

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Базовая кафедра компьютерной
физики и метаматериалов
в Саратовском филиале
Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

**ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА МОД ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ
ОПТИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 254 группы
по направлению 03.04.02 «Физика» физического факультета
Животкова Даниила Сергеевича

Научный руководитель

Профессор, д.ф.-м.н. _____ Е.А. Романова

Зав. кафедрой

Профессор, д.ф.-м.н. _____ В.М. Аникин

Саратов 2016

Введение

Интенсивное развитие интегральной оптики и нанотехнологий свидетельствует о потребности создания микро- и нано- размерных оптических устройств, что объясняется относительно низким быстродействием электронных устройств, которое ограничено большим временем рекомбинации электронов. Скорости передачи данных и обработки информации в оптических устройствах могут быть значительно больше. Электроника нового поколения способна заменить крупногабаритные приборы на компактные и эффективные устройства. Новые оптические технологии позволяют создавать нано-размерные оптические объекты и интегрировать их в оптоэлектронные устройства. Такие технологии открывают большие возможности и новые решения в технических и научных задачах. Актуальность этих технологий объясняется, прежде всего, возможностью их реализации.

Оптические микрорезонаторы представляют собой микроразмерные структуры, по периметру которых распространяется электромагнитное излучение. В ВКР рассматриваются оптические микрорезонаторы на основе эффекта шепчущей галереи. Эффект заключается в том, что на длине микрорезонатора должно укладываться целое число длин волн.

Новизна работы заключается в исследовании дисперсионных характеристик микрорезонатора с модами шепчущей галереи из халькогенидного стекла. До этого в литературе встречались оптические микрорезонаторы из плавленого кварца. Халькогенидные стекла это высоконелинейные стекла с областью прозрачности в среднем ИК диапазоне.

ВКР состоит из 6 глав: введения, распространение лазерных импульсов в микрорезонаторах, дисперсия в оптическом микрорезонаторе, дисперсионные характеристики МШГ бесконечного диэлектрического цилиндра, заключение и список литературы.

Цель данной квалификационной работы состоит в том, чтобы определить возможность использования дисперсии групповой скорости мод шепчущей галереи микрорезонатора из оптического стекла для компенсации дисперсии показателя преломления.

Задачи данной работы:

1. Изучить теоретическую модель Луджиато-Лефевра распространения лазерных импульсов в оптических микрорезонаторах.
2. Изучить дисперсионные и нелинейные свойства оптических стекол.
3. Освоить методику решения характеристического уравнения для мод шепчущей галереи в модели бесконечного диэлектрического цилиндра.
4. Рассчитать коэффициенты дисперсии групповой скорости и добротность мод шепчущей галереи в области прозрачности оптических стекол без учета дисперсии показателя преломления.
5. Рассчитать коэффициенты дисперсии групповой скорости мод шепчущей галереи в области прозрачности оптических стекол с учетом дисперсии показателя преломления для цилиндров с различным радиусом.
6. Сделать выводы о возможности использования дисперсии групповой скорости мод шепчущей галереи микрорезонатора из оптического стекла для компенсации дисперсии показателя преломления.

Основное содержание работы

Во 2-й главе ВКР рассматривается уравнение Луджиато-Лефевра, которое служит для описания распространения электромагнитного излучения в микрорезонаторе. Детальное рассмотрение этого уравнения приводит к тому, что можно получить солитонный режим. Важно понимать, что получаемые солитоны зависят от баланса дисперсии групповой скорости β_2 и нелинейного параметра γ . Поскольку оптические стекла обычно имеют $\gamma > 0$, то дисперсия должна быть аномальной - $\beta_2 < 0$.

В этой главе рассматриваются также свойства халькогенидных стекол. Главной особенностью халькогенидных стекол является их большая оптическая нелинейность третьего порядка и высокая прозрачность в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне длин волн. Линейный показатель преломления и керровская постоянная халькогенидных стекол имеют большие значения по сравнению с плавленым кварцем и другими видами оптических стекол. Даются определения материальной дисперсии и приводятся дисперсионные кривые.

Материальная дисперсия может быть определена как зависимость показателя преломления от длины волны. Для описания материальной дисперсии в халькогенидных стеклах обычно используют формулы Зельмейера, имеющие вид степенного ряда:

$$n^2 = 1 + \sum_i \frac{A_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - B_i^2},$$

где A_i и B_i - коэффициенты Зельмейера. Они зависят от материала, из которого изготовлен волновод или резонатор. В таблице 1 представлены коэффициенты Зельмейера для сульфида мышьяка (As_2S_3), селенида мышьяка (As_2Se_3), плавленого кварца (SiO_2).

Коэффициент дисперсии групповой скорости:

$$D = - \frac{1}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}.$$

Таблица 1 - Коэффициенты Зельмейера

	As ₂ S ₃	As ₂ Se ₃	SiO ₂
A ₁	1.8983678	6.74238	0.6961663
A ₂	1.9222979	0.2274	0.4079426
A ₃	0.8765134		0.8974794
A ₄	0.1188704		
A ₅	0.9569903		
B ₁	0.15	0.32474	0.0684043
B ₂	0.25	22.54	0.1162414
B ₃	0.35		0.8974794
B ₄	0.45		
B ₅	27.3861		

В 3-й главе идет речь непосредственно о дисперсии групповой скорости в оптических микрорезонаторах.

Дисперсия в микрорезонаторе определяется собственными частотами микрорезонатора. Групповая задержка - это время, за которое электромагнитная волна с заданной частотой ω проходит со скоростью света оптический путь L :

$$T_G = \frac{df}{d\omega} = \frac{L(\omega)}{c}.$$

И записывается выражение для дисперсии групповой скорости в микрорезонаторе:

$$D_l = \frac{v_l^2}{2\pi R \cdot c} \cdot \frac{\Delta(\Delta v_l)}{(\Delta v_l)^3}.$$

Собственные частоты оптического микрорезонатора можно найти из условия резонанса :

$$v_l = \frac{l \cdot c}{2\pi R \cdot n(v)}.$$

Это условие резонанса позволяет оценить вклад материальной дисперсии, а геометрическая дисперсия не рассматривается.

Показаны графики разности разностей частот микрорезонатора и дисперсии групповой скорости в области прозрачности оптических стекол.

Кривая параметра дисперсии в микрорезонаторе отличается от параметра материальной дисперсии. Таким образом, при использовании микрорезонатора можно управлять дисперсионной кривой, и в частности, сдвигать положение нуля дисперсии в сторону больших длин волн. Однако, в данной модели не рассматривается геометрическая дисперсия микрорезонатора. Для описания геометрической дисперсии надо перейти к электродинамической модели МШГ в микрорезонаторе.

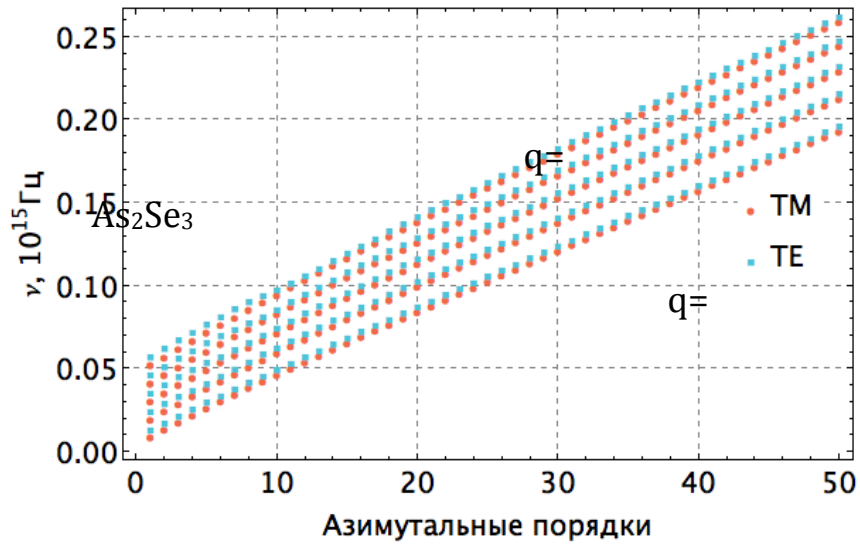
Основная часть 4-й главы посвящена решению электродинамической задачи. Рассмотрим модель МШГ бесконечного диэлектрического цилиндра, которая, по сути, является моделью МШГ двумерного оптического микрорезонатора. Выписываются уравнения Максвелла и записываются в цилиндрических координатах. После чего выписываются характеристические уравнения для ТМ и ТЕ мод:

$$\frac{J_m(kna)}{K_m(ika)} = n \frac{J_m^{\square}(kna)}{K_m^{\square}(ika)}$$

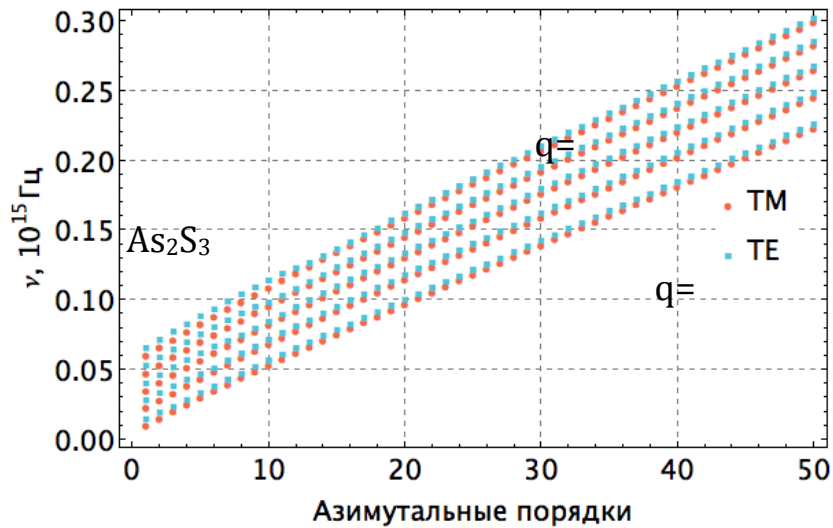
$$\frac{J_m(kna)}{K_m(ika)} = n \frac{J_m^{\square}(kna)}{K_m^{\square}(ika)} .$$

В 4-й главе представлены результаты, а именно дисперсионные характеристики МШГ бесконечного диэлектрического цилиндра. Решим характеристические уравнения относительно частоты ν ($k = 2\pi\nu/c$) для бесконечного диэлектрического цилиндра с радиусом $a=5$ мкм. В качестве материала цилиндра возьмем халькогенидные стекла следующих составов: селенид мышьяка (As_2Se_3) и сульфида мышьяка (As_2S_3). Характеристические уравнения не имеют аналитических решений, поэтому воспользуемся численными методами программного пакета Mathematica.

Были построены собственные резонансные частоты.



(a)



(б)

Рисунок 1. Резонансные частоты ν МШГ бесконечного диэлектрического цилиндра с радиусом $a = 5$ мкм из селенида мышьяка (а) и сульфида мышьяка (б) .

Показаны также модули векторов Умова-Пойтинга для некоторых мод (Рисунок 2), а также графики геометрической и полной дисперсии (Рисунок 3), добротность оптических микрорезонаторов (Рисунок 4).

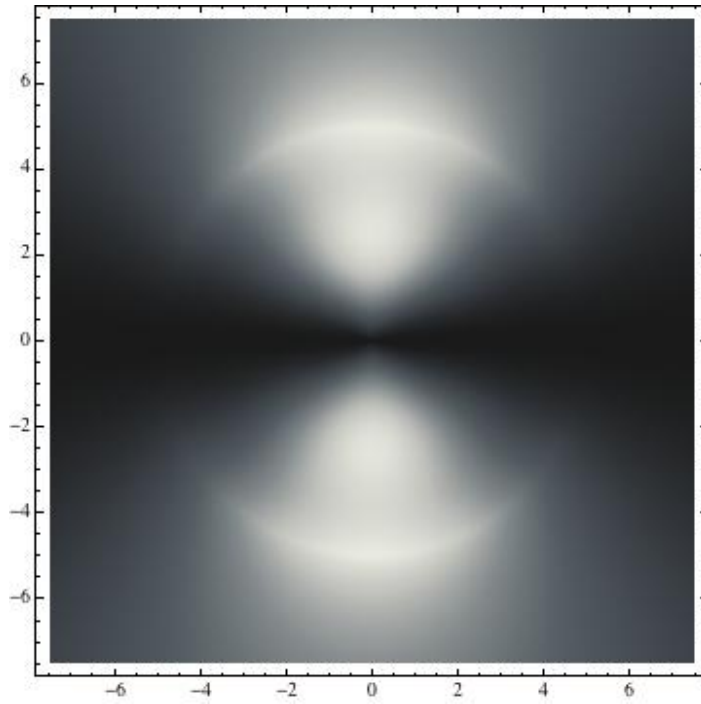
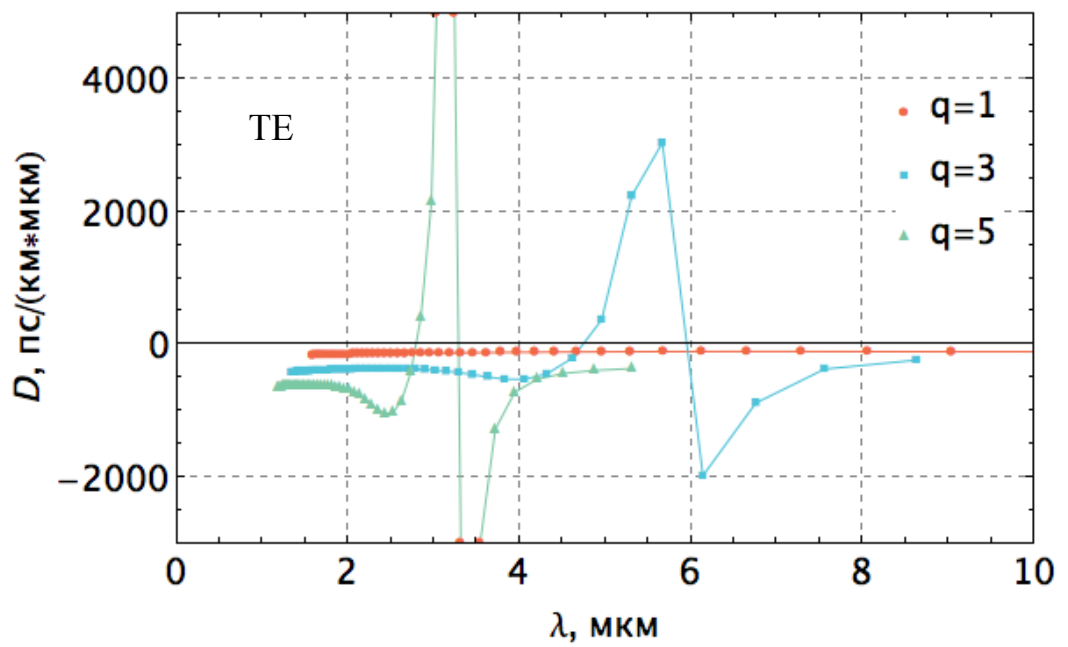
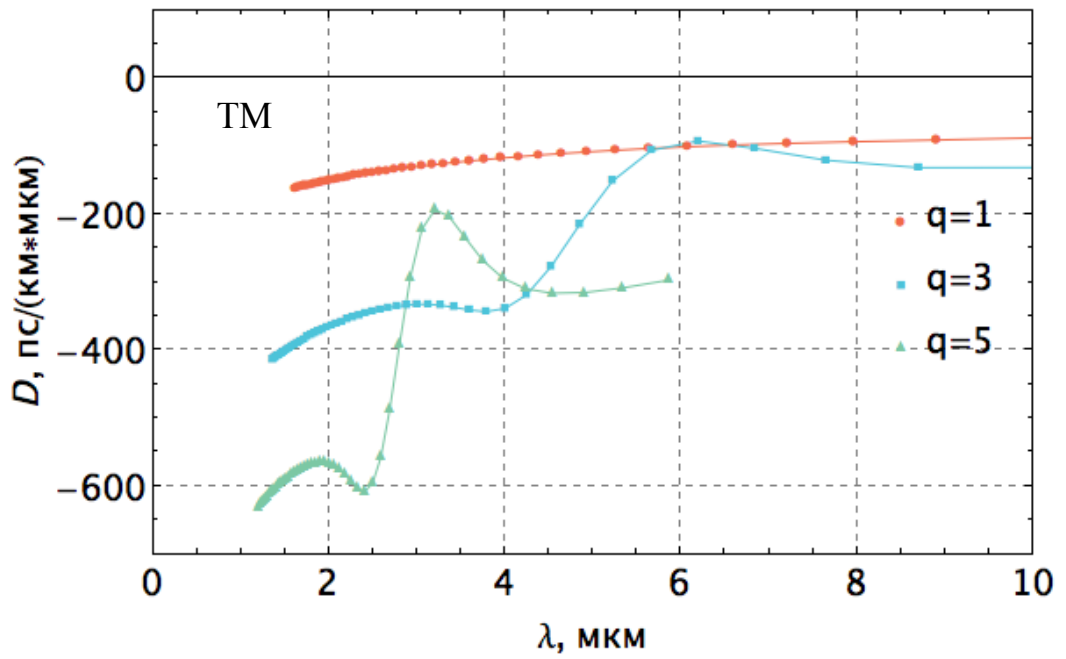


Рисунок 2. Модуль вектора Умова-Пойтинга ТМ моды с $q=1, m=1$

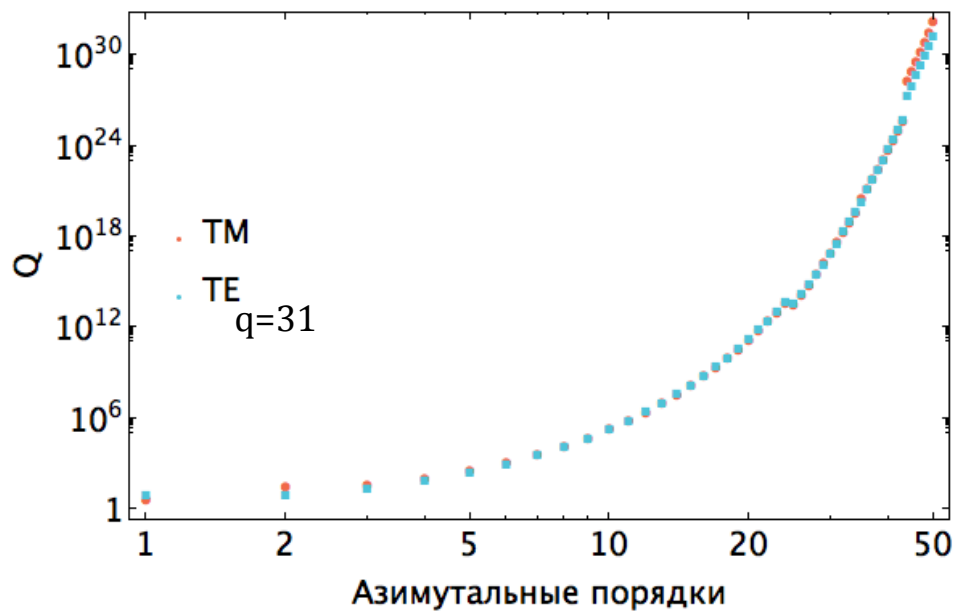


(a)



(б)

Рисунок 3. Зависимость геометрической дисперсии групповой скорости TE (а) и ТМ (б) мод в зависимости от длины волны для цилиндра из селенида мышьяка (As_2Se_3) с радиусом $a = 5$ мкм.



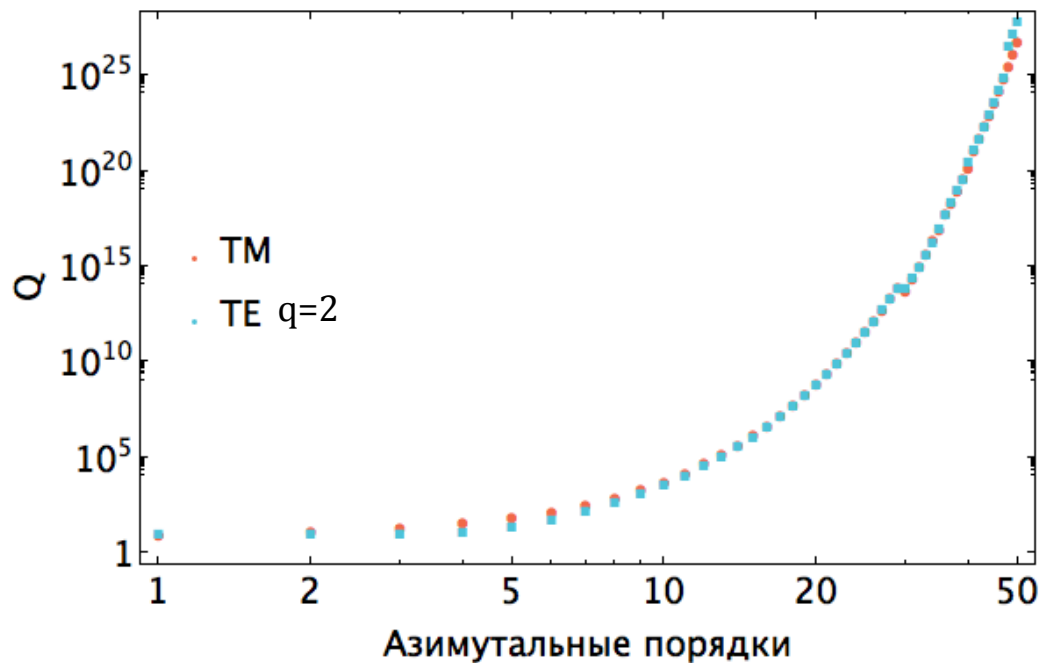


Рисунок 4. Зависимость добротности Q от азимутального порядка ТЕ и ТМ мод, $a = 5$ мкм.

Заключение

В данной квалификационной работе исследованы дисперсионные свойства МШГ в модели бесконечного диэлектрического цилиндра. Были проведены расчеты коэффициента дисперсии групповой скорости в области прозрачности кварцевого стекла и халькогенидных стекол состава селенида мышьяка (As_2Se_3) и сульфида мышьяка (As_2S_3).

Было показано, что используя геометрическую дисперсию МШГ, можно управлять полной дисперсией микрорезонатора. Установлено, что увеличение радиуса микрорезонатора приводит к движению нуля дисперсии в область больших длин волн.

Было показано, что дисперсия групповой скорости ТМ и ТЕ мод ведут себя по разному. Кривая дисперсии ТМ мод находится только в нормальной области, что не дает возможности для формирования солитонов в оптическом микрорезонаторе. Напротив, ТЕ моды имеют скачок в кривой

дисперсии, который дает пересечение в нуле. Таким образом, для TE мод существуют частоты, дисперсия которых лежит в аномальной области, при которых возможен солитонный режим.

Еще одно важное замечание заключается в получении оптических микрорезонаторов с огромной добротностью. Расчеты МШГ, высоких азимутальных порядков, показали огромную добротность до 10^{31} .