

На правах рукописи



ЛУКИНА Анна Андреевна

ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ КОНВЕРСИЯ КАК МЕТОД СНИЖЕНИЯ  
ФАЗОВЫХ ШУМОВ АВТОГЕНЕРАТОРОВ СВЧ ДИАПАЗОНА С  
РЕЗОНАНСНОЙ СИСТЕМОЙ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

**Научный руководитель:** **Задорин Анатолий Семенович** доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и защиты информации (РЗИ) ТУСУР, г. Томск.

**Официальные оппоненты:** **Майстренко Василий Андреевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой средств связи и информационной безопасности ФГБОУ ВО «Омского государственного технического университета», г. Омск;  
**Евтушенко Геннадий Сергеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры промышленной и медицинской электроники ФГАОУ ВО «Национального исследовательского Томского политехнического университета», г. Томск.

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ», г. Казань.

Защита состоится «26» декабря 2017 г. в 9 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.268.01 на базе ТУСУР по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/805obzhj>

Автореферат разослан " \_\_ " ноябрь 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.212.268.01,  
доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Технологии генерации СВЧ-сигналов в настоящее время являются фундаментом для построения разнообразных приложений во многих научно-технических направлениях радиоэлектроники - беспроводной связи, специальных радиолокационных системах высокого разрешения, биологии, медицине и др. [1-4]. Независимо от характера использования таких сигналов их характеристики играют определяющую роль в качестве реализации конкретных приложений. Одной из наиболее важных характеристик такого рода является уровень фазового шума устройства, определяющий его спектральную чистоту. В качестве ее количественного показателя в литературе используется уровень фазовых шумов источников микроволн - автогенераторов (АГ), описываемый спектральной плотностью мощности его излучения  $L(f)$  в одной боковой полосе при заданной отстройке  $f$  от несущей частоты  $f_0$  в частотном интервале 1 Гц. [5].

Низкий уровень  $L(f)$  необходим для различных приложений. Например, в радиолокационной технике подавление фазовых флуктуаций должно обеспечиваться на частотах отстройки в диапазоне от десятков герц до десятков МГц. Так, смещение несущей частоты  $\sim 10$  ГГц, доплеровской РЛС, при регистрации отраженного сигнала от цели, движущейся в направлении радара со скоростью около  $\sim 500$  км/ч составляет всего  $\sim 10$  кГц. Очевидно, что для обнаружения цели в данных условиях необходимо, чтобы фазовый шум принимаемого сигнала на доплеровской частоте, т.е. уровень  $L(10 \text{ кГц.})$ , был на  $\sim 80$  дБ. ниже мощности неподвижного радиолокационного фона [6].

В других радиоэлектронных системах – системах передачи данных фазовый шум появляется во временной области в виде динамического дрожания - джиттера, оказывающего влияние на устойчивость синхронизации и уровень системных битовых ошибок. Поэтому для обеспечения высокой скорости передачи данных здесь также необходимо минимизировать фазовый шум на частотах отстройки  $f \sim$  нескольких кГц. [7].

Таким образом, СВЧ-автогенераторы с низким уровнем  $L(f)$  является важнейшим узлом различных радиотехнических систем. Поэтому актуальной задачей является поиск методов снижения  $L(f)$  СВЧ-АГ.

В простых схемах АГ, построенных на основе затягивания частоты формируемого сигнала высокочастотной резонансной системой (РС) в активной петле обратной связи (ОС), эта задача решается за счет высокой добротности РС. В СВЧ- диапазоне в качестве таковой находят применения диэлектрические, коаксиальные резонаторы, резонаторы на поверхностных и объемных акустических волнах и др. [2-4,7,8]. При этом наиболее высокая

спектральная чистота СВЧ-сигнала достигается с помощью сложных резонансных систем. Например, наименьший уровень  $L(1 \text{ Гц}) \sim 100 \text{ дБн/Гц}$  СВЧ- сигналов формируется в АГ с высокодобротными сапфировыми резонаторами, охлаждаемыми до сверхнизких температур [9]. Создание таких устройств требует сложной криогенной оснастки и др. дорогостоящего лабораторного оборудования.

Повышение рабочей частоты АГ также может быть достигнуто, например, на основе резонатора, построенного железо-иттриевого граната (YIG), резонансная частота которого в однородном магнитном поле является линейной функцией его напряженности. Недостатками такого YIG-АГ осциллятора являются большой вес, габариты, высокая потребляемая мощность и стоимость [2,3].

Таким образом, задача создания малошумящего, легкого и компактного АГ-СВЧ, совместимого с габаритами гибридной интегральной микросхемы сегодня остается актуальной и представляет собой серьезный вызов для разработчиков радиоаппаратуры. Наиболее значительные успехи в данной связи достигнуты фирмой OEwaves.. Основой ее технологической новацией явилось оптоэлектронная конверсия (от лат. *conversio* - «обращение», «превращение», «изменение»), т.е. промежуточное преобразования СВЧ сигналов радиодиапазона в соответствующие оптические сигналы, позволившее  $\sim$  на пять порядков сократить характерные размеры РС при сохранении ее добротности [10,11]. Используемые в данных разработках методы оптоэлектроники и радиофотоники, по мнению автора, по-прежнему сохраняют свой инновационный потенциал [11,12].

### **Цель работы**

Целью работы является исследование методов снижения уровня фазовых шумов и массогабаритных показателей автогенераторов СВЧ-диапазона с резонансной системой бегущей волны за счет применения оптоэлектронных преобразований, элементной базы и обработки сигналов.

### **Задачи**

Для достижения поставленной цели, в работе выделены следующие важные задачи:

1. Разработка схем АГ на основе высокодобротных резонансных структур работающих в режиме резонанса бегущей волны (РБВ).
2. Разработка способов эффективного возбуждения высокодобротных диэлектрических дисковых резонаторов (ДДР) АГ азимутальными модами с большим азимутальным  $m$  но низкими радиальным и аксиальным индексами  $n$  и  $k \sim 1$  (модами «шепчущей галереи» - МШГ)
3. Исследование способов подавления паразитных мод в оптоэлектронном генераторе с волоконно-оптической линией задержки.
4. Разработка системы автоматического регулирования (САР)

компенсации фазовых флуктуаций в оптическом контуре оптоэлектронного автогенератора (ОЭАГ), построенной на основе фазового дискриминатора в виде высокочастотного оптического микрорезонатора (ОМР), а также оптоволоконного интерферометра, построенного на основе X-разветвителя.

5. Разработка САР для подавления фазовых флуктуаций лазерного источника ОЭАГ, построенных по методу Паунда – Древера – Холла (Pound-Drever-Hall - PDH) с использованием высокочастотных оптических микрорезонаторов (ОМР), работающих в режиме резонанса бегущей волны (РБВ).

### **Научная новизна**

Научной новизной обладают следующие результаты:

1. Предложен и исследован оригинальный способ эффективного возбуждения бегущей волны в возбуждаемых МШГ высокочастотных диэлектрических дисковых резонаторах, основанный на некомпланарном расположении элементов возбуждения относительно поверхности резонаторного диска, обеспечивающий большую устойчивость к ошибкам в их изготовлении.

2. Предложено использование в качестве эталонного резонатора в схеме стабилизации частоты лазерного излучения ОЭАГ по методу Паунда-Древера-Холла высокочастотного ОМР, как нового инструментального средства, обеспечивающего снижение массогабаритных показателей схемы.

3. Обоснованы новые инструментальные средства для построения системы авторегулирования случайных фазовых сдвигов в оптическом контуре ОЭАГ, представленные проходным оптическим микрорезонатором, выполняющим функцию дискриминатора сигнала ошибки, а также оптическим интерферометром, построенным на основе оптоволоконного X-разветвителя.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

1. Результаты исследования могут быть использованы при разработке автогенераторов сантиметрового диапазона для снижения их фазовых шумов;

2. Практические рекомендации и предложения диссертационной работы, а также патент автора на полезную модель сапфирового резонатора МШГ сантиметрового диапазона используются при разработках малошумящих автогенераторов предприятия АО НПФ «Микран».

3. Данные рекомендации и предложения, позволяющие снизить как уровень фазового шума автогенераторов, так и их массогабаритные показатели могут быть использованы также и в разработках других предприятий радиотехнического профиля.

### **Методология и методы исследования**

При решении поставленных диссертационных задач использовались как различные общенаучные и специальные методы теоретического и компьютерного моделирования, так и экспериментальные методы.

К первым из них относятся моделирование малощумящих АГ, методами математического, графического имитационного моделирования, а также электродинамического моделирования с помощью прикладных пакетов MathCAD, Matlab, Simulink(Matlab), CST Studio и др. Основной целью экспериментальных исследований являлась проверка рабочих гипотез, а также получение новых научных знаний в исследуемой области.

### **Достоверность результатов диссертационного исследования**

обеспечивается обоснованностью предлагаемых моделей, решений и выводов, верификацией полученных результатов с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными, результатами компьютерной симуляции, а также полученными автором экспериментальными данными.

### **Личный вклад автора.**

Все результаты работы получены автором лично или при непосредственном его участии. Обработка и интерпретация результатов выполнена лично автором. Экспериментальные исследования проведены автором совместно с руководимыми им студентами-магистрантами. Постановка задач выполнена научным руководителем.

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

1. Использование распределенных элементов связи в проходном резонаторе малощумящего автогенератора СВЧ, работающего в режиме бегущей волны обеспечивает большую устойчивость к ошибкам в их изготовлении по сравнению с сосредоточенными элементами, возбуждаемыми через квадратурный мост.

2. Эффективное возбуждение азимутальных мод высокого порядка в ДДР с большим форм-фактором (отношением диаметра резонатора к его высоте) может обеспечиваться при не компланарном расположении элементов связи относительно плоскости резонатора.

3. Использование в схеме оптоэлектронного автогенератора системы Паунда-Древера-Холла (Pound–Drever–Hal - PDH) по стабилизации частоты лазерного источника, в которой эталонный резонатор Фабри-Перо замещен высокочастотным оптическим микрорезонатором, может значительно сократить массогабаритные показатели генератора без повышения фазовых шумов.

4. Система авторегулирования (САР) случайных фазовых сдвигов в оптическом контуре оптоэлектронного автогенератора (ОЭАГ), в которой в качестве дискриминатора САР используется проходной оптический

резонатор, настроенный на одну из боковых частот амплитудно-модулированного оптического сигнала и обеспечивающий область свободной дисперсии вдвое превышающей частоту генерации ОЭАГ, а также оптический интерферометр, построенный на основе X-разветвителя может обеспечить снижение фазовых шумов ОЭАГ, сравнимое с достигаемым в известных схемах СВЧ АГ с комбинированной связью.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2014», Россия, Томск, 14–16 мая 2014 г.

2. 24-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Россия, Севастополь, 7–13 сентября 2014 г.

3. X Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Россия, Томск, 12–14 ноября 2014 г.

4. XII Региональный смотр-конкурс инновационных проектов студентов, аспирантов и молодых ученых заявленных в программу УМНИК, г. Томск, 13-14 ноября 2014 г.

5. 25-я Юбилейная Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» г. Севастополь 6–12 сентября 2015 г.

6. XI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» Россия, Томск, 25–27 ноября 2015 г.

7. 26-я Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 4–10 сентября 2016 г., Севастополь, Россия.

8. XII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» Россия, Томск, 2016 г.

9. Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2017», Россия, Томск, 2017.

10. XIII Международная конференция "СибОптика-2017" в рамках Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО- Сибирь 2017" 17-21 апреля 2017 г., Новосибирск.

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы 18 печатных работах, из которых 4 публикации в рецензируемых изданиях, в которых излагаются основные научные

результаты диссертации, в т.ч. 2 статьи в журналах из перечня ВАК, 1 публикация, включенная в базу данных Scopus и 1 патент на полезную модель.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной научной проблемы, описано состояние проблемы в настоящее время, сформулированы цели и задачи исследований.

**В первой главе** отражены современные принципы построения генераторов сигналов СВЧ диапазона. Приводятся традиционные структурные схемы автогенераторов гармонических сигналов и краткое пояснение принципов их работы в стационарном режиме генерации. Также перечислены основные характеристики АГ.

**Вторая глава** посвящена решению первой диссертационной задачи.

Здесь отмечается, что в сантиметровом диапазоне волн для стабилизации АГ в настоящее время широко используются высокодобротные диэлектрические дисковые резонаторы (ДДР), возбуждаемые, в общем случае, гибридными модами  $EH_{mnk}$ ,  $HE_{mnk}$  с большим азимутальным индексом  $m$  но низкими радиальным и аксиальным индексами  $n$  и  $k \sim 1$  (моды «шепчущей галереи» - МШГ) [13]. Показано, что для любого материала ДДР величина добротности  $Q_0$  зависит от коэффициента связи  $\beta$  резонатора с электродинамической структурой и, в общем случае, снижается с увеличением  $\beta$ . Предлагается способ снижения потерь добротности за счет РБВ, при котором совокупность волновых максимумов в возбуждающей линии рассматриваются как многоэлементное устройство направленной связи [2].



Рис. 1 Фотография макета ДДР с устройствами связи

Для возбуждения МШГ рассмотрено несколько вариантов схем построения элементов связи (ЭС) резонатора. Рассмотрена, в частности, возможность применения в качестве ЭС направленных ответвителей микрополосковых (МПЛ) и воздушных фидерных линий (ВФЛ) расположенных в промежутке между поверхностью дискового резонатора и внешней каустики МШГ.

На рис.1 показан исследованный образец сапфирового СВЧ резонатора бегущей волны. ДДР включается в состав АГ по проходной



схеме. С этой целью он снабжен двумя устройствами связи с параметрами  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , обеспечивающими уровень критической связи.

Предложены модели ЭС ДДР в виде ВФЛ по рис.1, а также на основе МПЛ. На рис.2 приведены экспериментальные результаты измерения частотных зависимостей  $S$ -параметров ДДР со стороны возбуждающей линии в области резонанса бегущей моды  $HE_{711}$ . При этом экспериментально достигнутая величина добротности экранированного резонатора составила  $\sim 70000$ .

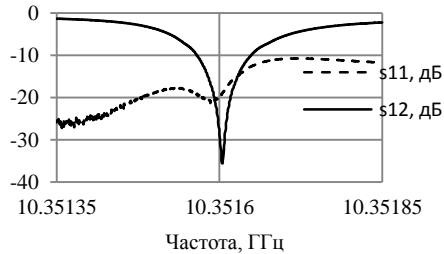


Рис. 2  $S$ - параметры ДДР. Результаты эксперимент

**Третья глава** посвящена решению второй и третьей диссертационных задач, связанных с исследованием и построением схем оптоэлектронного автогенератора (ОЭАГ) с запаздывающей обратной связью [1,3,10].

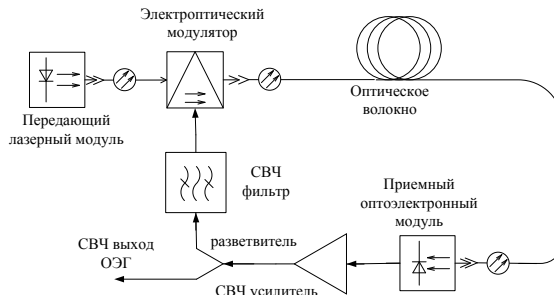


Рис. 3 Структурная схема ОЭАГ с ОВ-ЛЗ

Здесь показано, что снижение массогабаритных показателей и повышение добротности резонатора в СВЧ диапазоне можно достичь за счет использования в схеме АГ оптоэлектронных конвертеров, обеспечивающих промежуточные преобразования энергии СВЧ колебаний в энергию световой волны, которая может накапливаться в оптоволоконных (ОВ) линиях задержки (ЛЗ) на время  $\tau_d$ . Такой тип резонансных систем широко

используются для построения оптоэлектронных автогенераторов (ОЭАГ) (рис.3). Эквивалентная добротность такого автогенератора на несущей частоте  $f_H$  определяется как [10]:

$$Q_{rf} = Q_{opt} \cdot \frac{f_{rf}}{f_{opt}} \quad (1)$$

Отмечается, что недостатком резонатора на ЛЗ является большая плотность паразитных резонансных частот, характеризуемая величиной FSR (Free Spectral Range)  $\Delta\nu_{FSR}$ .

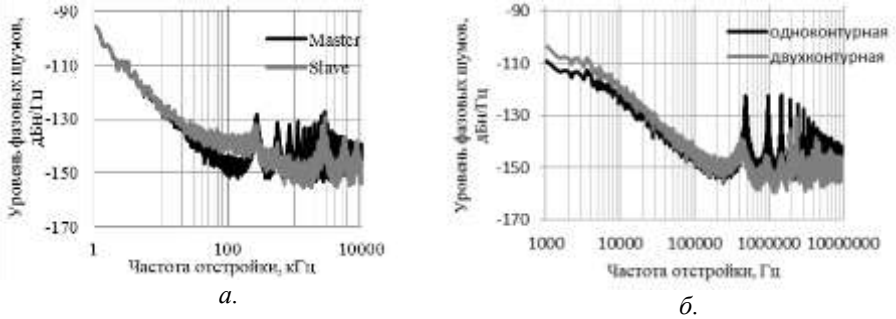


Рис. 4 СПМ  $L(f)$  двухконтурной и инжекционной схем ОЭАГ

Указано, что одним из известных способов подавления паразитных мод является использование эффекта конкуренции мод в нелинейной среде АГ, например, за счет использования двухконтурной или инжекционной схем.

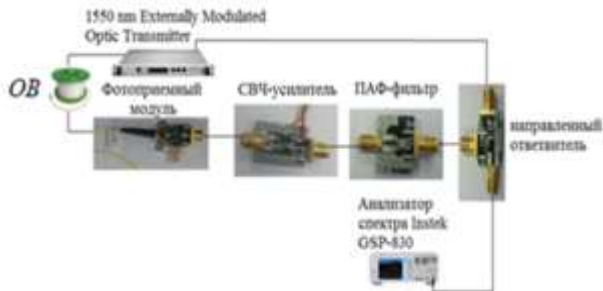


Рис. 5 Структура макета ОЭАГ с ОБ-ЛЗ

Получены расчетные данные для односторонней спектральной плотности мощности фазовых шумов  $L(f)$  для данных типов ОЭАГ (рис. 4). Эти данные демонстрируют возможности снижения уровня паразитных мод в схеме ОЭАГ  $\sim 10$  дБ. Установлено, что лучшие результаты показывает

инжекционная схема ОЭАГ. Показано, что увеличение длины ВОЛЗ приводит к снижению уровня фазовых шумов ОЭАГ, но, одновременно, к сжатию области свободной дисперсии  $\Delta\nu_{FSR}$ . Указывается, что для минимизации фазовых шумов оптоэлектронных схем необходимы разработки дополнительных средств подавления фазовых флуктуаций, вносимых, в частности, лазерным источником.

Описан экспериментальный макет ОЭАГ (рис.5), работающий на частоте 900 МГц. Результаты экспериментального исследования сведены в таблицу 1.

Отмечается, что согласно модели Лисона, простым способом снижения  $L(f)$  является повышение добротности резонансной системы  $Q_0$ . Наиболее высокие значения ненагруженной добротности таких устройств в широком температурном диапазоне достигаются в оптических микрорезонаторах (ОМР), возбуждаемых МШГ [2,13].

Таблица 1 Паромеры макета ОЭАГ с ОВ-ЛЗ

Длина ОВ	$l_{ВОЛ}=2,72$ м	$l_{ВОЛ}=420$ м	$l_{ВОЛ}=532$ м
Время задержки, мкс	0,013	2,234	2,658
РЧМ, кГц	-760065	447,6	376,2
Мощность генерации, дБм	-25,87	-41,50	-32,05
Уровень подавления паразитных мод, дБ	-74,13	41	25,05
Уровень фазовых шумов при отстройке на 10кГц	-60	-70	-75

Среди различных типов конструкций ОМР автором исследованы дисковые оптические микрорезонаторы планарного типа (ДОМР), конструкция которых характеризуется большим значением форм-фактора (формата) диска  $\Phi$ , равного отношению его радиуса  $R_0$  к высоте  $h$ . Данный тип резонатора выделяется своей технологичностью и может служить основой для разработки гибридной интегральной схемы ОЭАГ. Указывается, что наилучшие показатели ОЭАГ по использованию мощности достигаются в проходном режиме ДОМР, в режиме бегущей волны (РБВ) ОЭАГ (рис.6), т.е. минимальных отражениях сигнала от узлов в контуре ОС ОЭАГ, который обеспечивается направленным возбуждением ДОМР, за счет настройки и оптимизации элементов связи накачки и съема (ЭС-Н,С) (см.рис.6).

Отмечается, что трудности реализации РБВ связаны с необходимостью задания регулируемых коэффициентов связи  $\beta$  резонатора со структурами тракта АГ, обеспечивающих требуемые характеристики.

На основе модели [13] установлены соответствующие геометрические

размеры резонатора и ЭС. В частности показано, что нагруженная добротность  $Q_{он}$  ДОМР связана с собственной добротностью резонатора  $Q_{00}$  и добротностью связи  $Q_c$  как [13],

$$\frac{1}{Q_{он}} = \frac{1}{Q_{00}} + \frac{1}{Q_c} = \frac{2\delta_0}{\omega_0} + \frac{2\delta_c}{\omega_0} \quad (2)$$

Здесь

$$\delta_0 = \frac{\alpha c}{2n_s}, \quad \delta_c = \frac{T^2}{2\tau_0}, \quad \tau_0 = \frac{2\pi n_s R_0}{c}, \quad (3)$$

$T$  – коэффициент передачи направленных ответвителей ЭС-Н,С,  $\alpha$  – коэффициент затухания мощности МШГ в ДОМР,  $c$  – скорость света;

$Q_c$  обычно выбирают из условия максимума запасенной в резонаторе энергии  $E_0$ , которое достигается при критической связи между ДОМР и ЭС-Н,С, когда  $\delta_0 = \delta_c$ .

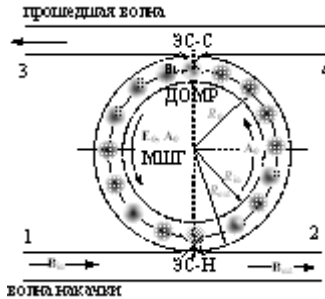


Рис.6. Структурная схема резонансной системы ОЗАГ на основе ДОМР с элементами связи ЭС-Н,С

Отмечается, что среди механизмов, ограничивающих собственную добротность резонатора  $Q_{00}$ , основными являются рассеяние на термодинамических флуктуациях плотности и рассеяние на поверхностных неоднородностях ДОМР. Оценка  $Q_{он}$  для резонатора из плавяного кварца ( $\varepsilon=2,13$ ,  $Q_{00}=0,17 \cdot 10^{12}$ ), при расстоянии между ЭС и ДОМР  $1,5\lambda$ , дает  $Q_c \approx 180 \cdot 10^9$ ,  $Q_{он} \approx 90 \cdot 10^9$ .

Важнейшим параметром резонансной системы ОЗАГ является спектр ее резонансных частот  $\nu_{0m}$ . При их выборе необходимо учитывать, что  $\nu_{0m}$  должен быть согласован со спектром амплитудно-модулированного светового пучка. В данной связи ДОМР должен обеспечивать резонанс на трех частотах, отстоящих друг от друга на равный частотный интервал  $\Delta\nu_{0m} = f_0$ . Для предварительного расчета зависимости  $\nu_{0m}$  и  $\Delta\nu_{0m}$  от азимутального индекса МШГ  $m$  можно воспользоваться соотношением [13],

$$v_m = \frac{c\sqrt{\tilde{y}_m^2 + \beta_m^2 R}}{2\pi n_s R}, \quad (4)$$

где  $\tilde{y}_m = T_m - \frac{1}{P n_s \sqrt{n_s^2 - 1}}$ ,  $\beta_m = \frac{\pi}{h + \frac{2P n_s R}{\tilde{y}_m \sqrt{n_s^2 - 1}}}$ ,

$$T_m \approx m - \alpha_1 \left(\frac{m}{2}\right)^{1/3} + \frac{3\alpha_1^2}{20} \left(\frac{m}{2}\right)^{-1/3} + \frac{3\alpha_1^3}{1400} \left(\frac{m}{2}\right)^{-1}$$

– 1-й ноль цилиндрической функции Бесселя,  $\alpha_1 = -2.33811$  – 1-й корень функции Эйри,  $P$  – параметр типа МШГ (для ТЕ-мод  $P=1$ , ТМ-мод  $P=1/(n_s)^2$ ).

Установлено, что требование эквидистантности спектра  $\Delta v_{0m} = f_0$  выполняется при больших азимутальных индексах МШГ. Приведенная приближенная зависимость  $v_{0m}(n_s, R_0, f_0)$  пригодна для оценки размеров резонатора и выбора его материала. Так для кварцевого ДОМР с размерами  $R_0 = 3$  мм;  $h = 0,5$  мкм. и  $n_s = 1.5$ ; расчет зависимости частот  $v_{0m}$  от  $m = 16246 + n$  по формуле (4) дает,  $v_{016247+n} \approx (200.007 + 10.724 \cdot 10^{-3} n)$ , ТГц. Здесь  $n$  меняется от 0 до 14. Приведенные оценки показывают возможности практической реализации резонансной системы ОЭАГ на основе ДОМР.

Показано, что эффективность использования ПОВ в качестве ЭС-Н,С определяется двумя условиями. Первое из них, определяет эффективность энергообмена МШГ с модой ЭС, которое может описываться интегралом перекрытия указанных полей в области их взаимодействия [13].

Вторым условием является условие синхронизма, т.е. требование согласования фазовых скоростей МШГ и моды в ПОВ.

Показано, что точная реализация данных условий в ДОМР радиуса  $R$  обеспечивается на расстоянии  $R^*$  от центра резонатора,

$$2\pi N_{эф}/\lambda_0 = m/R \quad (5)$$

где  $N_{эф}$  – эффективный показатель преломления волноводной структуры ЭС-Н,С,  $m$  – азимутальный порядок МШГ,  $\lambda_0$  – длина световой волны в свободном пространстве. Получено уравнение, определяющее максимальную длину отрезка волновода  $L_r^*$ , обеспечивающей допустимый уровень фазового рассогласования  $\psi$  МШГ и волны ЭС, а также число полуволн  $N^*$  бегущей волны, укладываемых на данном отрезке. Отмечается, что совокупность данных элементов можно рассматривать как многоэлементное устройство связи с ДОМР. Показано, что максимальное число  $N^*$  в ЭС-Н,С формируется, если  $R \rightarrow R^*$ . Эти выводы хорошо соответствуют полученным нами результатам расчетов поля ДОМР в пакете CST Studio. В результате данного электродинамического моделирования установлено также, что для мод с высоким азимутальным индексом  $m$

область локализации фундаментальной МШГ ограничена ее внешней и внутренней каустиками радиуса  $L_{out}$  и  $L_{in}$ , такова, что  $L_{in} \rightarrow R_0$ . Однако, например, при  $m=15$  поле моды локализовано слабо. Это дает возможность расположить устройства связи с  $HE_{15,1,1}$  именно над поверхностью резонатора в области  $(L_{out}-L_{in})$ . При этом основным требованием к таким ЭС ДОМР является направленность возбуждения и съема энергии моды, обеспечивающая режим бегущей волны в контуре ОЭАГ.

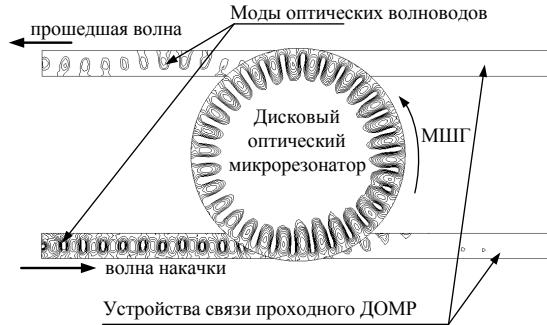


Рис. 7. Структура мод МШГ  $HE_{15,1,1}$  в кварцевом ДОМР, возбуждаемой на частоте  $\nu=121,9$  ТГц. и мод ЭС-Н,С на основе планарных оптических волноводов

В рассматриваемой конструкции ЭС-Н,С нормированная частота волновода  $V$  выбрана малой за счет установки малой толщины пленки ПОВ в области ДОМР, меньшей, чем длина волны  $\lambda_0$ . Как указывалось выше, в данных условиях локализация поля в волноводе слабая, поэтому такая ПОВ-структура становится излучающей. Установлено, что при размещении элементов ЭС-Н,С в области  $(L_{out}-L_{in})$  на расстоянии  $R^* \approx 4,5$  мкм. от центра резонатора и  $0,5$  мкм. зазоре над поверхностью ДОМР, указанная система функционирует как проходной резонатор бегущей волны (рис.7).

**Четвертая глава** посвящена решению третьей, четвертой и пятой диссертационным задачам, т.е. рассмотрению способов подавления шумов оптоэлектронных компонентов схемы ОЭАГ, а также шумов лазерного диода (ЛД). Основным методом подавления таких флуктуаций в настоящее время является метод Паунда–Древера–Холла (Pound-Drever-Hall - PDH), в котором за счет использования системы автоматического регулирования обеспечивается динамическая подстройка частоты ЛД относительно резонансной частоты внешней высокочастотной резонансной системы. Отмечается, что в основе PDH лежит принцип фазовой модуляции (ФМ) несущей частоты  $\nu$  стабилизируемого АГ гармоническим- сигналом с

частотой  $F_M$ . При малых индексах  $\beta \ll 1$  ФМ светового поля с амплитудой  $E_0$  и частотой  $\nu$  гармоническим колебанием с частотой  $F_M$  спектр лазерного пучка на выходе модулятора содержит только три частотные составляющие,

$$E \approx E_0 \{ J_0 \exp[i \nu t] + J_{+1} \exp[i (\nu + F_M)t] - J_{-1} \exp[i (\nu - F_M)t] \} \quad (6)$$

где  $J_{0,\pm 1}$ - функции Бесселя 0 и  $\pm 1$  порядков.

Из (6) видно, что в спектре кроме центральной составляющей  $\sim J_0$ , содержатся также две противофазные боковые компоненты  $\sim J_{\pm 1}$ , отстоящие от частоты  $\nu$  на  $\pm F_M$ . Отмечается, что в данной схеме резонатор используется в качестве дискриминатора отклонения частоты  $\nu$  относительно резонансной частоты  $\nu_0$  эталонного резонатора с полосой пропускания  $\delta\nu$ . Полоса захвата системы PDH при этом связана с частотным интервалом  $2F_M$  между указанными боковыми составляющими фазомодулированного светового излучения.

Отмечается, что спектральная зависимость интенсивности отраженного от резонатора светового пучка имеет характерную форму резонансной кривой, а фаза поля изменяется в пределах  $\pm\pi/2$  и переходит через 0 на частоте  $\nu_0$ . При этом частотная производная  $R'(\nu)$  на  $\nu_0$  также изменяет знак. Этот факт, по существу, и положен в основу АГ Паунда при медленной перестройке ФМ-модулятора ( $F_M \approx \delta\nu$ ). При отражении боковые спектральные составляющие, очевидно, полностью компенсируют друг друга, если частота отраженного пучка совпадает с осью симметрии кривой  $R(\nu)$ , т.е. резонансной частотой  $\nu_0$ . На других частотах такая компенсация не возможна, поэтому зависимость  $R'(\nu)$  используется для формирования сигнала ошибки  $U_e(\Delta\nu)$ , возникающего при мгновенном отклонения частоты  $\nu(t)$  от  $\nu_0$  и используемого для активизации системы автоподстройки частоты  $\nu(t)$ . Технически это достигается за счет отражения стабилизируемого светового пучка от РФП, измерения его интенсивности и регистрации сигналов биений между частотами  $\nu$  и  $\nu \pm f_M$ . Указанные биения выделяются синхронным детектором, формируемым сигнал ошибки. После фильтрации этот сигнал используется в системе обратной связи (ОС) лазера. С ее помощью отклонение сигнала ошибки от нулевого значения обрабатываться сервоэлементом в петле ОС.

Подчеркивается, что больший практический интерес представляет режим быстрой перестройке ФМ-модулятора, при котором модулирующая частота  $F_M$  намного превышает полосу частот эталонного резонатора  $\delta\nu$ , а спектральный диапазон захвата системы максимален.

В работе установлена зависимость сигнала ошибки  $U_e$  от относительной расстройки  $\nu/\nu_0$  частоты сигнала АГ относительно  $\nu_0$  для обоих из названных режимов. Показано, что мощность сигнала биений частоте  $F_M$ , формируемого отраженными от резонатора составляющими поля (6) в резистивной нагрузке фотодиода (ФД) с номиналом  $r_0$  равна,

$$P_r(F_M) \approx |V_0|^2/2r_0 \times \left\{ -\sqrt{R_c R_{sa} P_c P_s} \text{Cos}[F_M t - (\varphi_b - \varphi_{sa})] + \sqrt{R_c R_{sc} P_c P_s} \text{Cos}[F_M t - (\varphi_b - \varphi_{sc})] \right\} \quad (7)$$

где  $V_0$  – средняя амплитуда немодулированного оптического сигнала в указанной нагрузке ФД.

Здесь действительные части отраженных от резонатора амплитуд оптической несущей и боковых составляющих обозначены как  $P_c = E_0^2 J_0^2(\beta)$  и  $P_s = E_0^2 J_s^2(\beta)$ . Фаза первой из этих составляющих обозначена как  $\varphi_b$ , а фазы коэффициентов отражения нижней и верхней боковых составляющих обозначены как  $\varphi_{sa}$  и  $\varphi_{sc}$ .

При выводе (7) полагалось, что сигнал локального генератора ФМ  $u_{lo}(t)$  пропорционален  $\sim U_{lo} \text{Sin}(F_M t)$ . Выполнение данного требования обеспечивается за счет фазирования  $u_{lo}(t)$  специально введенным в схему для этой цели перестраиваемым фазовращателем. Показано, что в результате синхронного детектирования сигнала (7) искомое значение  $U_e$  на выходе ФНЧ будет,

$$U_e \approx |V_0|^2 U_{lo} J_{10}(\beta) J_1(\beta) \sqrt{R_c} P_0 / 2r_0 \times \left[ \sqrt{R_{sa}} (\text{Sin} \varphi_b \text{Cos} \varphi_a - \text{Cos} \varphi_b \text{Sin} \varphi_a) \sqrt{R_{sb}} (\text{Sin} \varphi_b \text{Cos} \varphi_b - \text{Cos} \varphi_b \text{Sin} \varphi_b) \right] \quad (8)$$

На основании (8) показано, что в режиме медленной ФМ, где  $F_M \ll \delta\nu$ , сигнал ошибки описывается соотношением:

$$U_e(F_M) = |V_0|^2 / r_0 \cdot U_{lo} J_0(\beta) J_1(\beta) P_0 [(dR_c/d\nu)(d\nu/d\varphi)] \Delta\varphi \approx |V_0|^2 / r_0 \cdot U_{lo} J_{10}(\beta) J_1(\beta) P_0 [(dR_c/d\nu) \cdot F_M], \quad (9)$$

и совпадает с известным из литературы.

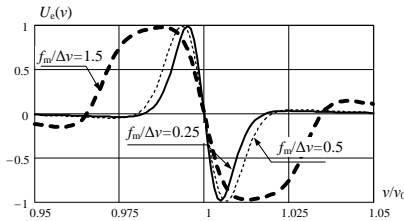


Рис. 8 Зависимость сигнала ошибки  $U_e$  от относительной расстройки  $v/v_0$  при медленной ФМ

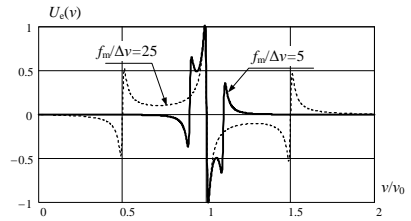


Рис. 9 Зависимость сигнала ошибки  $U_e$  от относительной расстройки  $v/v_0$  при быстрой ФМ

Графики зависимостей  $U_e(F_M)$  для различных скоростей ФМ расставлены по формуле (9) и приведены на рис. 8. Расстояние между экстремумами данной зависимости определяет полосу удержания  $\Delta\nu^*$  системы. Приведенные данные показывают, что с увеличением частоты  $F_M$  полоса удержания  $\Delta\nu^*$  системы PDH монотонно расширяется. Отсюда следует перспективность перевода схемы PDH в режим быстрой ФМ,



когда  $F_M \gg \delta\nu$ . По этой причине в данном режиме в диапазон  $\Delta\nu$  попадает лишь одна составляющая из спектра отраженного оптического сигнала (6). Так для несущей частоты  $\nu$  лазера получим,

$$U_e(F_M) = 2|V_0|^2/r_0 \cdot U_{lo}J_0(\beta)J_1(\beta)\sqrt{R_c}P_0 \text{Sin}\varphi_b(F_M), \quad (10)$$

Если же в полосу пропускания опорного резонатора попадает только одна, например, первая из боковых составляющих (6), тогда получим,

$$U_e(F_M) = -|V_0|^2/r_0 \cdot U_{lo}J_0(\beta)J_1(\beta)\sqrt{R_c}P_0 \text{Sin}\varphi_b(F_M) \quad (11)$$

Графики, рассчитанные по формулами (10) и (11) для различных модулирующих частот  $F_M$ , представлены на рис. 9. Они демонстрируют хорошее качественное соответствие расчетных и известных из литературы опытных данных.

Основным недостатком стандартной схемы авторегулирования PDH можно считать ее относительно большие габариты, в основном определяемые размерами резонатора Фабри-Перо (РФП) и не позволяющие совместить ее размеры с габаритами интегральных микросхем.

В работе показана возможность использования в схеме оптоэлектронного автогенератора системы PDH по стабилизации частоты лазерного источника, в которой эталонный РФП замещен высокочастотным оптическим микрорезонатором (ОМР), которая может значительно сократить массогабаритные показатели генератора без повышения фазовых шумов.

Отмечается, что другой, независимый, механизм образования фазовых шумов в контуре ОЭАГ связан с шумами оптоэлектронных компонентов, механизм образования которых связан с использованием в ОЭАГ оптоэлектронной конверсии (блок ЭОМ на рис. 3 и 5), в котором осуществляется амплитудная модуляция (АМ) лазерного излучения радиочастотным (РЧ) сигналом  $u_r(t) = U_r(t)\cos[f_0 \cdot t + \varphi_r(t)]$ , который формируется в фотоприемнике ОЭМ в результате биений оптической несущей с боковыми составляющими в спектре оптического АМ сигнала. Дальнейшая обработка  $u_r(t)$  в радиочастотном тракте ОЭАГ - усиление, фильтрация и преобразование в оптический сигнал, естественно, приводит к случайным флуктуациям фазы  $\Delta\varphi(t)$  и соответствующим искажениям боковых составляющих в спектре АМ поля оптического пучка на выходе медиаконвертера. Отмечается, что резонансная система схемы рис.3, ориентированная на поддержку АМ сигнала, малоприспособна для использования в качестве дискриминатора фазовых флуктуаций  $\Delta\varphi(t)$ . Показано, что данный недостаток ОМР можно преодолеть, например, за счет введения в схему ОЭАГ дополнительного резонатора, ОМР-Д, специально предназначенного для выделения только одной из указанных частот  $\nu_0 \pm f_0$ , т.е. обеспечивающего параметры:

$$\begin{aligned} \nu'_0 &= \nu_0 \pm f_0, \\ \Delta\nu'_{\text{FSR}} &> 2f_0, \end{aligned} \quad (12)$$

подключенного в волоконно-оптический тракт ОЭАГ с помощью оптоволоконного - Y-разветвителя.

Отмечается, что контроль флуктуаций амплитуды и фазы колебаний на оптических частотах  $\nu_0$  в сотни терагерц сопряжен со значительными техническими трудностями, которые усугубляются также и тем, что мощность выходного сигнала ОЭАГ на много порядков превышает измеряемую мощность его фазовых флуктуаций. Показано, что эти трудности могут быть преодолены, например, за счет подавления оптической несущей, в рамках интерферометрического метода измерений, обеспечивающего измерение фазовых флуктуаций  $\Delta\varphi(t)$  на нулевой частоте. В качестве аппаратного устройства для подавления частоты  $\nu(t)$  предложено использовать оптический интерферометр. Для сопряжения такого интерферометра с оптическим блоком оптоэлектронного генератора его схему предлагается строить на основе волоконно-оптических (ВО) X-разветвителей, имеющих две пары волоконных выводов (рис. 5).

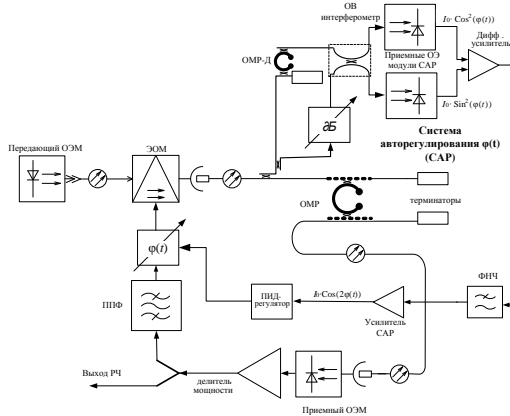


Рис. 10 САР ОЭАГ на основе оптического интерферометра

Одновременное возбуждение 1 и 2-го портов такого устройства оптическими сигналами с равными интенсивностями  $I_0$  и частотами, но сдвинутыми по фазе на  $\Delta\varphi(t)$  приведет к формированию в портах 3 и 4 следующих интерференционных оптических полей с интенсивностями:

$$\begin{cases} I_3(t) = I_0 \sin^2(\Delta\varphi(t)) \\ I_4(t) = I_0 \cos^2(\Delta\varphi(t)) \end{cases} \quad (13)$$

Из (13) можно определить функцию преобразования интерферометра, связывающую интенсивности  $I_3$  и  $I_4$  в его выходных портах с измеряемым фазовым сдвигом  $\Delta\varphi(t)$ ,

$$\cos(2\Delta\varphi(t)) = [I_4(t) - I_3(t)]/[I_4(t) + I_3(t)] \quad (14)$$

Пример аппаратной реализации алгоритма (13) по измерению  $\Delta\varphi(t)$  в схеме ОЭАГ показан на рис. 10. Здесь фазовая флуктуация  $\Delta\varphi(t)$  в контуре автогенератора проявляется в относительном фазовом сдвиге оптического сигнала в портах высокодобротного микрорезонатора ОМР-Д и измеряются интерферометром по схеме рис. 10. Регулируемые оптические фазовращатели и аттенуатор необходимы для балансировки плеч интерферометра.

Отмечается, что схема аппаратной реализации автоматической компенсации фазовых флуктуаций в ОЭАГ окажется не менее эффективной, как и аналогичные схемы радиочастотного диапазона.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Перевод АГ в режим бегущей волны позволяет исключить из его схемы ферритовый циркулятор, ограничивающий шумовые характеристики генератора.

2. Эффективность возбуждения бегущих азимутальных мод высокого порядка (МШГ) в ДДР за счет распределенных элементов связи (ЭС), расположенных над поверхностью резонаторного диска, определяется эффективной длиной ЭС  $L_r^*$ , на которых достигается допустимое фазовое рассогласование  $\Delta\psi$ . Приведены расчетные формулы и графики зависимости  $L_r^*(\Delta\psi)$

3. Распределенный элемент связи с эффективной длиной  $L_r^*$ , размещенный над поверхностью резонаторного диска, можно рассматривать как многоэлементное устройство возбуждения бегущей волны. Соответствующее число его элементов  $N^*$  определяется числом полуволн бегущей волны в ЭС, укладываемых на отрезке  $L_r^*$ . При этом увеличение  $N^*$  для заданного коэффициента связи  $\beta$  ЭС с резонансной системой приводит к увеличению ее добротности.

4. Проведено экспериментальное исследование возбуждения ДДР в режиме бегущей волны двумя типами ЭС - на основе распределенных элементов связи, а также ЭС из двух сосредоточенных штыревых элементов, возбуждаемых через квадратурный мост. Показано, что первый способ обеспечивает большую устойчивость характеристик ЭС к ошибкам в их изготовлении.

5. Результаты расчетных экспериментов по подавлению паразитных мод АЭАГ-СВЧ с волоконно-оптической линией задержки (ВОЛЗ) с помощью инжекционной и многоконтурных схем, подтверждающие их эффективность. Установлено, что лучшие результаты показывает инжекционная схема АЭАГ. Показано, что увеличение длины ВОЛЗ приводит к снижению уровня фазовых шумов АЭАГ, но, одновременно, к

сжатию области свободной дисперсии FSR (Free Spectral Range). Указывается, что для минимизации фазовых шумов оптоэлектронных схем необходимы разработки дополнительных средств подавления фазовых флуктуаций, вносимых, в частности, лазерным источником.

6. В проходных высокодобротных дисковых оптических микрорезонаторах с большим форм-фактором режим бегущих волн МШГ может быть реализован при их размещении над поверхностью резонатора, в области ограниченной внешней и внутренней каустиками резонансной моды. Такая геометрия ЭС позволяет перемещать волноводные структуры ЭС не только в радиальном, но и в осевом и направлении ОМР, и, таким образом, обеспечивать независимое управление уровнями связи и синхронизма мод ЭС и МШГ и большую гибкость в разработке резонансной системы ОЭАГ.

7. Эффективность возбуждения ДОМР азимутальными модами высокого порядка с помощью распределенных волноводных ЭС типа ПОВ максимальна при малых нормированных частотах  $V$  волновода, когда энергия ее фундаментальной моды локализована слабо. Эти выводы подтверждаются результатами электромагнитного моделирования указанных резонансных систем в пакете CST Studio.

8. Система авторегулирования (САР) случайных фазовых сдвигов в оптическом контуре оптоэлектронного автогенератора (ОЭАГ), в которой в качестве дискриминатора САР используется проходной оптический резонатор, настроенный на одну из боковых частот амплитудно-модулированного оптического сигнала и обеспечивающий область свободной дисперсии FSR вдвое превышающей частоту генерации ОЭАГ, а также оптический интерферометр, построенный на основе Х-разветвителя, может обеспечить снижение фазовых шумов ОЭАГ, сравнимое с достигаемым в известных схемах СВЧ АГ с комбинированной связью

9. Показана возможность использования в схеме оптоэлектронного автогенератора системы Паунда-Древера-Холла (Pound-Drever-Hall - PDH) по стабилизации частоты лазерного источника, в которой эталонный резонатор Фабри-Перо замещен высокодобротным оптическим микрорезонатором (ОМР), которая может значительно сократить массогабаритные показатели генератора без повышения фазовых шумов. Получено аналитическое выражение для зависимости сигнала ошибки от расстройки частоты лазера относительно резонансной частоты ОМР, определяющее полосу удержания  $\Delta\nu^*$  системы в режимах медленной и быстрой ФМ. Показано, что полоса  $\Delta\nu^*$  расширяется с увеличением частоты фазовой модуляции лазерного пучка и ограничена шумами системы

10. Результаты диссертационной работы используются в разработках предприятия АО НПФ «Микран».

### Список литературы

1. Капранов М.В. Теория колебаний в радиотехнике: учеб. пособие для вузов / М.В. Капранов, В.Н. Кулешов, Г.М. Уткин– М.: Наука, 1984 г. – 320 с.
2. Царапкин Д. П. Методы генерирования СВЧ колебаний с минимальным уровнем фазовых шумов /Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. 05.12.04 / Царапкин Дмитрий Петрович
3. Rubiola E. Phase noise and frequency stability in oscillators / E. Rubiola – Cambridge: Cambridge University Press, 2008 – 228 p.
4. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Ф. Риле – Пер. с англ. —М.: Физматлит, 2009, – 511 с.
5. IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology-Random Instabilities // IEEE Standard 1139-2008. – New York, 2009.
6. Barton D. K. Radar System Analysis and Modeling / D. K. Barton – 2005: Artech House.
7. Richardson A. WCDMA Design Handbook / A. Richardson 2005: Cambridge University Press.
8. Ильченко М.Е. Диэлектрические резонаторы / М.Е. Ильченко, В.Ф. Взятыхшев– М.: Радио и связь, 1989. — 328 с.
9. Grop S. 10 GHz cryocooled sapphire oscillator with extremely low phase noise. / S. Grop, P.Y. Bourgeois, R. Boudot, Y. Kersale, E. Rubiola, V. Giordano // Electron Lett.– Mar. 2010.– vol. 46 –pp. 420-422
10. Maleki L. Sources: The Optoelectronic Oscillator. / L. Maleki // Nature Photonics Technology Focus– December 2011– Vol. 5, No. 12 – pp. 728-730.
11. Seeds A. J. Microwave photonics / A. J. Seeds, K. J. Williams // J. Lightwave Technol.– Dec. 2006 – vol. 24, no. 12 – pp. 4628-4641
12. Урик-мл В. Дж. Основы микроволновой фотоники. / В. Дж. Урик-мл., Дж. Д. МакКинни, К. Дж. Вилльямс. – Техносфера, 2016 – 376 с.
13. Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью./ М.Л. Городецкий– Изд. Физматлит, 2011 г. – 415 с.
14. Лиокумович Л. Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения./ Л. Б. Лиокумович. –Волоконно-оптические интерферометры. Ч. 1.– СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2007.– 110с.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### Публикации в рецензируемых изданиях

1. Galiev, A.B. The optoelectronic microwave oscillator based on an optical disk microresonator / A.B. Galiev, A.S. Zadorin, **A.A. Lukina**, R.S. Kruglov // Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 24th International Crimean Conference – 2014 – pp. 99-100.– DOI: 10.1109

CRMICO.2014.6959307.

2. Задорин, А.С. Исследование моделей подавления паразитных мод оптоэлектронного СВЧ- автогенератора на основе инжекционной и многоконтурной схем / А.С. Задорин, **А.А. Лукина** // Журнал Доклады ТУСУРа – 2016– том 19 № 4 – с. 81–84.

3. Горевой, А.В. Режим резонанса бегущей волны в диэлектрическом дисковом резонаторе автогенератора сантиметрового диапазона / А.В. Горевой, А.С.Задорин, **А.А. Лукина**. // Журнал Труды НИИ Радио –2017– №2 – стр. 14–22.

4. Направленный фильтр СВЧ. пат № 170771 / Горевой А.В., **Лукина А.А.**; заявитель и патентообладатель АО НПФ «Микран» заявка № 2016145709, от 22.11.2016.

#### Публикации в иных сборниках и журналах

1. **Лукина, А.А.** Модовый состав оптического микрорезонатора оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона / А.А. Лукина, А. Б. Галиев. // Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2014», Россия, Томск – 14–16 мая 2014 г.– Часть 1,– стр. 245-249.

2. Галиев, А. Б. Шумовая модель оптоэлектронного генератора СВЧ диапазона / А. Б. Галиев, **А.А. Лукина**, А. Н. Нуркасымов // Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2014», Россия, Томск – 14–16 мая 2014 г.– Часть 1,– стр. 223-229.

3. Галиев, А. Б. Моделирование оптоэлектронного генератора в среде simulink / А. Б. Галиев, **А.А. Лукина**, А.С. Задорин // Материалы докладов X Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления»,– Россия, Томск – 12–14 ноября 2014 г Часть 2– стр. 178-182.

4. **Лукина, А.А.** Возможности микроминиатюризации оптоэлектронного генератора СВЧ-диапазона / А.А. Лукина, А.С. Задорин // Материалы докладов X Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Россия, Томск – 12–14 ноября 2014 г Часть 2– стр. 182-186.

5. Горевой, А. В. Оптоэлектронный генератор с волоконно-оптической линией задержки: численное моделирование и экспериментальное исследование./ А. В. Горевой, Д. А. Конкин, **А. А. Лукина**, Г. К. Толендиев. // Научная сессия ТУСУР – 2015: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 13-15 мая 2015 г. - Томск В-Спектр, 2015: в 5 частях. – Ч. 2. – с. 26-29.

6. Горевой, А. В. Макет оптоэлектронного генератора с волоконно-оптической линией задержки./ А. В. Горевой, Г. К. Толендиев, Д. Е. Бадырова,

М. Г. Шарипова, **А. А. Лукина**, Д. А. Конкин // Научная сессия ТУСУР – 2015: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 13-15 мая 2015 г. - Томск В-Спектр, 2015: в 5 частях. – Ч. 2. – с. 70-72.

7. **Лукина, А.А.** Исследование оптоэлектронного генератора СВЧ-диапазона / А.А. Лукина, Толендиев Г.К., Горевой А.В. // 25-я Юбилейная Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» г. Севастополь 6—12 сентября 2015 г.

8. Горевой, А. В. Исследование направленного фильтра на СВЧ-резонаторе с эффектом волн шепчущей галереи / А. В. Горевой, **А.А. Лукина** // Материалы докладов XI Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», – Россия, Томск, 25–27 ноября 2015 г. – № 1– С. 262-265.

9. Горевой, А. В. Возбуждение резонатора бегущей волны моды «шепчущей галереи» с линией передачи с распределенной связью / А. В. Горевой, **А.А. Лукина**// 26-я Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Россия –2016 г.– С. 1311-1314.

10. Горевой, А. В. Реализация четырехпортового направленного фильтра с бегущей волной типа "шепчущей галереи" / А. В. Горевой, **А.А. Лукина** // Материалы докладов XII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» Россия, Томск, 2016 г.– № 1. – С. 182-184.

11. Задорин, А.С. Режим резонанса бегущей волны в оптическом дисковом микрорезонаторе оптоэлектронного автогенератора / А.С.Задорин, **А.А. Лукина** // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 5, № 2 – С. 94-99.

12. Горевой, А.В. Возбуждение дискового диэлектрического СВЧ резонатора бегущей волной / А.В. Горевой, **А.А. Лукина**, Н. В. Пилин, Н. Аманбаев // Научная сессия ТУСУР–2017: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, В-Спектр – Россия, Томск.

13. Задорин, А.С. Система стабилизации частоты лазерного излучения на основе высокодобротного планарного оптического дискового микрорезонатора./ А.С. Задорин, **А.А. Лукина** // Материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления»,– Россия, Томск, 2017 г.

14. Задорин, А.С. Интерферометрический контроль фазовых шумов в оптоэлектронном автогенераторе с высокодобротным оптическим микрорезонатором./ А.С. Задорин, **А.А. Лукина**, Н. Аманбаев // Материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления»,– Россия, Томск, 2017 г.