

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Генерация частотных гребенок  
в оптических микрорезонаторах  
для информационных систем**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКАЯ РАБОТА

студента 2 курса 2211 группы

направления 03.04.01 Прикладные математика и физика

Института физики

Бандурова Михаила Алексеевича

Научный руководитель  
профессор, д.ф.-м.н.



Е.А. Романова

Зав. кафедрой нелинейной физики  
доцент, к.ф.-м.н.



Е.Н. Бегинин

Саратов 2023 г.

**Введение.** На данный момент технология спектрального уплотнения каналов (WDM - Wavelength Division Multiplexing) стала основой для построения большинства сегментов современных телекоммуникационных систем. Таким образом, реализация транспортных сетей связи последнего поколения невозможна без применения DWDM-систем (систем с плотным спектральным уплотнением D-Dense), основное преимущество которых заключается в большем количестве доступных каналов за счет меньшего расстояния между соседними частотами, что позволяет быстро и надежно масштабировать актуальные сети для увеличения пропускной способности.

Изучение деталей DWDM технологии и методов получения частотных гребенок является актуальной темой для дипломной работы, поскольку эти знания могут быть применены для создания более эффективных и надежных систем связи и спектроскопии, а также для развития современных технологий переноса данных, облачных вычислений и др.

**Целью магистерской работы** является изучение микрорезонаторов и возможностей их применения в WDM-системах.

**Актуальность данной работы** связана с бурным развитием систем телекоммуникаций, основную часть которых составляют WDM системы мультиплексирования, использующего оптические сигналы как основной метод передачи информации.

**Основными задачами данной работы являются:**

- Теоретическое изучение WDM систем.
- Изучение теории оптического микрорезонатора и получения частотных гребенок в частности.
- Построение модели получения оптических гребенок в микрорезонаторе и анализ полученных результатов.

Для моделирования импульса в микрорезонаторе использовалась программа ruLLE.

**Основное содержание работы.** Работа состоит из введения, шести разделов, заключения, списка использованных источников, содержащего 30 наименований. Общий объем работы составляет 72 страницы, включая 1 таблицу и 6 csv-файлов.

Во **введении** обосновывается актуальность темы работы, формулируется цель работы и решаемые задачи, отмечается значимость полученных результатов.

В **первом** разделе приводятся основные понятия технологии WDM-систем и принципы их функционирования. Рассмотрены понятия транспондера, мультиплексора, оптического волокна, усилителей оптического сигнала и компенсаторов дисперсии.

Во **втором** разделе описаны необходимые условия для генерации оптических частотных гребенок. Рассмотрено понятие оптической нелинейности третьего порядка. Дано определение Керровских частотных гребенок. Изучено явление четырехволнового смешения. Дополнительно проанализированы явления мультистабильности и динамических режимов. Для дальнейших вычислений описаны математические модели и принцип расчета дисперсии резонатора.

**Третий** раздел описывает сам процесс моделирования распространения импульса. Показано уравнение Луджиато-Лефевра, описаны требуемые характеристики резонатора и изучены основы моделирования в программе ruLLE.

**Четвертый** раздел данной работы является самым ценным с точки зрения практического применения. В первом подразделе рассмотрен основной алгоритм изучения полученных моделей и их оценки. Таким образом, на примере микрорезонатора  $MP_{20}$  был рассмотрен график внутренней дисперсии микрорезонатора  $D_{int}$  (рис. 1), изучены спектры при слабой (50 мВт.), средней (100 мВт.) и мощной (150 мВт.) накачке. Расчет производился при частоте накачки 190.217 ТГц. Начальная расстройка накачки составила 1 ГГц, конечная -3.5 ГГц соответственно.

В этом же подразделе показан график изменения внутррезонаторной мощности для понимания самого процесса усиления сигнала в микрорезонаторе (рис. 2) на отрезке от 0 до 5000 шага вычислений. На нем же продемонстрировано приближение для демонстрации "плавающего" уровня. Данное явление связано с усилением импульса при прохождении по контуру резонатора и дальнейшим высвобождением из контура.

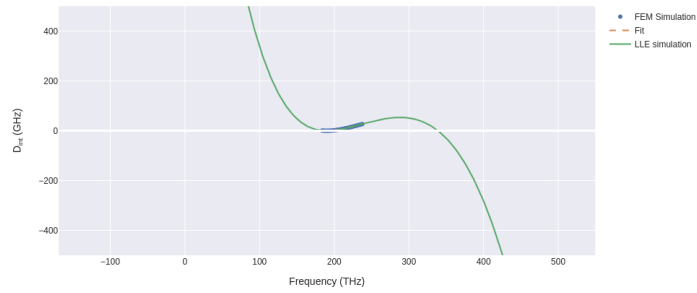


Рисунок 1 — Дисперсия  $D_{int}$  в зависимости от частоты.

График изменения внутриврезонаторной мощности в данной работе будет представлен единожды для подтверждения усиления сигнала внутри резонатора, в дальнейшем анализе он не требуется.

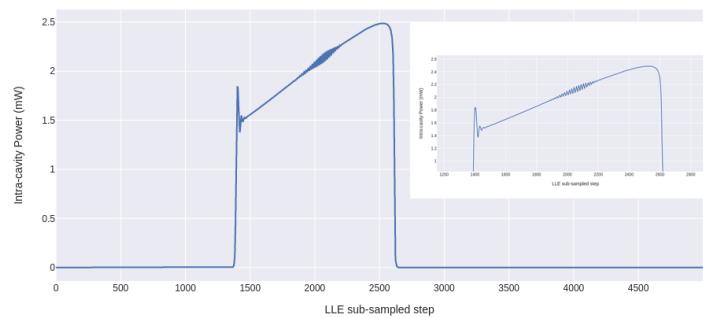


Рисунок 2 — Крупным планом - График изменения внутриврезонаторной мощности относительно номера шага вычисления, уменьшенный вариант - приближение основного графика.

Несмотря на наличие 34 резонансных частот, частотной гребенки получено не было из-за малой мощности накачки (рис. 3). Отчетливо виден "пик" частоты накачки и абсолютно пустой спектр остальных частот.

В данном случае, продемонстрирован пик (частота накачки) на фоне всего спектра частот, из чего можно сделать вывод о недостатке мощности накачки. В дальнейших исследованиях будет использоваться мощность накачки больше 50 мВт.

На основании спектров можно сделать вывод о возможности использования полученных резонаторов в телекоммуникациях, конкретно - при организации WDM систем.

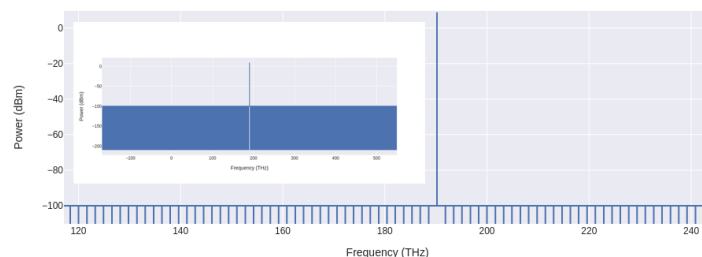


Рисунок 3 — Спектр резонатора  $R=20\text{мкм}$  при мощности накачки в 10 мВт. Крупным планом - приближение в область частот от 120 до 240 ТГц.

Фактически, рассматривать можно конкретно частотные спектры каждого резонатора при разной мощности накачки, т.к. основной критерий - соответствие частотам мультиплексированных систем. В данном случае, резонатор с радиусом  $R = 20$  мкм. при мощности накачки в 10 мВт. использовать нельзя, т.к. генерации оптической гребенки не происходит.

При правильном подборе частоты накачки на выходе из микрорезонатора получится частотная гребенка требуемых частот. Как пример, стоит рассмотреть микрорезонатор с радиусом  $R=26$  мкм.

Главным отличием здесь является разница в спектрах, т.к. теперь на спектре присутствуют частоты от 184 до 238 ТГц. При детальном рассмотрении графика подтверждается возможность использования некоторых частот для телекоммуникационных целей. Как пример - частота 195.8 ТГц. Несмотря на плотный спектр, её можно использовать для организации канала связи.

Для удобства анализа полного списка микрорезонаторов в работе каждому был присвоен соответствующий идентификатор. В данном случае, это будет  $MP_R$ , где  $MP$  - микрорезонатор, а  $R$  - его радиус.

Таким образом, рассмотрено 6 микрорезонаторов, конкретно:

- $MP_{20}$  с радиусом 20 мкм.;
- $MP_{23}$  с радиусом 23 мкм.;
- $MP_{26}$  с радиусом 26 мкм.;
- $MP_{35}$  с радиусом 35 мкм.;
- $MP_{40}$  с радиусом 40 мкм.;
- $MP_{50}$  с радиусом 50 мкм.;

Для каждого из данных микрорезонаторов в работе представлен график зависимости дисперсии от частоты  $D_{int}$  и спектры частот как в общем представлении, так и приближенные к требуемому интервалу значений.

Четвертым разделом выведен **Анализ окончательных результатов**, описывающий возможности применения рассмотренных микрорезонаторов в целях создания полноценных WDM-систем.

Основным результатом проведенной работы стоит считать не только количество возможных для реализации частот, но и их положение относительно общей сетки частот.

Таким образом, микрорезонатор  $MP_{20}$  в режиме средней (100 мВт.) и мощной (150 мВт.) имеет всего 3 частоты из интервала DWDM частот. Преимуществами данного микрорезонатора будут его низкое энергопотребление и размеры конечного модуля.

По сравнению с ним, микрорезонатор  $MP_{23}$  имеет преимущество в виде энергоэффективности, т.к. уже в режиме слабой накачки (50 мВт.) возможна генерация 3 частот из интервала DWDM. По остальным параметрам данные микрорезонаторы схожи.

Микрорезонатор  $MP_{26}$  обладает схожими спектрами - независимо от мощности накачки есть всего 3 частоты в диапазоне DWDM. Однако, резонаторы меньшего размера предпочтительнее в виду конечного размера и энергопотребления.

Увеличение размеров резонатора до  $R = 35$  мкм. не дает ощутимой прибавки в частотном плане. Относительно предыдущих микрорезонаторов, данный обладает 4 частотами в требуемом интервале.

Микрорезонаторы  $MP_{40}$  и  $MP_{50}$  имеют по 6 частот из необходимого интервала.

Рассмотренные выше модули можно применять в области DWDM коммуникаций, так как они соответствуют необходимым требованиям по размерам, добротности и требуемой мощности накачки. Стоит учитывать, что существующие DWDM-модули для генерации 100/200 Гбитс/с канала используют генерацию на одной частоте с отстройкой. Упрощая общее объяснение технологии, модуль генерирует одновременно 4 волны сигнала с минимальной

отстройкой от основной. Также, если длина волны поляризована иначе, то можно на двух поляризациях удвоить передаваемую по каналу информацию.

Таким образом, можно считать, что полученные резонаторы могут одновременно генерировать не только основную волну (что уже реализовано в модулях DWDM) с отстройкой, но и несколько волн с отстройкой одновременно. Для реализации подобного метода необходимо лишь внести к изначальным переменным моделирования отстройку накачки.

Однако, обсуждение выше велось только в случае волн интервала DWDM, что сильно ограничивает область применения данных микрорезонаторов. Если рассматривать полученные результаты в полном интервале WDM систем, то количество возможных вариаций генерации заметно увеличивается. Таким образом, модули на основе данных исследований могут применяться для одновременной генерации в нескольких областях. Как пример, модуль на основе микрорезонатора  $MP_{26}$  может обеспечить передачу полезной информации как в CWDM, так и в DWDM одновременно, на частотах 187.0 и 193.3 ТГц соответственно. Применяя опыт модулей DWDM, данный модуль сможет передавать трафик со скоростью 100 Гбит/с сразу по двум волоконно-оптическим линиям.

Одновременно с этим стоит учитывать, что выбрать лучший из данных результатов нельзя по причине разных размеров и сфер возможного применения.

**Пятый** раздел описывает текущее состояние применения оптических частотных гребенок в WDM-системах. На данный момент все еще ведется изучение возможностей использования, однако в тестовом режиме уже удалось добиться запуска нескольких полноценных каналов с объемом до одного терабита в секунду.

В **заключении** приведены результаты магистерской работы.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В теоретической части работы было проведено исследование систем мультиплексирования по длинам волн. Выявлены основные плюсы данных систем, такие как возможность быстрой организации широкополосных каналов передачи данных и потенциал для расширения и наращивания мощностей уже

существующих систем без необходимости физической перестройки всей линии.

Рассмотрено основное оборудование данных систем и его принцип работы.

В практической части работы исследована связь между параметрами оптического микрорезонатора и его динамики относительно генерации частотной гребенки. Математическая модель была рассмотрена и использована для моделирования внутриврезонаторного поля.

В данной магистерской работе было проведено исследование эффекта формирования оптического импульса в микрорезонаторе из плавленого кварца при его накачке непрерывным лазерным излучением. Данный эффект лежит в основе формирования частотной гребенки в микрорезонаторе.

Рассмотрены решения нелинейного дифференциального уравнения для огибающей импульса (Уравнение Луджиато-Лефевра) и было проведено численное решение этого уравнения с помощью программного обеспечения `ruLLE`.

В качестве рассматриваемого материала микрорезонатора был выбран плавленый кварц в виду его широкого применения в системах спектрального мультиплексирования для передачи данных. В результате моделирования распространения импульсного излучения и непрерывного излучения накачки в резонаторе показано, что при достаточных уровнях накачки происходит генерация оптических частотных гребенок рядом с основной волной накачки. Полученными гребенками можно управлять изменяя мощность либо длину волны накачки резонатора.

Были проанализированы полученные результаты и дано описание по каждому резонатору.

Полученные модели могут быть использованы при проектировании и создании микрорезонаторов в целях использования в телекоммуникациях, т.к. сгенерированные частотные гребенки попадают в определение сетки WDM.