

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

**Оптический микрорезонатор как сенсорный элемент
для спектроскопии среднего ИК диапазона**

АВТОРЕФЕРАТ

ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ
студента 4 курса 432 группы
направления 03.03.02 «Физика» физического факультета
Клочкова Константина Олеговича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н.

Е.А. Романова

03.06.2019

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

В.М. Аникин

03.06.2019

Саратов 2019

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 наноструктуры 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 ненаправленность 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. Цель работы – выявление возможность использования халькогенидного сферического микрорезонатора в качестве сенсорного элемента оптического датчика для эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона. Для этого необходимо:

1. Провести расчет резонансных частот и добротности для микрорезонаторов на модах шепчущей галереи из халькогенидного стекла составов As_2S_3 и As_2Se_3 .

2. Подобрать радиус микрорезонатора, при котором по крайней мере одна резонансная частота попадает в полосу поглощения исследуемого вещества (ацетона).

3. Для системы «элемент связи – резонатор» провести расчет пропускания элемента связи на резонансной частоте при различных концентрациях водного раствора ацетона. Построить калибровочный график.

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 по расчёту полной и внутренней добротности для оптических микрорезонаторов, а также описаны потери оптические потери в резонаторах. Было рассмотрено возбуждение отдельной высокодобротной МШГ со значительной добротностью с помощью N бегущих мод в элементе связи. Этот элемент связи способен иметь бесконечное количество пространственных мод ($N = \infty$), равно как, к примеру, призма или планарный волновод, либо только лишь одну моду ($N = 1$, одномодовая связь), сопряженную с резонатором, равно как в растянутом волокне либо интегральном полосковом волноводе.

Проанализирована система, состоящая из резонатора и элемента связи, с поддержкой сосредоточенных параметров в квазигеометрическом приближении. Дальше была рассмотрена 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 ОМ 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 варианте степенного ряда. Материальная дисперсия влияет на резонансные частоты резонатора.

Во второй главе был произведён расчёт собственной добротности микрорезонатора. Измерение поглощения излучения в среднем ИК диапазоне в объемных образцах жидких веществ является сложной задачей, поскольку коэффициенты поглощения в колебательных спектрах молекул жидкостей обычно очень велики. Так, коэффициент поглощения воды на длине волны 3 мкм равен $12\,000\text{ см}^{-1}$. Поэтому в объемном образце воды излучение полно-

стью поглотится на длине в несколько микрон. Для измерений надо использовать кювету с толщиной, сравнимой с длиной волны, что может привести к интерференции излучения внутри кюветы.

Характерные длины затухания эванесцентных мод волоконного световода, погруженного в поглощающую жидкость, могут варьироваться в диапазоне от нескольких миллиметров до метров. Использование волоконных сенсорных элементов для эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона дает возможность создания надежных датчиков с требуемыми размерами и выходными характеристиками. Вместо волокна, в качестве сенсорного элемента может быть использован оптический микрорезонатор.

Рассчитаем резонансные частоты резонатора из стёкол разных составов в области их прозрачности. Сравнивая графики на рисунках 1-3, 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.

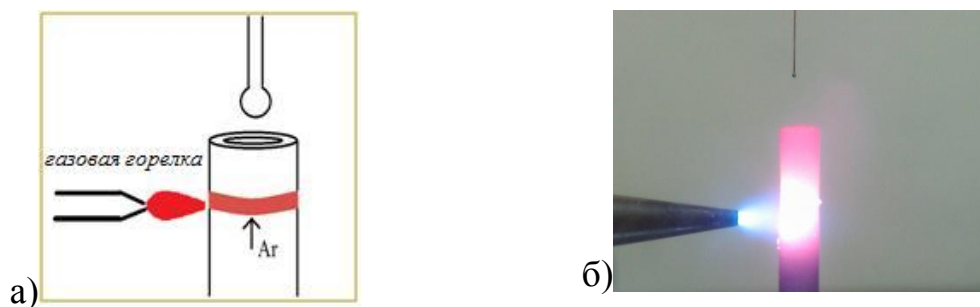


Рисунок 1. Получение микросферы на торце халькогенидного световода: схема (слева) и реализация (справа) методики.

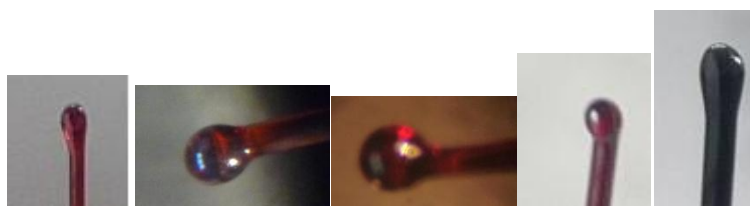


Рисунок 2. Микросферы, полученные на торцах халькогенидных световодов

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 In-GaAs фотодетекторе, а на экране осциллографа, синхронизированного с частотой модуляции лазера, наблюдались минимумы, которые соответствуют резонансным частотам микросферы (Рис 3б).

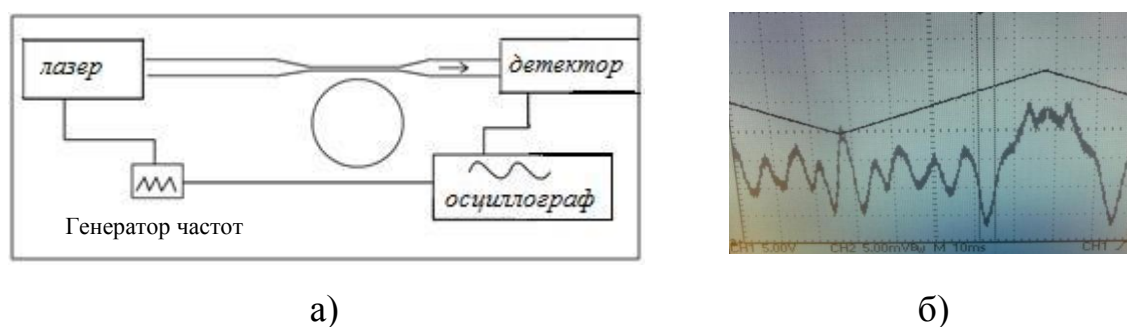
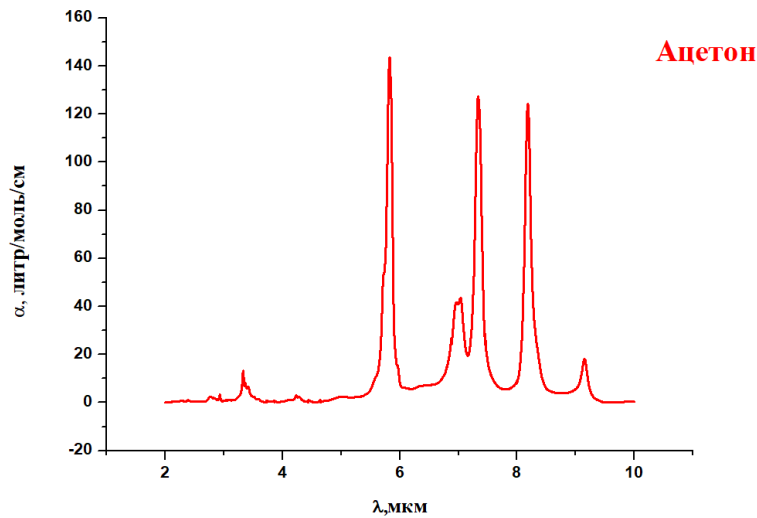


Рисунок 3. Схема установки для измерения спектра пропускания микросферы (а) и спектр пропускания на экране осциллографа (б).

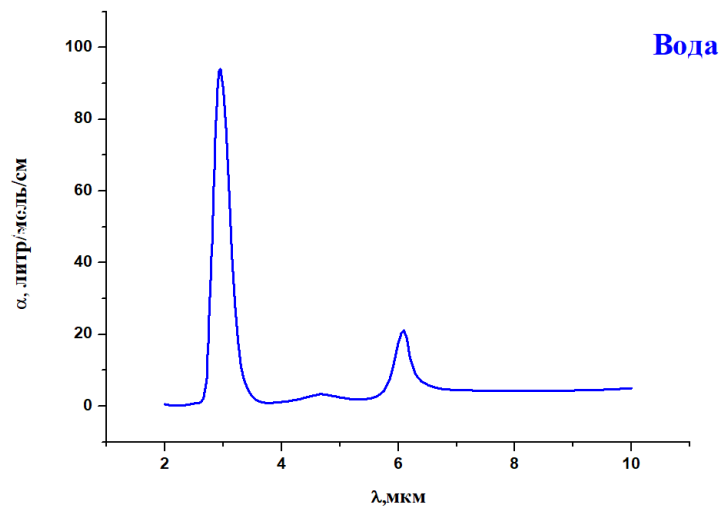
В четвертой главе были исследованы свойства микрорезонатора, погружённого в модельную жидкость, в качестве которой брали водный раствор ацетона. В результате спектроскопических измерений с объёмными образцами воды и ацетона были получены спектры молярного поглощения показанные на рисунке 4. Наиболее подходящими для спектрального анализа являются полосы поглощения ацетона с максимумами на длинах волн 8.18 мкм, 7.33 мкм, 5.8 мкм.

■



а)

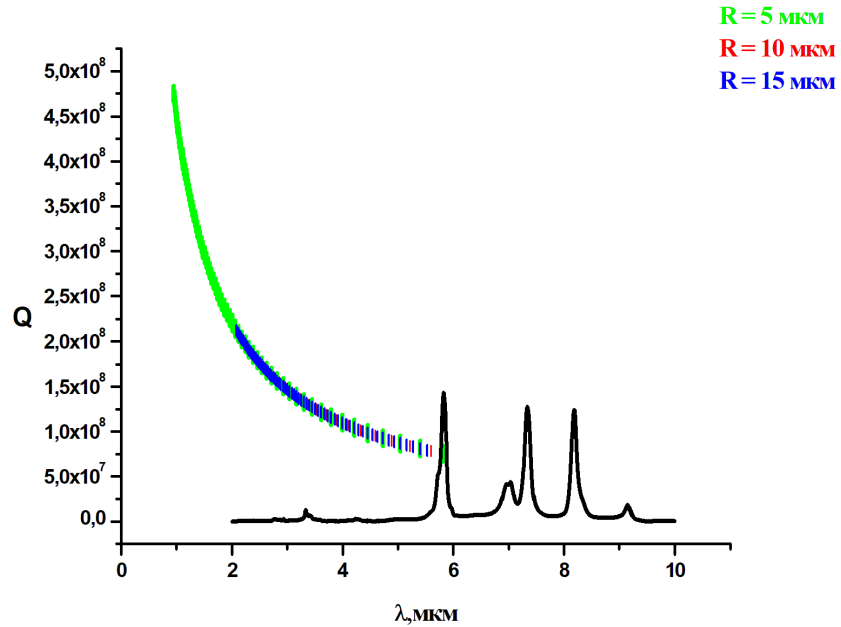
■



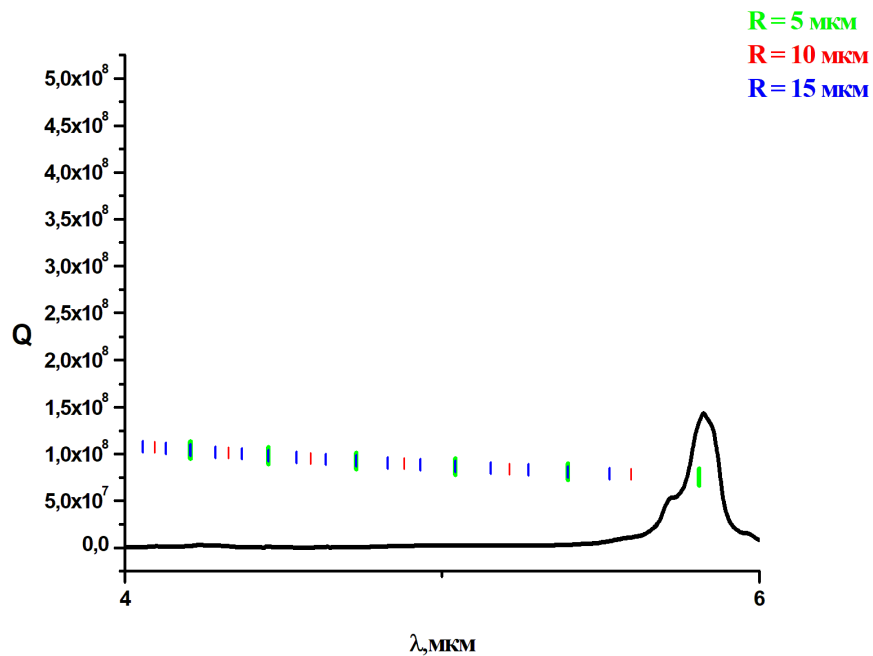
б)

Рисунок 4. Коэффициент молярного поглощения ацетона (а) и воды (б) в зависимости от длины волны

Сравним полученные частоты резонансов и спектры поглощения исследуемых веществ. Как показано на рисунке 5, в полосу поглощения ацетона на длине волны 5.8 мкм для микрорезонатора из сульфида мышьяка при $R = 5$ мкм попадает лишь одна резонансная частота.



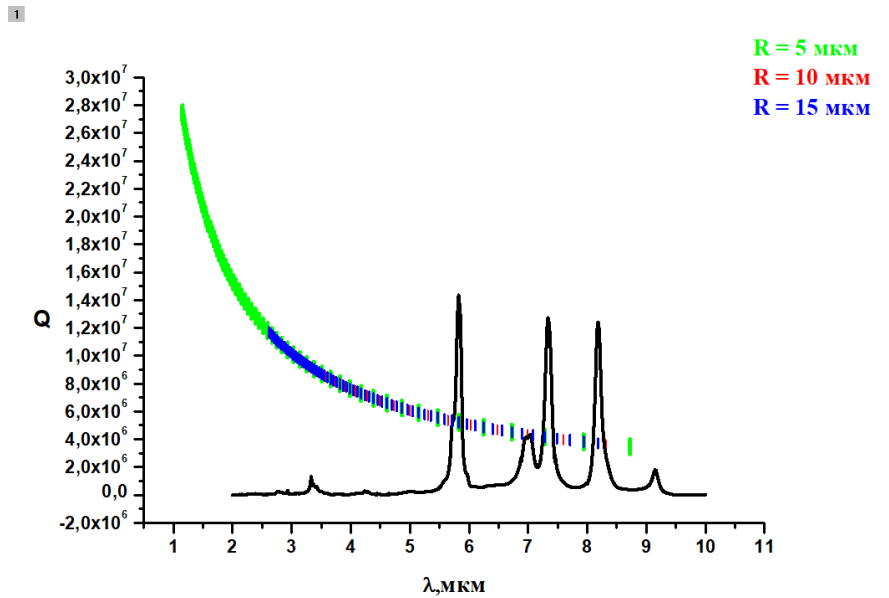
а)



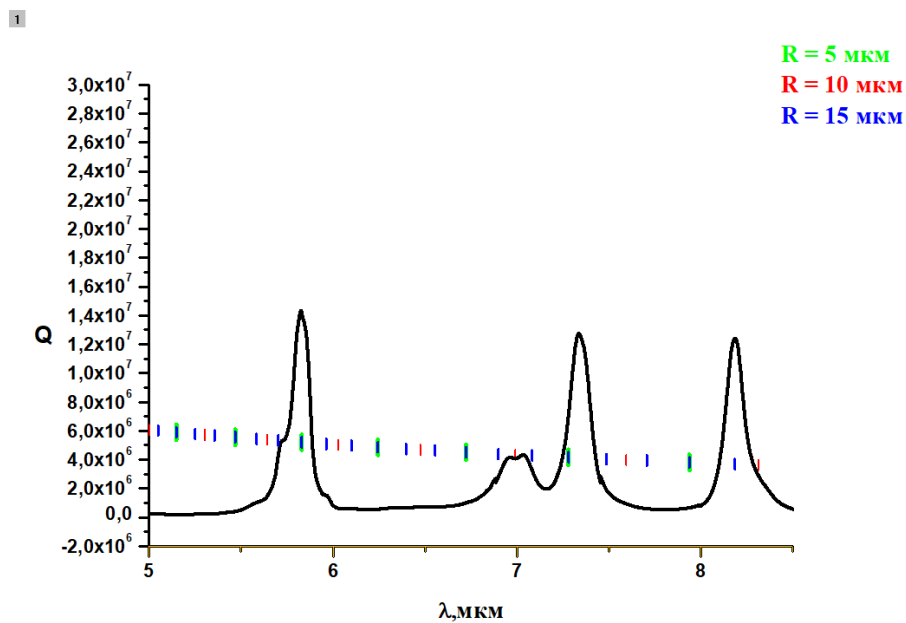
б)

Рисунок 5(а,б) Спектральная зависимость добротности резонанса микрорезонатора из As_2S_3 (сульфида мышьяка) и спектр поглощения ацетона

Другие полосы поглощения ацетона попадают в область поглощения сульфида мышьяка. Область прозрачности в кварцевом стекле(до 2 мкм) находится далеко от полос поглощения ацетона. Для микрорезонатора из селенида мышьяка попадают несколько частот в области прозрачности стекла в рассмотренные полосы поглощения ацетона (рисунок б).



а)

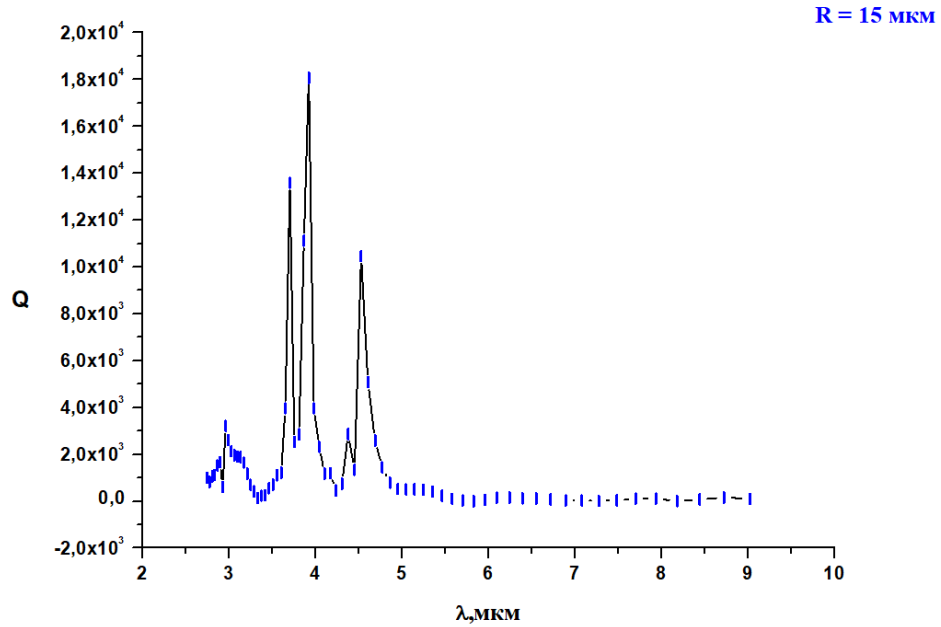


б)

Рисунок б(а,б) Спектральная зависимость добротности резонансамикрорезонатора из As_2Se_3 (селенида мышьяка) и спектр поглощения ацетона

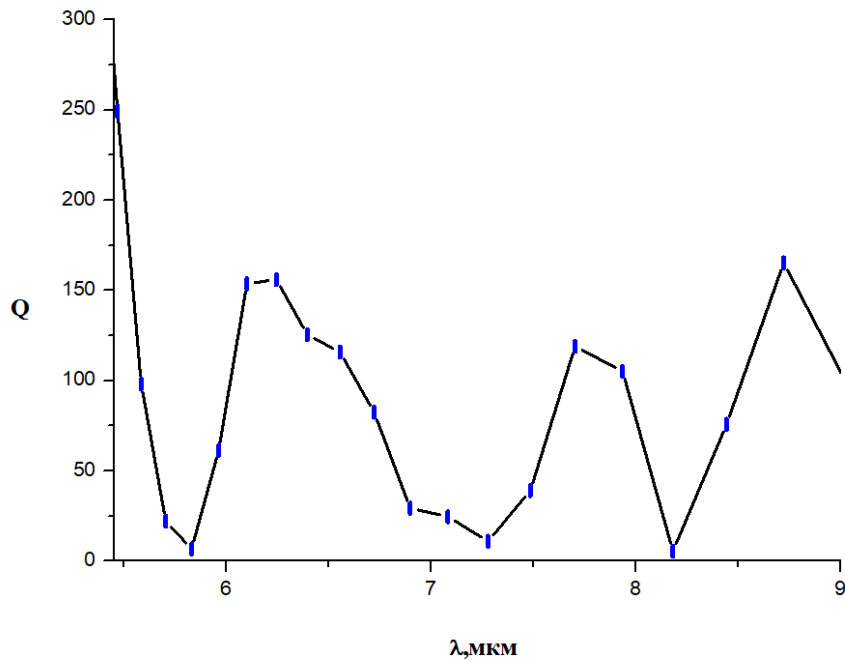
Если микрорезонатор погружен в исследуемую жидкость, его добротность уменьшается, так что в полосах поглощения ацетона добротность составляет менее 25 (рисунок 7).

1



а)

1



б)

Рисунок 7(а, б) Спектральная зависимость добротности резонансов микрорезонатора, погруженного в чистый ацетон

Выберем в качестве рабочей длины волны для спектрального анализа $\lambda = 8.18$ мкм. Рассчитаем добротность резонатора с учётом потерь при поглощении в водном растворе ацетона при различных концентрациях. Зная число молей вещества в 1 л раствора, можно легко отмерить нужное количество молей для реакции с помощью подходящей мерной ёмкости. Молярные коэффициенты поглощения для ацетона и воды известны и показаны на рисунке 7. Соотношение между молярными концентрациями ацетона и воды показано на рисунке 8.

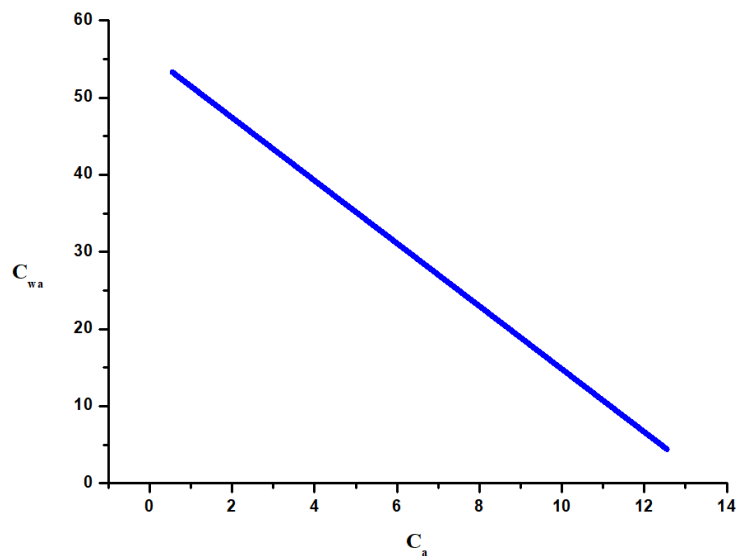


Рисунок 8. Молярные концентрации воды и ацетона

Рассчитаем пропускание этой системы на длине волны 8.18 мкм при разных концентрациях ацетона. На рисунке 9 показана зависимость пропускания от расстройки частоты резонатора $\delta\omega$. Видно, что при увеличении концентрации пропускание в минимуме кривой становится меньше, а ширина резонанса увеличивается.

1

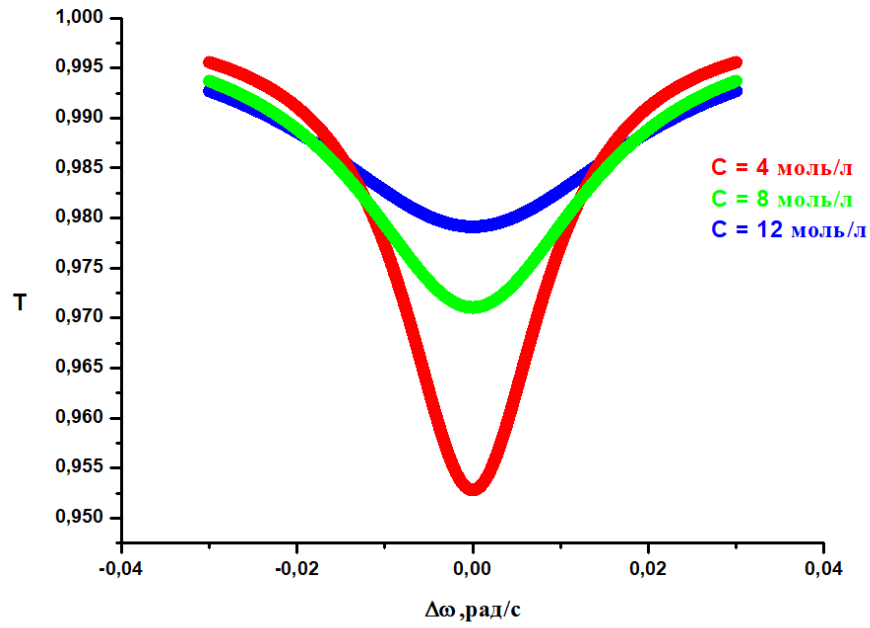


Рисунок 9. Пропускание системы «элемент связи-микрорезонатор» в зависимости от расстройки, $\lambda = 8.18$ мкм.

1

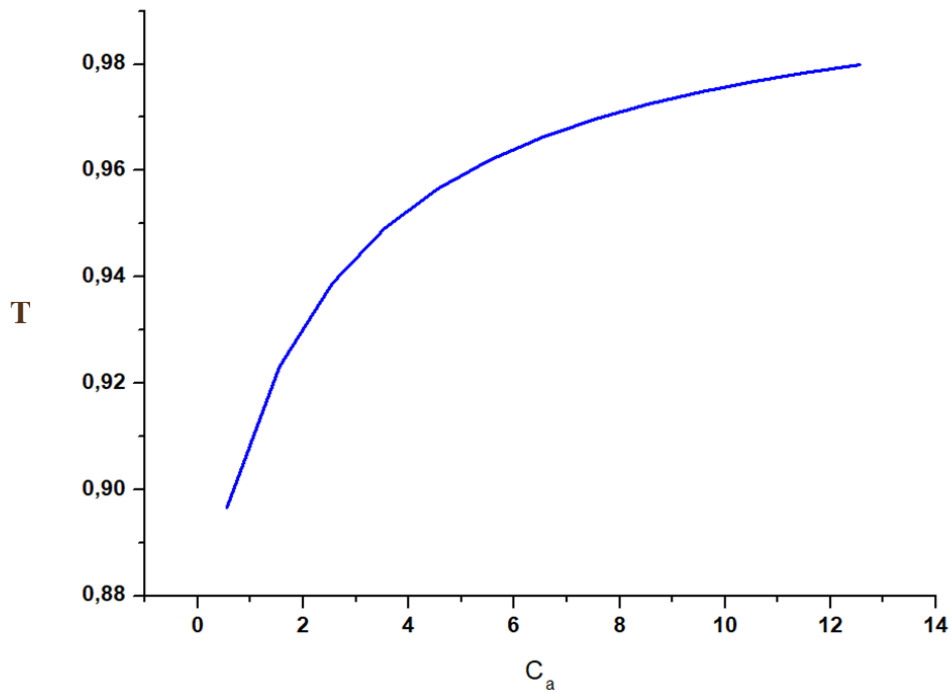


Рисунок 10. Калибровочный график сенсорного элемента на основе микрорезонатора.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

В выпускной работе была исследована возможность использования халькогенидного сферического микрорезонатора в качестве сенсорного элемента оптического датчика для эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона. 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. В качестве модельной жидкости для спектрального анализа были рассмотрены водные растворы ацетона. Установлено что в полосе поглощения ацетона на длине волны 8.18 мкм находятся резонансные частоты из селенида мышьяка с радиусом 15 мкм. В результате расчёта пропускания системы «элемент связи-резонатор» получен калибровочный график на длине волны 8.18 мкм. Таким образом показано что микрорезонатор из халькогенидного стекла может быть использован в качестве сенсорного элемента спектроскопического датчика.

Список использованной литературы:

1. Городецкий М.Л. «Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью». – М.: ФИЗМАЛИТ, стр. 324-332, 2011.
2. D.O'Shea, C.Junge, S.Nickel, M.Pollinger, and A.Rauschenbeutel, Ultra-high Q whispering-gallery-mode bottle microresonators: properties and applications, arXiv:1105.0351v1 [physics.optics] 2011.
3. Microresonator Sensors Made in Polymers with Functional Chromophore Dopants, Antao Chen, 2009
4. Dissertation an der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, vorgelegt von Pascal Del'Haye aus München, München, den 23.02.2011, p.14-21
5. Richtmyer R.D. Dielectric resonators // J. Appl. Phys. V. 10, 1939 P.391-398.

6. Garret C. G. B., Kaiser W., Bond W.L. Stimulated emission into optical whispering gallery modes of spheres //Phys. Rev. V. 124, 1961. P. 1807-1809
7. Irvine W.M. Light scattering by spherical particles: radiation pressure, asymmetry factor and extinction cross section //JOBA. V. 55(1), 1965. P. 16-19
8. Bottle microresonators for applications in quantum optics and all-optical signal processing, Michael Pöllinger, 2010, p.27
9. Vanier F., et al., in Proc. of 2012 Int. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics, Banff, AB, 2012, 45-46
10. Wang P., et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 24, No.13, 1103-1105, 2012
11. ["All-optical logic based on silicon micro-ring resonators", Qianfan Xu, Michal Lipson, 2007
12. 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
13. W. Sellmeier, "Zur Erklärung der abnormen Farbenfolge im Spectrum einiger Substanzen," Annalen der Physik und Chemie 219, pp. 272-282, 1871
14. M. J. Weber, Handbook of Optical Materials, CRC press, 2003.
15. Joseph Habib Simmons, Kelly S./Optical Materials/p.104, 2000
16. Dissertation an der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, vorgelegt von Pascal Del'Haye aus München, München, den 23.02.2011, 101
17. A. B. Matsko,* A. A. Savchenkov, W. Liang, V. S. Ilchenko, D. Seidel, and L. Maleki, Mode-locked Kerr frequency combs, August 1, 2011 / Vol. 36, No. 15 / OPTICS LETTERS 2845-2846
18. Nonlinear Fiber Optics, GOVIND P. AGRAWAL, 2001
19. Минаев, В. С. Стеклообразные полупроводниковые сплавы / М.: Металлургия, 1991, с. 5-10
20. I. V. Barashenkov and Yu. S. Smirnov, Phys. Rev. E54, 5707 (1996)
21. Колюхов А.И., Романова Е.А., Ширяев В.С.// Опт. и спектр. 2013.Т.115.№2. С.288 – 296; Konukhov A.I., Romanova E.A., Shiryaev V.S.// Opt. Spectrosc.2014. V.115.№2. P.288 – 296. doi 10.7868/S0030403413080126

22. Jonas R.E., Braiman M.S. // J.Appl. Spectrosc. 1993.V. 47. №11.P.1751 – 1759. doi 10.1366/0003702934066118

23. Romanova E.A., Korsakova S., Komanec M., Nemecek T., Velmuzhov A., Sukhanov M., Shiryayev V.S.// IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2017. V. 23.№2.P.1-7.doi 10.1109/JSTQE.2016.2630846

24. Korsakova S., Romanova E., Velmuzhov A., Kotereva T., Sukhanov M., Shiryayev V.// J. Non-Cryst.

25. Raichlin Y., Katzir A.// J.of Appl. Spectrosc.2008. V.62. №2.P.55A – 72A. doi 10.1366/000370208783575456