

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

Кафедра компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского
филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

СЕНСОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Белоножкиной Ирины Сергеевны,
студентки 2 курса 2225 группы
направления 03.04.02 «Физика» института физики

Научный руководитель –
д.ф.-м.н. профессор Е.А. Романова
Заведующий кафедрой –
д. ф.-м.н. профессор В.М. Аникин

Саратов 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Оптические микрорезонаторы в последнее время стали особым предметом исследования. Кроме того, что они уже играют важную роль в промышленности как элементы лазеров с вертикальным резонатором, они стали важным компонентом в новых технологиях.

Для работы любого оптического квантового генератора необходимо наличие положительной обратной связи, для этого активная среда лазера помещается в оптический резонатор.

Простейшим примером оптического резонатора является резонатор Фабри-Перо. Оптический резонатор Фабри-Перо состоит из двух зеркал, расположенных параллельно на некотором расстоянии, и заполнен некой средой с известным показателем преломления. Современная технология изготовления многослойных диэлектрических покрытий позволяет получить зеркала с большим коэффициентом отражения, так называемые суперзеркала.

Способность резонатора накапливать энергию характеризуется величиной, называемой добротностью Q . Добротность резонатора Фабри-Перо может достигать значений $Q \approx 10^9$.

Несмотря на высокую добротность, резонаторы такого типа не лишены недостатков. Диэлектрические покрытия очень чувствительны к внешним воздействиям и быстро деградируют при обычных условиях. Кроме того, резонаторы Фабри-Перо малых размеров чрезвычайно чувствительны к акустическим колебаниям, что осложняет их использование в большинстве прецизионных экспериментов.

Помимо этих ограничений, добротность обычных квазиодномерных резонаторов прямо пропорционально связана с их линейными размерами, что препятствует значительному сокращению габаритов приборов.

Но с этими недостатками успешно справляются резонаторы на модах шепчущей галереи (МШГ). Они вполне могут прийти на смену резонаторам Фабри-Перо в микрооптике

Цель работы:

Целью данной магистерской работы является изучение теории и технологии изготовления микрорезонаторов из оптических стекол, а также исследование возможности использования халькогенидного микрорезонатора в качестве сенсорного элемента оптического датчика для спектроскопии среднего ИК диапазона.

Задачи:

1. Изучить теоретические модели описания электромагнитного излучения в оптических микрорезонаторах. Провести расчет резонансных частот и добротностей для мод шепчущей галереи в двумерной модели микрорезонатора из халькогенидного стекла.

2. Исследовать спектральные зависимости параметра дисперсии групповой скорости для мод шепчущей галереи в двумерной модели микрорезонатора из халькогенидного стекла.

3. Ознакомиться с технологией изготовления микрорезонатора на торце волоконного световода.

4. Изучить функционирование халькогенидного микрорезонатора как сенсорного элемента спектроскопического датчика.

Структура и объём работы

Дипломная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объём работы составляет 53 страницы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Во введении обосновывается актуальность работы, обсуждается практическая значимость полученных результатов.

В первой главе описываются общие сведения об оптических микрорезонаторах.

Добротность оптических микрорезонаторов определяется потерями энергии по тем или иным причинам. Поскольку потери энергии складываются, полная добротность будет иметь следующий вид:

$$\frac{1}{Q_{\Sigma}} = \frac{1}{Q_{\text{изл}}} + \frac{1}{Q_{\text{вн}}} + \frac{1}{Q_{\text{пов}}} + \frac{1}{Q_{\text{окр}}} + \frac{1}{Q_{\text{св}}},$$

где

$$Q_{\Sigma} = \omega \frac{\text{энергия, запасенная в резонаторе}}{\text{мощность потерь}}$$

Материальная дисперсия определяется как зависимость показателя преломления от длины волны. С целью отображения материальной дисперсии как правило применяются формулы Зельмейера в варианте степенного ряда

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

где A_i и B_i - коэффициенты Зельмейера. Они зависят от материала, из которого изготовлен волновод.

Дисперсия оптического микрорезонатора будет зависеть от разности собственных частот микрорезонатора, которые определяются по формуле:

$$\nu_l = \frac{l \cdot c}{2\pi R \cdot n(\nu)},$$

Во второй главе описывается технология изготовления оптических сферических микрорезонаторов.

Была разработана оригинальная методика создания микросфер на торце халькогенидного волокна с учетом особенностей халькогенидного стекла: низкая по сравнению с кварцевым стеклом температура плавления ($T_g \sim 2000$), окисление при нагревании и плавлении. В связи с этим халькогенидные микросферы не могут изготавливаться методом нагрева торца волокна в открытом пламени, как кварцевые микросферы. В настоящее время для изготовления халькогенидных микросфер используется нагрев лазерным источником, что описано в [2], а также контактный нагрев тепловым источником [3]. В разработанной методике осуществляется бесконтактный нагрев торца волокна потоком нагретого инертного газа. Ниже приводится краткое описание этой методики.

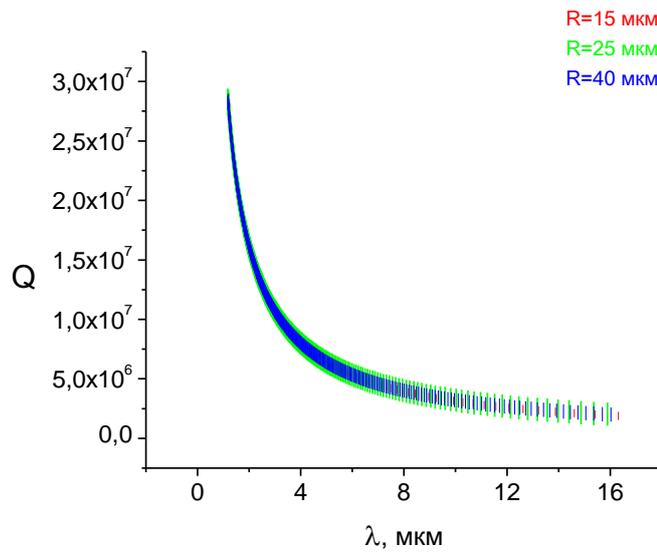
Конец халькогенидного волокна помещался в нагретый поток инертного газа (аргон) для того, чтобы предотвратить окисление стекла при нагреве. Для подвода инертного газа использовалась латунная трубка, которая нагревалась с помощью кислородной горелки. Движение торца волокна контролировалось по вертикальной и горизонтальной оси вручную при помощи подвижки. Торцы перемещались вниз до момента начала плавления стекла и образования капли, а затем быстро перемещались вверх. Формирование микросферы на торце происходило при остывании расплава под действием сил поверхностного натяжения.

В третьей главе описываются свойства мод шепчущей галереи.

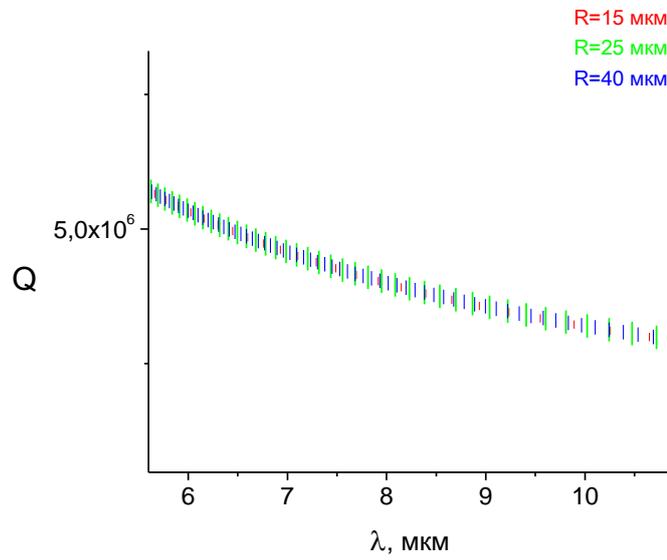
Рассчитаем резонансные частоты микрорезонаторов в области их прозрачности, и вычислим их добротность. Коэффициент поглощения стекла возьмем равным $\alpha = 0.5756 * 10^{-6} \text{ мкм}^{-1}$ во всей области прозрачности.

На рисунках 1 и 2 показаны резонансные длины волн и соответствующие им добротности для резонаторов различного радиуса.

Сравнивая графики на рисунках видно, что добротность на резонансных длинах волн микрорезонатора из стекла состава $\text{As}_{30}\text{Se}_{50}\text{Te}_{20}$ несколько превышает добротность на резонансных длинах волн микрорезонатора из стекла состава $\text{As}_{40}\text{Se}_{20}\text{Te}_{40}$. На графиках также можно заметить, что межчастотный интервал уменьшается при увеличении радиуса микросферы.

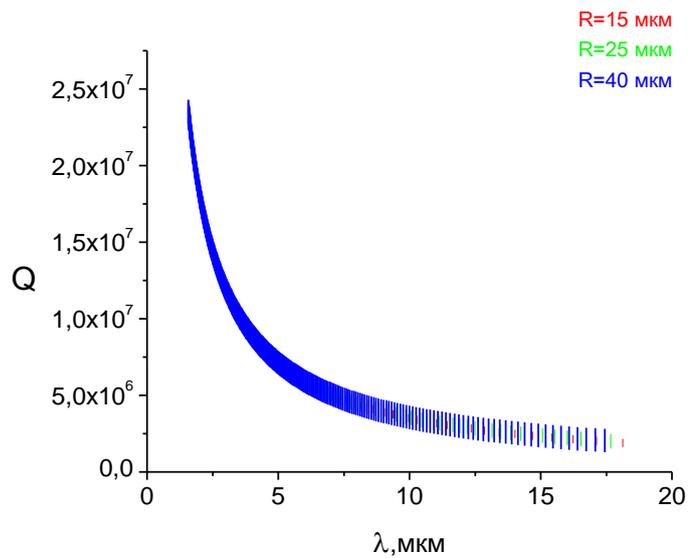


a)

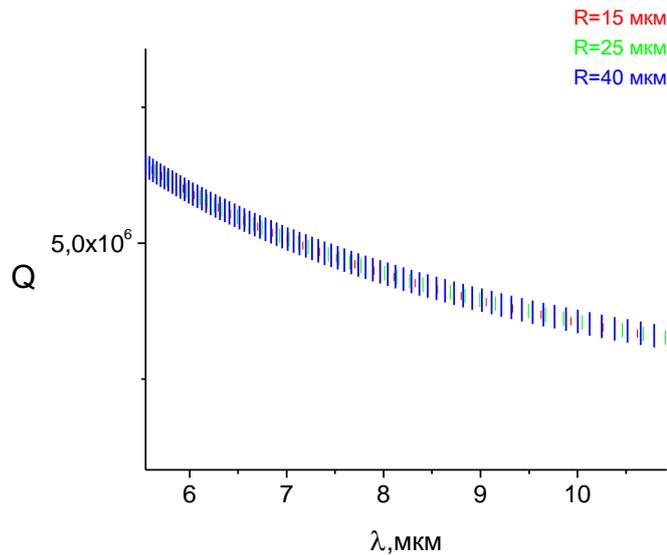


б)

Рисунок 1. Добротность микрорезонатора из стекла состава $\text{As}_{30}\text{Se}_{50}\text{Te}_{20}$, рассчитанная для резонансных длин волн



а)



б)

Рисунок 2. -Добротность микрорезонатора из стекла состава $As_{40}Se_{20}Te_{40}$, рассчитанная для резонансных длин волн

В четвертой главе рассматривается возможность применения оптических микрорезонаторов в качестве чувствительных элементов спектроскопических датчиков среднего ИК диапазона.

В качестве исследуемой жидкой среды использовалось дизельное топливо, в которое была добавлена присадка «антигель» в малых концентрациях. Коэффициент поглощения исследуемой жидкости определялся путем измерения спектров пропускания $T(\lambda)$ образцов дизельного топлива с известной объемной концентрацией C^a присадки в кювете с толщиной d , варьируемой в пределах от 10 до 100 мкм. На Рисунке 3а показаны

спектральные зависимости коэффициентов поглощения $\alpha(\lambda) = -\ln(T(\lambda))/d$ чистого дизельного топлива и чистой присадки, полученные в кювете с $d=11$ мкм. Для химического анализа была выбрана полоса поглощения присадки с максимальной длиной волны $\lambda_a=7.83$ мкм. По результатам измерения пропускания был построен калибровочный график (рисунок 3б), который хорошо аппроксимируется линейной зависимостью.

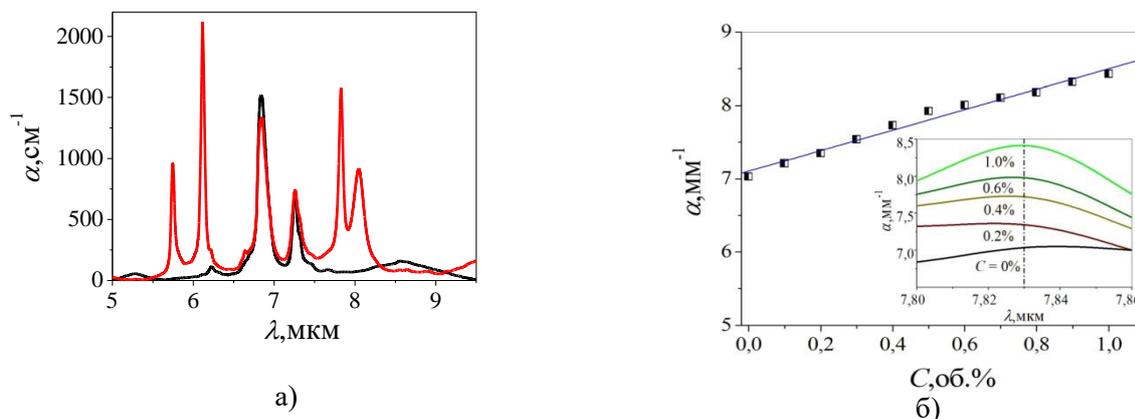


Рисунок 3. Спектральная зависимость коэффициента поглощения дизельного топлива (черная линия) и присадки (красная линия), $d=11$ мкм (а); коэффициент поглощения дизельного топлива с присадкой в зависимости от концентрации присадки, $\lambda_a=7.83$ мкм (б). Вкладка: коэффициент поглощения объемных образцов вблизи λ_a при различных концентрациях присадки, $d=80$ мкм.

Рассчитаем добротность резонатора с учётом потерь при поглощении в дизельном топливе с присадкой в различных концентрациях.

На рисунках 4 и 5 представлены графики зависимости добротности микрорезонатора от длины волны для различных концентраций присадки и, соответственно, коэффициентов поглощения α . Добротность рассчитана для следующих концентраций $C_1 = 0\%$ ($\alpha=7.1$ мм⁻¹), $C_2 = 0.5\%$ ($\alpha = 7.8$ мм⁻¹), $C_3 = 1\%$ ($\alpha = 8.5$ мм⁻¹).

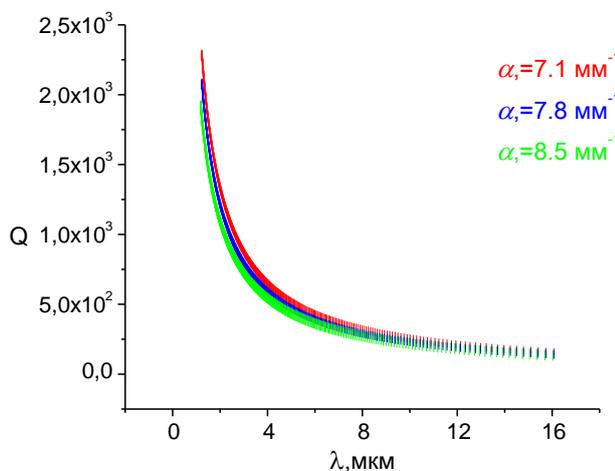


Рисунок 4 Добротность микрорезонатора из стекла состава $As_{30}Se_{50}Te_{20}$ с радиусом $R=40$ мкм, рассчитанная на резонансных длинах волн для различных коэффициентов поглощения раствора

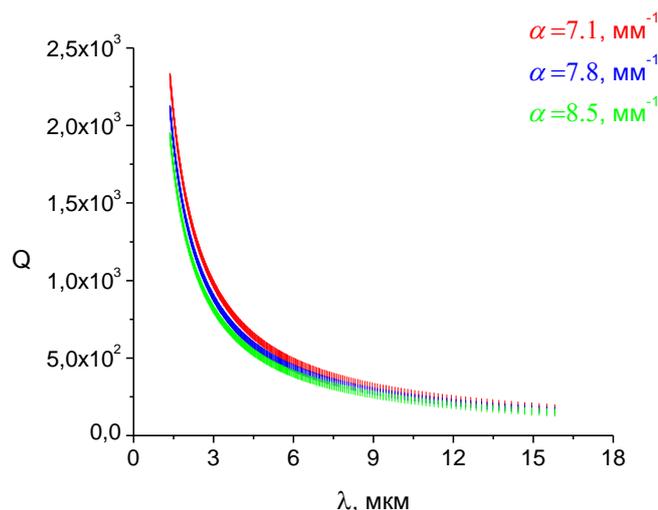


Рисунок 5. Добротность микрорезонатора из стекла состава $As_{40}Se_{20}Te_{40}$ с радиусом $R=40$ мкм, рассчитанная на резонансных длинах волн для различных коэффициентов поглощения раствора

ВЫВОДЫ

Установлено, что электромагнитные поля мод шепчущей галереи с высокими радиальными и азимутальными порядками больше проникают во внешнюю среду и могут взаимодействовать с ней. В спектральной зависимости параметра ДГС ТЕ мод высоких порядков имеются области длин волн с аномальной дисперсией.

В квазигеометрическом приближении были рассчитаны резонансные частоты и добротности для микрорезонаторов на модах шепчущей галереи из халькогенидного стекла составов $As_{40}Se_{20}Te_{20}$ и $As_{40}Se_{20}Te_{40}$. В качестве модельной жидкости для спектрального анализа была рассмотрена присадка «антигель» в дизельном топливе. Установлено, что в полосу поглощения присадки на длине волны 7.83 мкм попадает одна резонансная частота микрорезонатора из стекла состава $As_{30}Se_{50}Te_{20}$ с радиусами $R=25$ мкм и $R=40$ мкм и одна частота микрорезонатора из стекла состава $As_{40}Se_{20}Te_{40}$ с радиусом $R=40$ мкм.

В результате расчёта пропускания системы «элемент связи-резонатор» получены графики зависимости пропускания системы от концентрации присадки на дине волны 7.83 мкм. Таким образом, показано что микрорезонатор из халькогенидного стекла может быть использован в качестве сенсорного элемента спектроскопического датчика.

Список использованных источников

1. Городецкий М.Л. «Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью». – М.: ФИЗМАЛИТ, 2011.
2. Vanier F., et al., in Proc. of 2012 Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics, Banff, AB, 2012, 45-46
3. Wang P., et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 24, No.13, 1103-1105, 2012
4. E. Romanova, A. Konyukhov, Y. Kuzutkina, A. Melnikov «Dispersion tailoring in chalcogenide slot waveguides, slot arrays and bandgap structures», Proc. of: 14th International Conference on Transparent Optical Networks (Coventry, UK), July 2-5, 2012. 4 pp. 11-14.
5. Орликов Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники: учебное пособие для студентов, Томск, ТУСУР, 2012
6. Dissertation an der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, vorgelegt von Pascal Del'Haye aus München, München, den 23.02.2011, p.4-5
7. C. Müller, Foundations of the mathematical theory of electromagnetic waves. Springer Berlin, Heidelberg, New York, 1969.
8. A. N. Oraevsky, "Whispering-gallery waves," Quantum Electronics, vol. 32, no. 5, pp. 377–400, 2002
9. M. J. Weber, Handbook of optical materials, CRC press, 2003.
10. Murata H. Handbook of optical fibers and cables N.Y.: Marcel Dekker Inc., 1998.
11. A. Zakery and S. R. Elliot, Optical nonlinearities in chalcogenide glasses and their applications, Springer-Verlag, Berlin (2007)