

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 535.5

Решиков
Константин Александрович

Исследование методов и средств стабилизации светомодуляционных
характеристик управляемых оптических резонаторов

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра техники и технологии

по специальности 1-39 81 03 "Информационные радиотехнологии"

Научный руководитель
Конойко Алексей Иванович
канд. физ.-мат. наук, доцент

Минск 2015

ВВЕДЕНИЕ

Методы электрооптической модуляции в настоящее время широко применяются в оптоэлектронных системах различного назначения. Среди них системы обработки и передачи информации, волоконно-оптические системы связи, модуляторы добротности лазерных резонаторов, различные измерительные датчики и т.д.

Электрооптическая модуляция представляет собой изменение параметров оптического сигнала в соответствии с параметрами управляющего электрического поля, что может быть осуществлено с помощью электрооптических эффектов, таких как линейный электрооптический эффект Поккельса и квадратичный электрооптический эффект Керра. Существующие методы электрооптической модуляции позволяют осуществлять амплитудную, фазовую, частотную и поляризационную модуляцию излучения, однако наибольшее распространение получила амплитудная модуляция на основе эффекта Поккельса.

На сегодняшний момент основные задачи развития методов электрооптической модуляции включают в себя:

- достижение больших значений глубины модуляции;
- уменьшение управляющих напряжений;
- расширение частотного диапазона;
- повышение термостабильности;
- повышение стабильности при механических воздействиях.

По принципу работы, положенному в основу функционирования, электрооптические амплитудные модуляторы подразделяются на модуляторы поляризационного и фазового типа.

Принцип работы электрооптических модуляторов поляризационного типа основан на управляемом изменении поляризации проходящего светового пучка. При размещении на выходе поляризационного модулятора анализатора поляризации можно осуществить преобразование поляризационной модуляции в амплитудную. Примером такого модулятора является ячейка Поккельса.

Принцип работы электрооптических модуляторов фазового типа основан на возможности управления при помощи электрооптического эффекта фазой проходящего излучения. Помещение в такие модуляторы оптических резонаторов позволяет на порядки снизить управляющие напряжения.

Однако общим недостатком резонансных электрооптических модуляторов является тот факт, что в реальных условиях работы под воздействием внешних факторов, например, при изменении температуры,

происходит изменение оптической базы резонатора. Это приводит к изменению светомодуляционных характеристик электрооптических модуляторов резонансного типа, что снижает их эффективность и стабильность работы, ограничивая применение в лазерной технике.

Одним из методов, обеспечивающих высокоэффективную амплитудную электрооптическую модуляцию излучения с глубиной модуляции, близкой к единице, является метод модуляции с использованием термостабильного резонатора Фабри-Перо. Такой метод модуляции позволяет получить на порядок меньшие значения управляющего напряжения по сравнению с другими типами электрооптических модуляторов.

Основным элементом электрооптического амплитудного модулятора резонансного типа на базе резонатора Фабри-Перо является резонатор, представляющий собой кристалл с нанесёнными на него частично пропускающими плоскопараллельными зеркалами. Принцип работы резонатора Фабри-Перо основан на многолучевой интерференции светового пучка, многократно переотражаемого зеркалами резонатора. При использовании резонатора Фабри-Перо для целей электрооптической модуляции в качестве кристаллов, заполняющих резонатор, используются такие электрооптические кристаллы, как *KDP*, *DKDP*, *LiNbO₃*, *KTP* и т.д.

Амплитудная модуляция с помощью модуляторов резонансного типа на базе резонатора Фабри-Перо позволяет получать значения глубины модуляции, сколь угодно близкие к единице, при малых значениях управляющих напряжений. Однако крайне низкая температурная стабильность таких модуляторов требует термостабилизации резонатора, что существенно ограничивает их применение на практике.

В литературе имеются данные о получении высокоэффективной амплитудной электрооптической модуляции в электрооптических модуляторах резонансного типа на базе резонатора Фабри-Перо, а также рассмотрены вопросы, связанные с уменьшением управляющего напряжения при сохранении высокой эффективности модулятора. Однако отсутствует рассмотрение вопросов, связанных со стабилизацией светомодуляционных характеристик таких модуляторов без использования термостатической камеры. Поэтому задача разработки и исследования методов и средств стабилизации светомодуляционных характеристик управляемых оптических резонаторов является актуальной.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Резонансные электрооптические модуляторы обладают значительно меньшими значениями управляющих напряжений по сравнению с другими типами электрооптических модуляторов. Однако общим недостатком резонансных электрооптических модуляторов является тот факт, что при их работе в реальных условиях под воздействием внешних факторов, например, при изменении температуры, происходит изменение оптической базы модулирующего резонатора. Это приводит к изменению светомодуляционных характеристик, снижению эффективности и стабильности работы таких модуляторов, что существенно ограничивает их применение в лазерной технике. Поэтому задача поиска методов и средств, позволяющих осуществить стабилизацию светомодуляционных характеристик управляемых оптических резонаторов для целей амплитудной модуляции оптического излучения представляет интерес.

Степень разработанности проблемы

В литературе имеются данные о получении высокоэффективной амплитудной электрооптической модуляции в электрооптических модуляторах резонансного типа на базе резонатора Фабри-Перо, а также рассмотрены вопросы, связанные с уменьшением управляющего напряжения при сохранении высокой эффективности модуляции. Однако на настоящий момент отсутствует рассмотрение вопросов, связанных со стабилизацией светомодуляционных характеристик резонансных электрооптических модуляторов без использования термостатической камеры.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является разработка и исследование методов и средств стабилизации светомодуляционных характеристик объёмных и волоконных управляемых оптических резонаторов. Для достижения данной цели в работе сформулированы **следующие задачи:**

- разработать метод стабилизации светомодуляционных характеристик электрооптического модулятора Фабри-Перо для широкополосного излучения без использования термостатической камеры;
- исследовать влияние различных параметров на величины, характеризующие амплитудную электрооптическую модуляцию при использовании методов стабилизации светомодуляционных характеристик модулятора широкополосного излучения без использования

термостатической камеры;

– разработать метод стабилизации светомодуляционных характеристик электрооптического модулятора Фабри-Перо для узкополосного излучения без использования термостатической камеры;

– исследовать влияние различных параметров на величины, характеризующие амплитудную электрооптическую модуляцию при использовании стабилизации светомодуляционных характеристик модулятора узкополосного излучения без использования термостатической камеры.

Объектом исследования являются объёмные и волоконные оптические модуляторы света резонансного типа с продольным и поперечным электрооптическим эффектом.

Предметом исследования являются методы и средства стабилизации светомодуляционных характеристик объёмных и волоконных оптических модуляторов света резонансного типа с продольным и поперечным электрооптическим эффектом.

Область исследования

Содержание диссертационной работы относится к лазерным и оптическим технологиям, системам и соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) по специальности 1-39 81 03 «Информационные радиотехнологии».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли результаты исследований в области электрооптической амплитудной модуляции в модуляторах резонансного типа. Теоретической основой исследования являются волновая оптика и кристаллооптика. Для построения математических моделей и выполнения расчётов использовался пакет программного обеспечения *MathCAD*.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке и анализе методов стабилизации светомодуляционных характеристик, позволяющих осуществить стабилизированную амплитудную электрооптическую модуляцию с малыми управляющими напряжениями и глубиной модуляции, близкой к единице без использования термостатической камеры.

Личный вклад соискателя

Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Соискателем проработаны теоретические основы методов стабилизации светомодуляционных характеристик резонансных модуляторов широкополосного и узкополосного излучения. Разработаны оптические схемы модуляции, использующие данные методы стабилизации. Созданы математические модели в пакете программного обеспечения *MathCAD*. Исследовано влияние различных параметров на величины, характеризующие электрооптическую амплитудную модуляцию: глубину модуляции, величину управляющего напряжения, эффективность модулятора.

Положения, выносимые на защиту

1. Стабилизация светомодуляционных характеристик резонансного модулятора широкополосного излучения с продольным электрооптическим эффектом на базе резонатора Фабри-Перо может быть осуществлена путём реализации оптической схемы с двукратным прохождением световым пучком резонатора с взаимно ортогональными поляризациями в прямом и обратном ходе.

2. При использовании разработанного метода стабилизации светомодуляционных характеристик резонансного модулятора широкополосного излучения значение управляющего напряжения может быть снижено до величины порядка 190 В с сохранением стабилизации в случае использования продольного электрооптического эффекта в кристаллах *DKDP*.

3. Стабилизация светомодуляционных характеристик резонансного модулятора узкополосного излучения на базе резонатора Фабри-Перо может быть осуществлена с использованием двух идентичных резонаторов и цепи коррекции.

4. При использовании разработанного метода стабилизации светомодуляционных характеристик резонансного модулятора узкополосного излучения значение управляющего напряжения может быть снижено до величины порядка 7,7 В с сохранением стабилизации в случае использования поперечного электрооптического эффекта в кристаллах *LiNbO₃*.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в разработке и исследовании новых методов и средств, позволяющих осуществить высокоэффективную электрооптическую амплитудную модуляцию оптического излучения с глубиной модуляции, близкой к единице, при малых управляющих напряжениях.

Электрооптические модуляторы, использующие данные методы стабилизации, могут найти применение в качестве термостабильных средств модуляции оптического излучения с малыми управляющими напряжениями в волоконно-оптических линиях связи, модуляторах добротности лазерных резонаторов и системах оптической обработки информации.

Апробация и внедрение результатов исследования

Результаты исследования были представлены на 51-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (13-17 апреля 2015 г, Минск) и опубликованы в журнале «Проблемы физики, математики и техники», №4 (21), 2014.

Структура и объем работы.

Работа состоит из общей характеристики, введения, пяти глав исследования, заключения, библиографического списка и графического материала. Общий объем диссертации составляет 58 страниц. Работа содержит 3 таблицы, 41 рисунок. Библиографический список включает 44 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **общей характеристике работы** указана актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования. Указаны научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, а также личный вклад соискателя. Приведены положения, выносимые на защиту.

Во **введении** рассмотрены основные задачи развития методов электрооптической модуляции в настоящее время, обоснована актуальность исследования методов и средств, позволяющих осуществить стабилизацию светомодуляционных характеристик электрооптических модуляторов резонансного типа.

Первая глава содержит обзор литературы по теме диссертационного исследования. Приведено краткое теоретическое описание линейного электрооптического эффекта Поккельса, наиболее широко применяемого для целей электрооптической модуляции. Рассмотрено современное состояние развития темы исследования. Приведены известные схемы электрооптической модуляции с компенсацией естественной анизотропии и упругооптического эффекта. Описана известная схема термостабильного электрооптического модулятора поляризационного типа, позволяющего осуществлять

амплитудную модуляцию с глубиной до 80%. Приведена схема амплитудного электрооптического модулятора резонансного типа на базе двух резонаторов Фабри-Перо с поляризационной фильтрацией паразитных световых пучков.

Во второй главе рассматривается метод стабилизации светомодуляционных характеристик электрооптического модулятора широкополосного излучения резонансного типа на базе резонатора Фабри-Перо.

Для осуществления стабилизации светомодуляционных характеристик используется схема модулятора с двукратным прохождением световым пучком резонатора Фабри-Перо, осуществляющего для двух ортогонально поляризованных волн противоположные по знаку фазовые сдвиги между интерферирующими лучами. Схема такого модулятора приведена на рисунке 1.

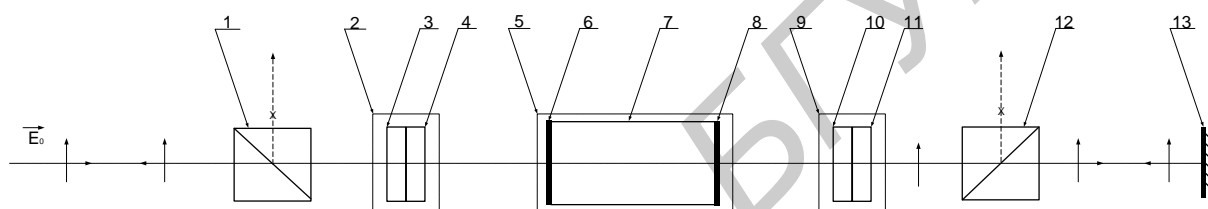


Рисунок 1 – Оптическая схема модулятора

Входное широкополосное излучение, пройдя анализатор 1 и вращатель плоскости поляризации 2, попадает в резонатор Фабри-Перо 5, образованный зеркалами 6,8 и кристаллом DKDP z -среза 7. При этом плоскость поляризации пучка повернута на угол 45° по отношению к исходной. В резонаторе 5 световой пучок испытывает многократное переотражение на его зеркалах. Таким образом, выходное излучение резонатора Фабри-Перо определяется результатом многолучевой интерференции. Пройдя вращатель плоскости поляризации 9 и анализатор 12 в прямом ходе, световой пучок отражается от глухого зеркала 13 и проходит элементы 12 и 9 в обратном порядке, снова попадая в резонатор. При этом плоскость поляризации светового пучка при прохождении резонатора в обратном ходе ортогональна плоскости поляризации пучка в прямом ходе. Вращатели 2,9 состоят из $\lambda/4$ -фазовых элементов 3,4 и 10,11 соответственно, ориентированных под углом 45° друг к другу. Оси индикатрисы показателей преломления фазовых элементов 3,11 ориентированы к плоскости поляризации падающего светового пучка под углом 45° . При таком расположении элементов вращатели 2,9, кроме поворота плоскости поляризации, осуществляют, совместно с анализаторами 1,12, фильтрацию паразитных световых пучков.

При приложении электрического поля вдоль оси z кристалла DKDP изменяется его индикатриса показателя преломления. Значения

показателя преломления для световых пучков в прямом ($n_{x'}$) и обратном ($n_{y'}$) ходе изменяются следующим образом:

$$\begin{aligned}n_{x'} &= n_0 + 0,5n_0^3 r_{63} E_z, \\n_{y'} &= n_0 - 0,5n_0^3 r_{63} E_z,\end{aligned}\tag{1}$$

где n_0 – показатель преломления обыкновенного луча при отсутствии электрического поля; r_{63} – электрооптический коэффициент; E_z – напряженность поля вдоль оси z кристалла.

Результирующая характеристика пропускания резонатора является произведением его характеристики пропускания в прямом ходе на характеристику пропускания в обратном ходе. При приложении электрического поля характеристики пропускания в прямом и обратном ходе смещаются по длине волны в противоположные стороны вследствие противоположных знаков изменения показателя преломления для соответствующих плоскостей поляризации. Это приводит к смещению максимумов двух характеристик пропускания друг относительно друга и уменьшению, вследствие этого, выходной мощности излучения. Таким образом осуществляется амплитудная модуляция входного излучения. Достижимая глубина модуляции при этом может быть сколь угодно близка к единице.

Стабилизация светомодуляционных характеристик в данной схеме обеспечивается тем, что, в случае изменения оптической длины кристалла *DKDP* при изменении его температуры, вызванное этим изменение показателя преломления одинаково по величине и по знаку для излучения обеих поляризаций. Таким образом, максимумы и минимумы характеристик пропускания в прямом и обратном ходе при изменении температуры одинаково смещаются по длине волны, не смещаясь друг относительно друга. Как результат, изменение температуры приводит лишь к смещению результирующей характеристики пропускания резонатора и спектра выходного широкополосного излучения по длине волны, но не приводит к изменению суммарной выходной мощности излучения, которая в данном случае зависит только от взаимного расположения характеристик одна относительно другой.

Таким образом, рассмотренный метод позволяет осуществить стабилизацию светомодуляционных характеристик резонансного электрооптического модулятора широкополосного излучения.

В третьей главе приведён анализ светомодуляционных характеристик для схемы модуляции, использующей описанный во второй главе метод стабилизации. Исследовано влияние таких параметров, как ширина спектра входного излучения и коэффициент отражения зеркал на величины,

характеризующие электрооптическую амплитудную модуляцию: глубину модуляции, величину управляющего напряжения, эффективность модулятора. Приведены графики соответствующих зависимостей.

Сделан вывод о том, что, при использовании данного метода стабилизации светомодуляционных характеристик резонансного модулятора широкополосного излучения на базе резонатора Фабри-Перо, значение управляющего напряжения может быть снижено до величины порядка 190 В с сохранением стабилизации в случае использования продольного электрооптического эффекта в кристаллах *DKDP*.

Увеличение коэффициента отражения зеркал резонатора позволяет уменьшить величину управляющего напряжения. При этом значение глубины модуляции стремится к единице, однако величина эффективности модулятора снижается. Это приводит к необходимости поиска компромисса между величиной управляющего напряжения и эффективностью модулятора при практическом использовании данного метода.

В четвёртой главе рассматривается метод стабилизации светомодуляционных характеристик электрооптического модулятора узкополосного излучения резонансного типа на базе резонатора Фабри-Перо.

Осуществить стабилизацию светомодуляционных характеристик такого модулятора можно с использованием двух идентичных резонаторов Фабри-Перо, работающих в одинаковых условиях, и цепи коррекции.

Соответствующая оптическая схема приведена на рисунке 2.

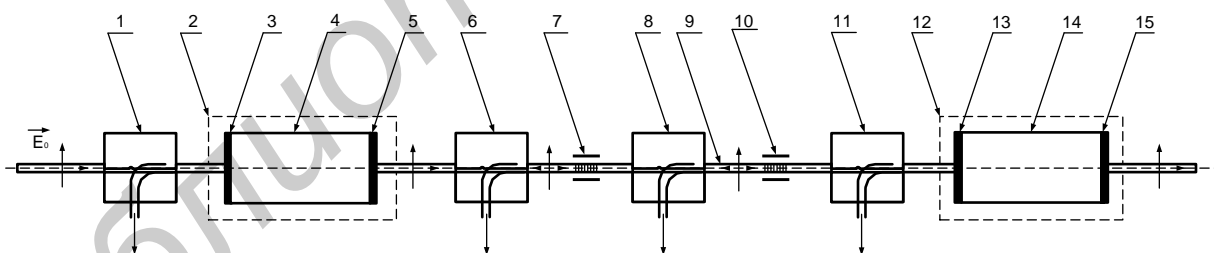


Рисунок 2 – Оптическая схема модулятора

Контрольный резонатор 2, образованный зеркалами 3, 5 и электрооптическим элементом 4, служит для обнаружения изменений температуры. Модулирующий резонатор 12, идентичный резонатору 2, служит непосредственно для осуществления амплитудной модуляции проходящего излучения. В качестве электрооптического элемента в обоих резонаторах используется кристалл ниобата лития $LiNbO_3$, работающий в режиме поперечного электрооптического эффекта. Электрическое поле приложено вдоль оси z кристалла, свет поляризован вдоль оси z и распространяется перпендикулярно ей. При такой ориентации значение показателя преломления

светового пучка изменяется по формуле:

$$n_z = n_e - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z, \quad (2)$$

где n_e – показатель преломления необыкновенного луча при отсутствии электрического поля; r_{33} – электрооптический коэффициент; E_z – напряженность поля вдоль оси z кристалла.

Входное излучение проходит ответвитель 1 и контрольный резонатор 2. База резонатора 2 подобрана таким образом, что полосе спектра, занимаемой входным излучением, соответствуют три максимума характеристики светопропускания резонатора (рисунок 3). Спектр выходного излучения резонатора 2 при этом принимает вид трёх мод (рисунок 4). При дальнейшем распространении излучения боковые моды отражаются подобранными по длине волны брэгговскими решётками 7 и 10 соответственно и через ответвители 6 и 8 покидают оптическую схему. Излучение центральной моды, проходя ответвитель 11 в прямом ходе, попадает в модулирующий резонатор 12. Ответвитель 1 служит для фильтрации излучения, отражённого входным зеркалом 3 резонатора 2, для исключения паразитной обратной связи между резонатором 2 и резонатором лазерного источника. Ответвитель 11 служит для фильтрации излучения, отражённого входным зеркалом 13 резонатора 12.

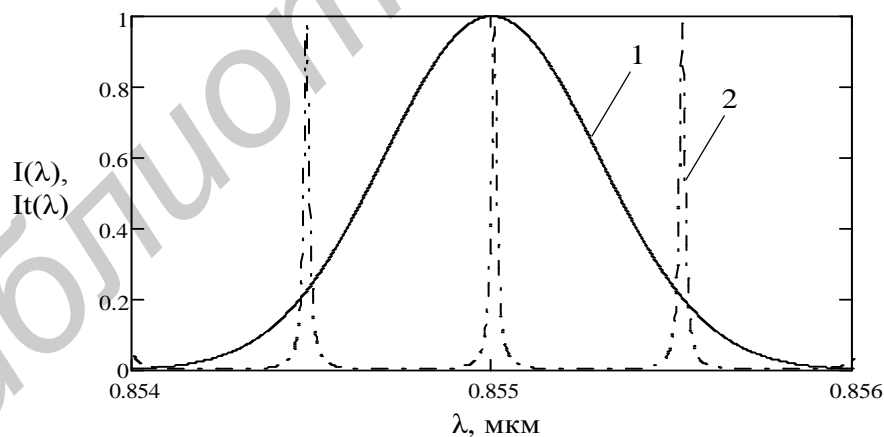


Рисунок 3 – Спектр входного излучения (1) и характеристика светопропускания резонатора (2)

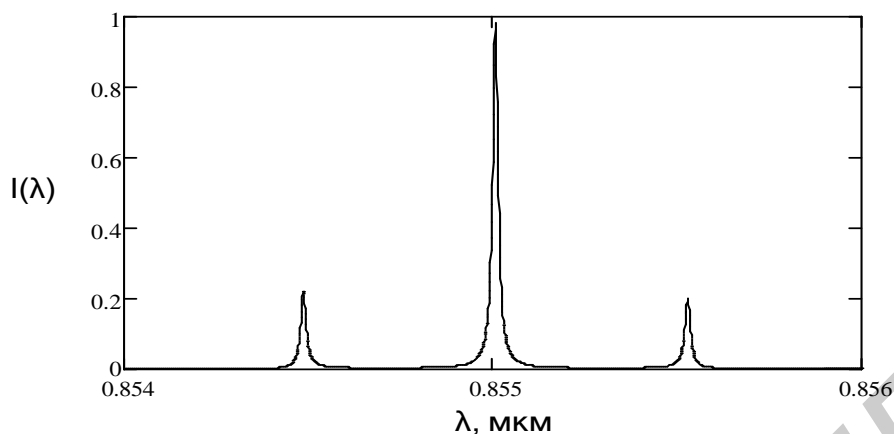


Рисунок 4 – Спектр выходного излучения контрольного резонатора

Приложение модулирующего напряжения к электродам резонатора 12 приводит к изменению его базы вследствие изменения показателя преломления кристалла. Это приводит к смещению характеристики светопропускания резонатора относительно спектра его входного излучения и снижению мощности излучения на выходе модулятора. Таким образом осуществляется амплитудная модуляция излучения.

При изменении температуры база обоих резонаторов изменяется одинаково. При этом характеристика пропускания смещается по длине волны. Это приводит к тому, что спектр выходного излучения контрольного резонатора изменяет свой вид (рисунки 5, 6). Таким образом, при изменении температуры мощность излучения одной из боковых мод становится больше мощности другой боковой моды, что позволяет детектировать изменение температуры.

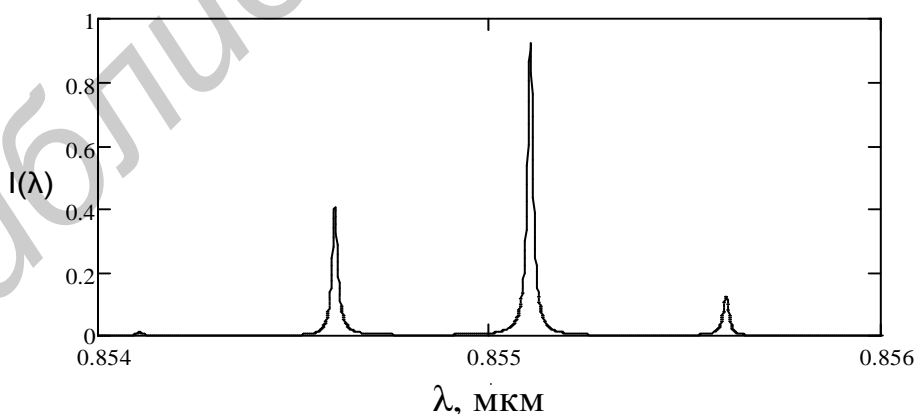


Рисунок 5 – Спектр выходного излучения контрольного резонатора при увеличении базы

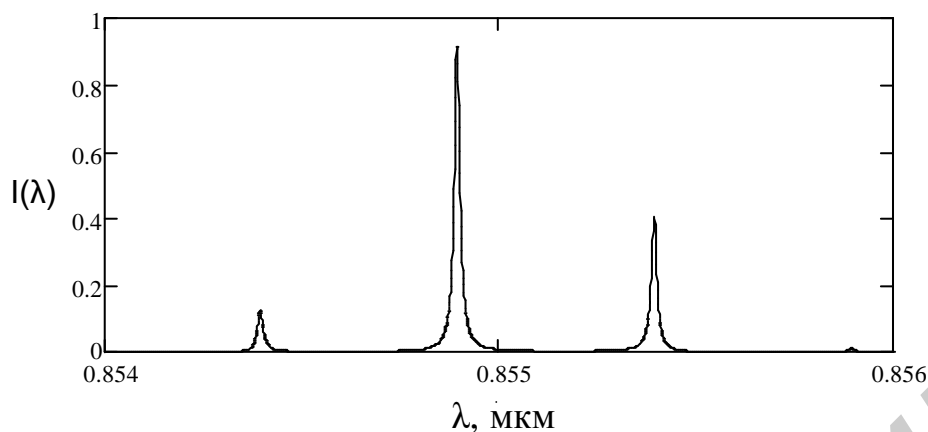


Рисунок 6 – Спектр выходного излучения контрольного резонатора при уменьшении базы

Мощности боковых мод измеряются на выходах ответвителей 6 и 8, и полученные значения используются для формирования напряжения, корректирующего базу резонаторов. Это напряжение подаётся на оба резонатора и стабилизирует их рабочую точку.

Таким образом, в рассмотренной схеме осуществляется стабилизация светомодуляционных характеристик электрооптического модулятора узкополосного излучения резонансного типа на базе резонатора Фабри-Перо путём стабилизации рабочей точки модулирующего резонатора.

В пятой главе приведен анализ светомодуляционных характеристик для схемы модуляции, описанной в четвёртой главе. Исследовано влияние коэффициента отражения зеркал на величины, характеризующие амплитудную электрооптическую модуляцию: глубину модуляции, величину управляющего напряжения, эффективность модулятора. Приведены графики соответствующих зависимостей.

Сделан вывод о том, что при использовании данного метода стабилизации светомодуляционных характеристик резонансного модулятора узкополосного излучения на базе резонатора Фабри-Перо значение управляющего напряжения может быть снижено до величины порядка 7,7 В с сохранением стабилизации в случае использования поперечного электрооптического эффекта в кристаллах $LiNbO_3$.

Увеличение коэффициента отражения зеркал позволяет уменьшить величину необходимого управляющего напряжения. При этом значение глубины модуляции стремится к единице. Однако при этом снижается значение эффективности модулятора. Поэтому при использовании данного метода модуляции необходимо искать компромисс между величиной управляющего напряжения и значением эффективности модулятора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Стабилизация светомодуляционных характеристик резонансного модулятора широкополосного излучения с продольным электрооптическим эффектом на базе резонатора Фабри-Перо может быть осуществлена путём реализации оптической схемы с двукратным прохождением световым пучком резонатора с взаимно ортогональными поляризациями в прямом и обратном ходе.

2. При использовании разработанного метода стабилизации светомодуляционных характеристик резонансного модулятора широкополосного излучения на базе резонатора Фабри-Перо значение управляющего напряжения может быть снижено до величины порядка 190 В с сохранением стабилизации в случае использования продольного электрооптического эффекта в кристаллах *DKDP*.

3. Стабилизация светомодуляционных характеристик резонансного модулятора узкополосного излучения на базе резонатора Фабри-Перо может быть осуществлена с использованием двух идентичных резонаторов Фабри-Перо и цепи коррекции.

4. При использовании разработанного метода стабилизации светомодуляционных характеристик резонансного модулятора узкополосного излучения на базе резонатора Фабри-Перо значение управляющего напряжения может быть снижено до величины порядка 7,7 В с сохранением стабилизации в случае использования поперечного электрооптического эффекта в кристаллах *LiNbO₃*.

5. Полученные в работе результаты могут быть использованы для создания термостабильных средств модуляции оптического излучения с малыми управляющими напряжениями в волоконно-оптических линиях связи, модуляторах добротности лазерных резонаторов и системах оптической обработки информации.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1– А] Пилипович, В. А. Метод стабилизации светомодуляционных характеристик электрооптического модулятора Фабри-Перо для широкополосного излучения/ В. А. Пилипович, В. Б. Залесский, А. И. Конойко, В. М. Кравченко, К. А. Решиков //Проблемы физики, математики и техники. – 2014.– №4 (21).– С.30 –35.

[2– А] Решиков, К. А. Стабилизация светомодуляционных характеристик электрооптического модулятора на базе резонатора Фабри-Перо для одномодового узкополосного излучения/ К. А. Решиков //Сборник материалов 51-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Секция «Радиотехнические системы».