

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

**Добротность оптических микрорезонаторов
из халькогенидного стекла**

АВТОРЕФЕРАТ
студента 4 курса 431 группы

направления 03.03.02 «Физика» физического факультета
Вольготова Александра Владимировича

Научный руководитель

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

Зав. кафедрой

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

Саратов 2020

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Оптические датчики нужны современному обществу, как в повседневной жизни, так и в производственных процессах, в экологии. Их действие основано на контроле интенсивности, фазы, поляризации, частоты или скорости света. Ярким примером являются волоконно-оптические датчики, которые были разработаны для измерения деформации, температуры, давления, напряжения или других физических величин, а также в волоконных устройствах, в частности для передачи информации на большие расстояния.

Для однопроходных волоконно-оптических датчиков, чтобы улучшить чувствительность, а также предел обнаружения, как правило, необходимо увеличить физическую длину волокна для усиления взаимодействия между светом и полем. С другой стороны, резонансные микро-и нано-структуры создают новые возможности для оптических датчиков.

Эти структуры - показатель высокого качества резонансной системы при сохранении компактности устройства, что позволяет резонансным оптическим полям перемещаться внутри резонатора несколько раз, и, таким образом, резко улучшать чувствительность устройств. Хотя существует много типов микрорезонаторных структур, микрорезонаторы на модах шепчущей галереи (МШГ) обладают наивысшей добротностью. Оптические микрорезонаторы также используются для нелинейных преобразований частоты излучения.

Оптические моды шепчущей галереи

Моды "шепчущего резонатора" обладают большой добротностью, так что даже небольшое отклонение частоты резонансного возбуждающего поля от собственной частоты моды, ведет к уменьшению ее амплитуды и затуханию. Поэтому "шепчущие моды" являются одним из наилучших кандидатов для решения задачи стабилизации частоты инжекционных лазеров.

Одной из проблем, которая возникает при использовании резонаторов такого типа, является расходимость выходного излучения. Ввиду того, что резонатор симметричен, излучение с равной степенью вероятности может выходить из него под разными углами. Это существенный недостаток. Необходимо добиться более или менее направленного выхода излучения из такой структуры. Для этого предлагается сделать небольшой выступ на внутренней грани резонатора. Ряд экспериментальных данных показывает, что стенки эллиптического резонатора с такой зазубриной успешно отражают "шепчущие моды" под такими углами, что так или иначе, из него выходит практически параллельный пучок.

Цель и основные задачи работы

Охарактеризовать микрорезонаторы из халькогенидного стекла разного состава по величине добротности в среднем инфракрасном диапазоне длин волн; сравнить значения добротности, полученные в теоретической модели и в измерениях.

Задачи:

1. освоить методы расчета добротности оптических микрорезонаторов;
2. провести расчет резонансных частот и добротности микрорезонаторов из халькогенидных стекол составов As_2S_3 и As_2Se_3 в области их прозрачности;
3. ознакомиться с технологиями изготовления сферических микрорезонаторов на основе халькогенидных волокон;
4. изучить методику измерения добротности сферических микрорезонаторов;
5. провести обработку результатов измерений резонансов и определить добротность сферических микрорезонаторов из халькогенидного стекла.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дано обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследования, а также даётся определение резонатора на модах шепчущей галереи.

В первой главе даётся определение добротности, приведены формулы для расчёта полной и внутренней добротности оптических микрорезонаторов, а также описаны оптические потери в резонаторах. В качестве примера был рассмотрен трековый кольцевой резонатор, состоящий из двух параллельных волноводов и кольцевого волновода (резонатора) между ними

Во второй главе рассматриваются свойства халькогенидных стекол, и в частности, дисперсия показателя преломления халькогенидного стекла. В результате распространения в микрорезонаторе оптический импульс на выходе будет уширен относительно начального импульса. Данное явление сопряжено с таким явлением как дисперсия. Дисперсия в оптическом микрорезонаторе делится на: материальную (скорость распространения волны в материале зависит от частоты); геометрическую (скорость волны зависит от формы и размеров резонатора); модовую (различные моды резонатора имеют разную скорость волны); поляризационную (скорость волны меняется за счет поляризационных эффектов). Материальная дисперсия определяется как зависимость показателя преломления от длины волны. С целью отображения материальной дисперсии как правило применяются формулы Зельмейера в виде степенного ряда. Материальная дисперсия влияет на резонансные частоты резонатора. Далее рассчитаем резонансные частоты резонатора из стёкол разных составов в области их прозрачности. Сравнивая результаты расчетов, видим, что наибольшую добротность имеет микрорезонатор из кварцевого стекла, потери в котором составляют 0.15 дБ/км. Значение оптических потерь для селенида мышьяка 2.5 дБ/м и для сульфида мышьяка 0.15 дБ/м. Для расчёта показателя преломления стёкол использовались формулы Зельмейера. Анализируя полученный графики, мы можем заметить, что межчастотный интервал уменьшается при увеличении радиуса микросферы.

В третьей главе изложена технология изготовления микросфер из халькогенидного стекла. 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, как показано на рисунке слева. Торец перемещался вниз до момента начала плавления стекла и образования капли, а затем быстро перемещался вверх. Формирование микросферы на торце происходило при остывании расплава под действием сил поверхностного натяжения. На рисунке 2 показаны некоторые из полученных микросфер. Для уменьшения диаметра микросфер в отдельных случаях производилось предварительное вытягивание в конус торца волокна путем его контактного нагрева.

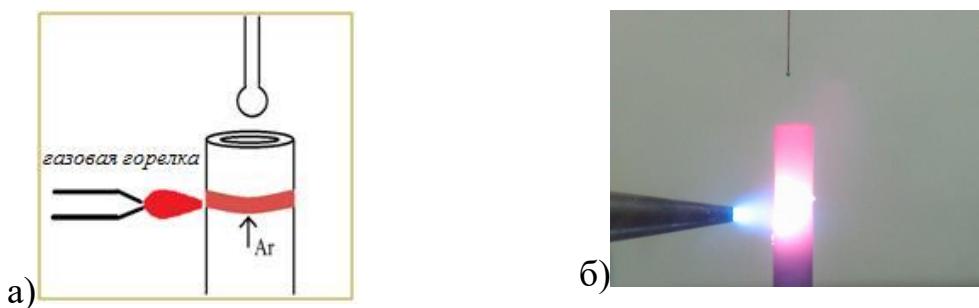


Рисунок 1. Получение микросферы на торце халькогенидного световода: схема (слева) и реализация (справа) методики.



Рисунок 2. Микросфера, полученные на торцах халькогенидных световодов.

Далее было произведено измерение спектров пропускания системы «элемент связи - халькогенидная микросфера». Для измерения резонансных частот полученных халькогенидных микросфер использовался перестраиваемый лазер YanistaTUNICS – T100S-HP в интервале длин волн от 1500 нм до 1630 нм. Излучение, прошедшее через микросферу, регистрировалось на InGaAs фотодетекторе, а на экране осциллографа, синхронизированного с частотой

модуляции лазера, наблюдались минимумы, которые соответствуют резонансным частотам микросферы (Рис 3б).

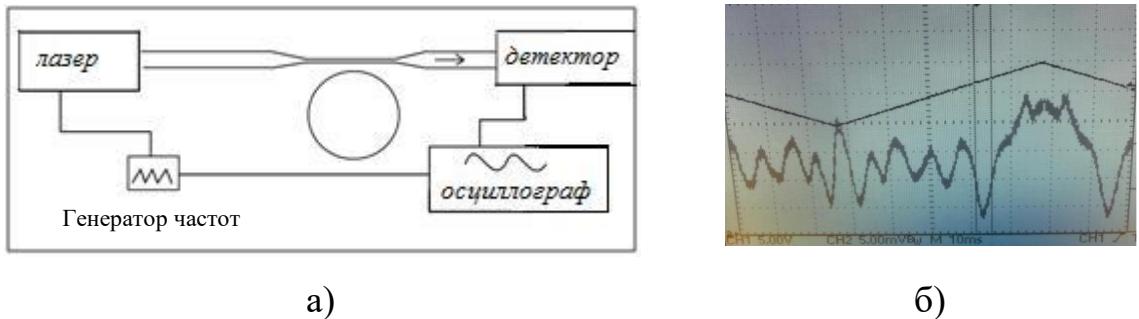


Рисунок 3. Схема установки для измерения спектра пропускания микросферы (а) и спектр пропускания на экране осциллографа (б).

Далее был произведён расчет добротности мод микросферы по ширине резонансных кривых. Как известно, минимумы в спектре пропускания системы «элемент связи – микрорезонатор» хорошо аппроксимируются функцией Лоренца:

$$T = |B^{out}|^2 / |B^{in}|^2 = \frac{\left[(Q_0^{-1} - Q_c^{-1})^2 + \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]}{\left[(Q_0^{-1} + Q_c^{-1})^2 + \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]}$$

Приводятся фотографии микросфер, имеющих высокую добротность, и соответствующие резонансы в спектрах пропускания. Наибольшие значения Q порядка 10^6 были получены для микросфер с меньшим диаметром. Средняя эффективность ввода излучения через сужение кварцевого световода составила 50%, максимальная – 75%

В заключении сформулированы основные результаты и выводы: В данной выпускной квалификационной работе в квазигеометрическом приближении были рассчитаны резонансные частоты и добротности для микрорезонаторов на модах шепчущей галереи из халькогенидного стекла составов As_2S_3 и As_2Se_3 , а также из кварцевого стекла. Установлено, что добротность уменьшается при увеличении длины волны резонанса, а свободный спектральный интервал растет при уменьшении радиуса микрорезонатора. Добротность у халькогенидных микрорезонаторов меньше,

чем у кварцевых, что связано с большими оптическими потерями в халькогенидном стекле по сравнению с кварцевым.

В работе были изучены технологии изготовления сферических микрорезонаторов на основе оптических волокон путем плавления торца волокна в потоке нагретого инертного газа. Была изучена методика определения добротности микрорезонатора и проведены расчеты добротности полученных микросфер по ширине измеренных резонансных кривых. В результате обработки результатов измерений установлено, что добротность сульфидных микросфер больше, чем селенидных, что согласуется с результатами расчета добротности в Главе 2. Добротность сульфидных микросфер растет при уменьшении радиуса микрорезонатора. Это можно объяснить большими оптическими потерями в резонаторах с большим радиусом, что связано с особенностями технологии, так как при нагреве и остывании стекла появляются неоднородности в объеме микросферы.

Список литературы

1. Fengnian Xia, Lidija Sekaric and Yurii A. Vlasov, Mode conversion losses in silicon-on-insulator photonic wire based racetrack resonators/ Vol. 14, No. 9 / OPTICS EXPRESS 3874
2. W. Sellmeier, Zur Erklärung der abnormen Farbenfolge im Spectrum einiger Substanzen, // Annalen der Physik und Chemie 219, pp. 272-282, 1871
3. M. J. Weber, Handbook of Optical Materials, CRC press, 2003.
4. Yanista TUNICS – T100S-HP.
5. Постников, В.С. Оптическое материаловедение: курс лекций, Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 280 с.
6. А. А. Мамрашев, В. И. Наливайко, Н. А. Николаев, Оптические свойства халькогенидных стекол в терагерцевой области спектра, Известия РАН, сер. физ., том 77, № 9, с. 1327-1329, 2013
7. Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. Монография. М.: Физматлит, 2011. — 416 с.

8. Конюхов А.И., Романова Е.А., Ширяев В.С., Опт. и спектр. Т.115. №2. С.288 – 296, 2013
9. Vanier F., et al., in Proc. of 2012 Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics, Banff, AB, 2012, pp. 45-46
10. Wang P., et al., IEEE Photon. Technol. Lett., V.24, No.13, 1103-1105, 2012
11. V. B. Braginsky, M. L. Gorodetsky, and V. S. Ilchenko. Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering gallery modes, Physics Letters A, 137(7-8):393-397, 1989
12. Самойленко А., Левин Г., Лясковский В. Л., Миньков К. Н., Применение оптических микрорезонаторов с модами типа “шепчущей галереи” для обнаружения наночастиц серебра в водной среде, Оптика и спектроскопия. Т. 122. № 6. С. 1037-1039, 2017
13. Крутиков В. Н., Золотаревский Ю. М., Лясковский В. Л., Высокодобротные оптические микрорезонаторы с модами типа шепчущей галереи и их применение в прецизионных измерениях Метрология. Ежемесячное приложение к научно-техническому журналу «Измерительная техника». № 12. С. 22-40. 2014.
14. Romanova E.A., Korsakova S., Komanec M., Nemecek T., Velmuzhov A., Sukhanov M., Shiryaev V.S., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2017. V. 23. №2. P.1-7
15. Минаев, В. С. Стеклообразные полупроводниковые сплавы, М.: Металлургия, 1991, с. 5-10