помощью изменения параметров ОВЧ и СВЧ модуляции.

По записи тонкой структуры на боковых полосах спектра с помощью гетеродинного лазера (рисунок 8) отчетливо видно, что при изменении частоты ОВЧ модуляции положение одной из компонент остается неизменным и совпадает с компонентой, наблюдаемой в отсутствие ОВЧ модуляции.

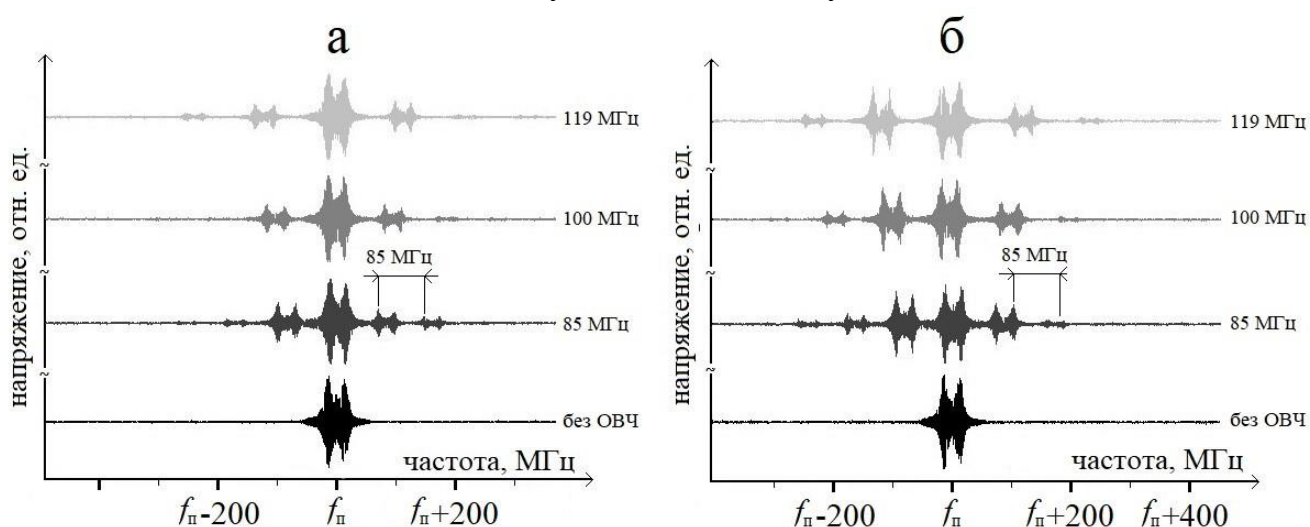


Рисунок 8 – Тонкая структура спектра излучения лазера при СВЧ модуляции частотой 3,4 ГГц и амплитудой 40 мВт (кривая 1) и при совместном действии ОВЧ модуляции амплитудой 0,32 мВт и частотой: 2 – 85 МГц, 3 – 100 МГц, 4 – 119 МГц на НЧ (а) и ВЧ (б) боковых полосах спектра.  $f_n$  – частота полосы.

Интервалы между остальными компонентами структуры, как и ожидалось, определяются частотой ОВЧ модуляции. Это позволяет сделать вывод о том, что частота ОВЧ модуляции не влияет на положение структуры, наблюдаемой на боковых полосах.

Обнаружено, что изменение амплитуды ОВЧ модуляции приводит к сдвигу тонких структур спектра на НЧ и ВЧ полосах, что позволяет сказать об изменении оптической частоты излучения. При погрешности измерений в 10 МГц экспериментально измеренный сдвиг составил 45 МГц/мВт, в то время как частотный интервал между боковыми полосами остается неизменным.

Затем описывается серия экспериментов, в которой было выполнено изменение частоты СВЧ сигнала от 3,40 ГГц к 3,45 ГГц при неизменных параметрах ОВЧ модуляции. Пример подобной записи приведен на рисунке 9.

В результате обнаружено, что положение несущей компоненты остается практически неизменным, тогда как НЧ полоса смещается на величину  $-50 \pm 5$  МГц, а ВЧ полоса – на  $50 \pm 5$  МГц. Т.е. интервал между боковыми полосами спектра, как и следовало ожидать, изменяется на 100 МГц. Это свидетельствует о том, что при совместном действии СВЧ и СВЧ модуляции интервал между боковыми полосами управляется частотой СВЧ сигнала.

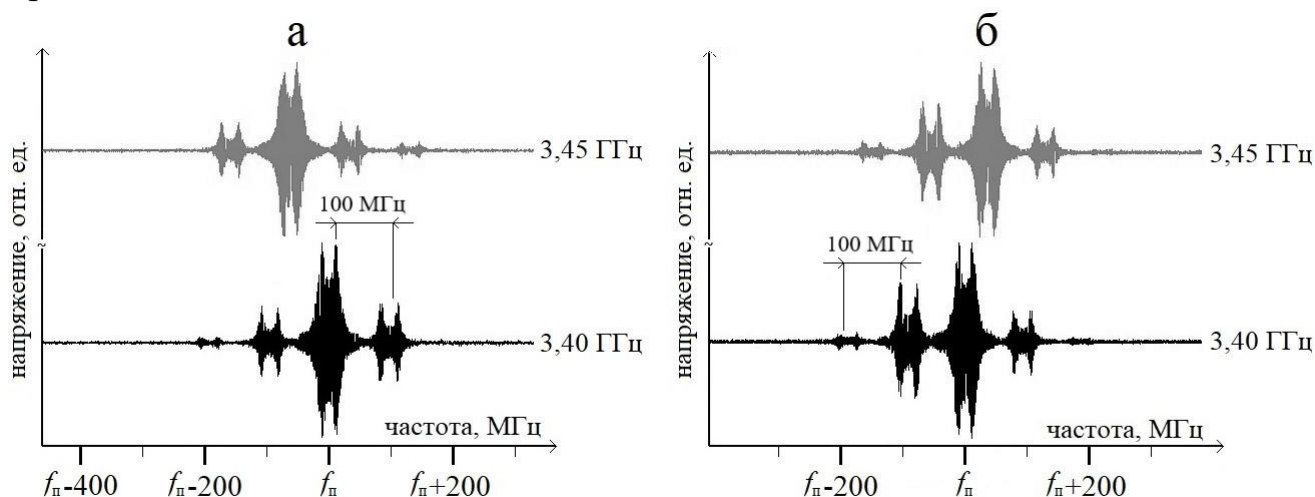


Рисунок 9 – Положение структуры при изменении частоты СВЧ модуляции амплитудой 40 мВт от 3,4 ГГц (кривая 1) к 3,45 ГГц (кривая 2) и совместном действии ВЧ модуляции частотой 100 МГц и амплитудой 0,1 мВт на НЧ (а) и ВЧ (б) боковых полосах спектра.  $f_n$  – частота полосы.

Стоит отметить, что при других наборах параметров смещается оптическая частота излучения, а структуры на НЧ и ВЧ полосах спектра могут смещаться на различные величины, но интервал между ними всегда изменяется на величину в пределах погрешности в 10 МГц, равную удвоенному изменению частоты СВЧ модуляции.

Изменение амплитуды СВЧ модуляции от 8,9 до 28,2 мА в пределах погрешности не приводит к изменению положения структур на боковых и несущей полосах спектра. Амплитуда как огибающих спектра, так и тонких компонент СВЧ структуры на боковых полосах, как и следовало ожидать, напрямую зависят от мощности СВЧ модуляции.

На основании экспериментальных данных сформулирован вывод, что положение структуры задается частотой СВЧ модуляции. СВЧ модуляция в этом случае определяет амплитуду и число СВЧ компонент и практически не влияет на их положение. А значит, при совместном действии СВЧ и СВЧ модуляции положением структуры можно управлять не только изменением длины резонатора, но и изменением частоты СВЧ модуляции, что существенно упрощает этот процесс. Для случая совместной СВЧ (3,4 ГГц) и СВЧ (68 МГц) было исследовано отношение амплитуд боковых полос и показано, что практически возможно достичь значения от 0,53 до 1,4. Практически это может быть использовано для

снижения световых сдвигов, поскольку известно, что при определенном отношении амплитуд полос спектра возможно достижение нулевых световых сдвигов [14].

В завершение главы описывается эксперимент по регистрации КПН резонанса при совместном действии СВЧ (3,417 ГГц) и ОВЧ (68 МГц) модуляции для случая равных интенсивностей боковых полос спектра. В этом случае возбуждение резонанса осуществляется сразу несколькими парами ОВЧ компонент на боковых полосах спектра. В результате был зарегистрирован КПН резонанс шириной около 2,7 кГц (рисунок 9).

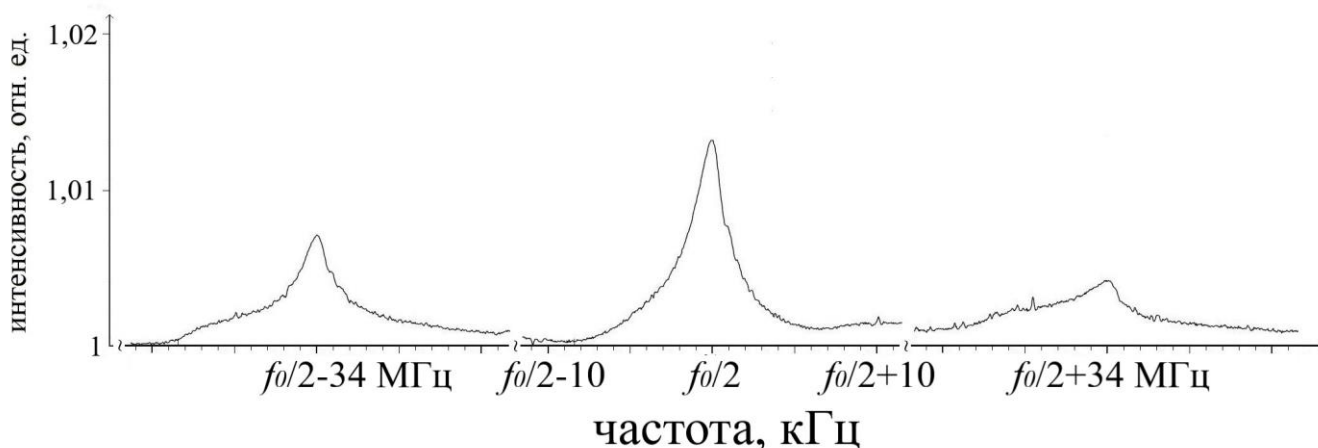


Рисунок 9 – Серия резонансов КПН при совместном действии СВЧ (3,417 ГГц) и ОВЧ модуляции (68 МГц).  $f_0$  – частота часового перехода; сигнал нормирован на значение амплитуды резонанса в отсутствие ОВЧ модуляции.

Справедливость механизма многочастотного возбуждения подтверждает наличие боковых резонансов, отстоящих от исследуемого на половину частоты ОВЧ модуляции (34 МГц).

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

Обнаружена осциллирующая зависимость амплитуды спектральных компонент от частоты СВЧ модуляции, причем увеличение тока инжекции приводит к снижению глубины осцилляций.

При ОВЧ модуляции тока инжекции диодного лазера зарегистрирована генерация на соседних от несущей модах. На боковых полосах спектра обнаружена разрешенная структура, а также установлено, что интервал между компонентами на различных полосах спектра в этом случае определяется длиной резонатора лазера.

Установлено, что при совместном действии СВЧ и ОВЧ модуляции положение структур на боковых полосах спектра определяется частотой СВЧ модуляции, а также, что изменение амплитуды ОВЧ модуляции позволяет управлять амплитудой боковых спектральных компонент.



При использовании многочастотного излучения зарегистрирована серия резонансов КПН, отстоящих друг от друга на половину частоты ОВЧ модуляции, что подтверждает справедливость механизма многочастотного возбуждения.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Савинов К. Н. КПН-резонансы при многочастотной оптической накачке / **К. Н. Савинов**, Н. Н. Головин, А. К. Дмитриев // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – №10. – С. 939–942.
2. Савинов К. Н. Спектр излучения диодного лазера с внешним резонатором при совместном действии СВЧ- и ОВЧ-модуляции тока инжекции = / **К. Н. Савинов**, А. К. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2021. – Т. 64. – №12. – С. 122-126.

*Переводная версия:* Savinov K. N. Emission spectrum of an external cavity diode laser under the combined action of microwave and VHF modulation of the injection current **K. N. Savinov**, A. K. Dmitriev // Russian Physics Journal. – 2022. – V. 64. – N 12. – P. 2310-2314. (проиндексирована в **Scopus** и в **Web of Science Core Collection**)

3. Савинов К. Н. КПН-резонансы при многочастотной накачке / **К. Н. Савинов**, А. К. Дмитриев, А. В. Кривецкий // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – №2. – С. 116-118.

*Переводная версия:* Savinov K. N. CPT resonances under multifrequency pumping / **K. N. Savinov**, A. K. Dmitriev, A. V. Krivetskii // Quantum Electronics. – 2022. – V. 52. – N 2. – P. 116-118. (проиндексирована в **Scopus** и в **Web of Science Core Collection**)

4. Савинов К. Н. Управление спектром излучения диодного лазера при ОВЧ-модуляции тока инжекции / **К. Н. Савинов**, А. К. Дмитриев, А. А. Рундау // Оптика и спектроскопия. – 2021. – т. 129. – №6. – С. 760-763.

*Переводная версия:* Savinov K. N. Control of Emission Spectrum of a Diode Laser under VHF Modulation of Injection Current / **K. N. Savinov**, A. K. Dmitriev, A. A. Rundau // Optics and Spectroscopy. – 2021. – Vol. 129. – N 7. – p. 821-824. (проиндексирована в **Scopus** и в **Web of Science Core Collection**)

5. Исакова А. А. Комбинированная СВЧ- и ВЧ-модуляция тока инжекции диодного лазера для многочастотной накачки КПН-резонансов / А. А. Исакова, **К. Н. Савинов**, Н. Н. Головин, К. М. Сабакарь, А. К. Дмитриев, А. А. Рундау // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. – Т. 63. – № 1. – С. 154–158.

*Переводная версия:* Isakova A.A. Combined microwave and high-frequency modulation of the injection current of a diode laser for multiple-frequency excitation of CPT-resonances / A. A. Isakova, **K. N. Savinov**, N. N. Golovin, K. M. Sabakar, A. K. Dmitriev, A. A. Rundau // Russian Physics Journal. – 2020. – V. 63. – Issue 1. – Pp. 171–175. (проиндексирована в **Scopus** и в **Web of Science Core Collection**)

6. Исакова А. А. Мультичастотный источник накачки КПН-резонансов на основе диодного лазера с внешним резонатором = / А. А. Исакова, Н. Н. Головин, **К. Н. Савинов**, А. К. Дмитриев // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49. – №6. – С. 600-603.

*Переводная версия:* Isakova A.A. Multifrequency source for pumping CPT-resonances based on an external cavity diode laser / A. A. Isakova, N. N. Golovin, **K. N. Savinov**, A. K. Dmitriev // Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 49. – N 6. – P. 600-603. (проиндексирована в **Scopus** и в **Web of Science Core Collection**)

7. Исакова А. А. Особенности режимов генерации полупроводникового лазера с внешним резонатором при СВЧ модуляции / А.А. Исакова, **К. Н. Савинов**, Н. Н. Головин, Н. Ж. Алтынбеков, В. И. Вишняков, А. К. Дмитриев // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – № 7. – С. 610–613.

*Переводная версия:* Isakova A.A. Specific features of oscillation regimes of an external cavity diode laser under microwave modulation / A. A. Isakova, **K. N. Savinov**, N. N. Golovin, N. Zh. Altynbekov, A. K. Dmitriev, V. I. Vishnyakov // Quantum Electronics. – 2017. – Vol. 47. – Issue 7. – Pp. 610–613. (проиндексирована в **Scopus** и в **Web of Science Core Collection**)

*Публикации в сборниках материалов конференций, индексируемых в международных реферативных базах:*

8. Savinov K. N. Series of CPT Resonances with Multifrequency Pumping by a Diode Laser / **K. N. Savinov**, N. N. Golovin, I. D. Dneprovsky, A. K. Dmitriev, D. M. Kotina // 23th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2022, Erlagol, 30 June – 4 July 2022: Conference Proceedings. – Erlagol, 2022. – P. 338-341. (проиндексирована в **Scopus**)
9. Savinov K. N. Emission Spectrum of a Diode Laser with Microwave Modulation of the Injection Current / **K. N. Savinov**, K. M. Sabakar, N. N. Golovin, A. K. Dmitriev // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2021): proc. of the 15 intern. sci. and techn. conf., Novosibirsk, 19–21 Nov. 2021. – Novosibirsk: Publ. NSTU, 2021. – P. 712-715. (проиндексирована в **Scopus**)
10. Isakova A. A. Multi-frequency diode laser for pumping CPT resonances / A. A. Isakova, **K. N. Savinov**, A. K. Dmitriev // Conference on lasers and electro-optics Europe & European quantum electronics conference (CLEO/Europe-EQEC): [proc.],

Germany, Munich, 23–27 June 2019. – [USA]: IEEE, 2019. – P. 8872664.  
(проиндексирована в **Scopus**)

*Патенты изобретения и полезные модели в РФ:*

11. Способ измерения спектра излучения [текст]: патент № 2756483 / **К. Н. Савинов**, Н. Н. Головин, А. К. Дмитриев/ – Заявл. 12.02.2021; опубл. 30.09.2021. – Бюл. №28.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maleki L. Applications of clocks and frequency standards: from the routine to tests of fundamental models / L. Maleki, J. Prestage // *Metrologia*. – 2005. – Vol. 42, N 3. – S145-S153.
2. Ludlow A. D. Optical atomic clocks / A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik, P. O. Schmidt // *Rev. Mod. Phys.* – 2015. – Vol. 87, N 2. –P. 637-701 (2015).
3. Arimondo E. Nonabsorbing atomic coherences by coherent two-photon transitions in a three-level optical pumping / E. Arimondo, G. Orriols // *Lettere al Nuovo Cimento*. – 1976. – Vol. 17. – P. 333-338.
4. Alzetta G. An experimental method for the observation of r.f. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour / G. Alzetta, A. Gozzini, M. Moi, G. Orriols // *Il Nuovo Cimento B*. – 1976. – Vol. 36. – P. 5-20.
5. Хрипунов С. А. Переходные процессы при динамическом возбуждении резонанса когерентного пленения населенностей / С. А. Хрипунов, Д. А. Раднатаров, С. М. Кобцев, В. И. Юдин, А. В. Тайченачев, М. Ю. Басалаев, М. В. Балабас, В. А. Андрюшков, И. Д. Попков // *Квантовая электроника*. - 2016. - т. 46, №7. - С. 668-671.
6. ДЕРЕБЕЗОВ И.А. Одномодовые лазеры с вертикальным резонатором для миниатюрного атомного эталона частоты на основе атомов Rb87 / И. А. ДЕРЕБЕЗОВ, В. А. ГАЙСЛЕР, А. К. БАКАРОВ, А. К. КАЛАГИН, А. И. ТОРОПОВ, М. М. КАЧАНОВА, Т. А. ГАВРИЛОВА, О. И. СЕМЕНОВА, Д. Б. ТРЕТЬЯКОВ, И. И. БЕТЕРОВ, В. М. ЭНТИН, И. И. РЯБЦЕВ // *Физика и техника полупроводников*. – 2010. – Т. 44, №11. – С. 1470-1474.
7. Khripunov S. Atomic clock based on a coherent population trapping resonance in 87Rb with improved high-frequency modulation parameters / S. Khripunov, D. Radnatarov, S. Kobtsev // *Proc. SPIE 9378, Slow Light, Fast Light, and Opto-Atomic Precision Metrology VIII*. – 2015. – Vol. 9378. – P.93780A-1-6.
8. Ignatovich S. M. Light shifts in the rubidium CPT atomic clock with laser current modulation at 3.4 and 6.8 GHz / S. M. Ignatovich, I. S. Mesenzova, M. N. Skvortsov, N. L. Kvashnin, V. I. Vishnyakov // *Journal of Physics: Conference Series*. – V. 2067, N 012006. – P. 1-10.

9. Kitching J. A Microwave Frequency Reference Based on VCSEL-Driven Dark Line Resonances in Cs Vapor / J. Kitching, S. Knappe, N. Vukicevic, L. Hollberg, R. Wynands, W. Weidmann // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2000. – Vol. 49, N 6. – P. 1313-1317.
10. Baklanov E. V. Optical frequency standard based on the coherent population trapping resonance / E. V. Baklanov, A. K. Dmitriev // *Laser Physics*. – 2014. – Vol. 20, N 1. – P. 52-56.
11. Vladimirova Y.V. Frequency-modulation spectroscopy of coherent dark resonances in  $^{87}\text{Rb}$  atoms / Y. V. Vladimirova, V. N. Zadkov, A. V. Akimov, A. Y. Samokotin, A. V. Sokolov, V. N. Sorokin, N. N. Kolachevsky // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2009. – Vol. 97, N 1. – P. 35-46.
12. Basalaev M. Yu. Dynamic Continuous-Wave Spectroscopy of Coherent Population Trapping at Phase-Jump Modulation // M. Yu. Basalaev, V.I. Yudin, A.V. Taichenachev, M.I. Vaskovskaya, D.S. Chuchelov, S.A. Zibrov, V.V. Vassiliev, and V.L. Velichansky // *Phys. Rev. Applied*. – 2020. – Vol. 13, N 3. – P. 034060-1-10.
13. Baklanov E. V. Optical frequency standard based on the coherent population trapping resonance / E. V. Baklanov, S. N. Bagaev, A. K. Dmitriev, A. V. Taichenachev, V. I. Yudin // *Laser Physics*. – 2014. – Vol. 24, N 074007. – P. 1-3.
14. Chuchelov D. S. Modulation spectroscopy of coherent population trapping resonance and light shifts / D. S. Chuchelov, V. V. Vassiliev, M. I. Vaskovskaya, V. L. Velichansky, E. A. Tsygankov, S. A. Zibrov, S. V. Petropavlovsky, V. P. Yakovlev // *Physica Scripta*. – 2018. – Vol. 93, N 11. – P. 114002-1-16.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20.

Тел./факс. (383) 346-08-57

формат 60×84/16, объем 1.25 п.л., тираж 100 экз.

заказ №

, подписано в печать

г.