

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

**Волоконные световоды с плавным изменением диаметра как сенсорные
элементы волоконных спектроскопических датчиков**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 431 группы

направления 03.03.02 «Физика» физического факультета

Исаевой Александры Игоревны

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

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Датчики, позволяющие определять химический состав газовой или водной среды, востребованы в различных сферах жизнедеятельности человека. Так, мониторинг химического состава воздуха и воды в режиме реального времени упростил бы задачу контроля состояния окружающей среды. В настоящее время для решения этой задачи обычно производится забор проб почвы и воды для лабораторных спектроскопических исследований, что не позволяет своевременно выявлять наличие тех или иных примесей. Для обеспечения качественного контроля за постоянно текущими промышленными и экологическими процессами могут быть использованы волоконно-оптические спектроскопические датчики, обладающие целым рядом преимуществ: быстрое действие, низкая стоимость, безопасность использования. Поскольку колебательные спектры поглощения многих органических и неорганических веществ находятся в области длин волн 3 – 10 мкм, освоение среднего инфракрасного (ИК) диапазона позволит эффективно решать многие производственные, экологические и научные задачи. Халькогенидные волоконные световоды, прозрачные в области 1 – 15 мкм (в зависимости от состава), являются наиболее подходящим материалом для создания волоконных спектроскопических датчиков среднего ИК диапазона.

Волоконные световоды с перетяжкой, о которых будет говориться в данной работе, позволяют получить ещё более точные данные по исследуемым материалам за счёт своей конструкции, позволяющей улучшить выходные данные при исследованиях, а значит, получать более детальный анализ.

До недавнего времени еще не было компьютерных моделей таких волоконно-оптических эванесцентных датчиков, поэтому данная сфера недостаточно изучена.

Цель выпускной квалификационной работы состоит в том, чтобы методом компьютерного моделирования исследовать свойства мод многомодового халькогенидного световода, погруженного в поглощающую жидкость, с

пространственным переходом в виде плавного изменения диаметра, как сенсорного элемента волоконного датчика для эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**:

1. Изучить теоретические основы моделирования световых полей в нерегулярных волоконных световодах с пространственными переходами.
2. Ознакомиться с технологией изготовления пространственных переходов в многомодовых халькогенидных световодах в виде плавного изменения диаметра (перетяжка).
3. Ознакомиться с методом волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона и изучить методику измерения спектров пропускания халькогенидных сенсорных элементов, погруженных в поглощающую жидкость.
4. Провести расчет коэффициентов затухания эванесцентных мод многомодового халькогенидного световода, погруженного в поглощающую жидкость, в полосе поглощения жидкости в среднем ИК диапазоне при разных диаметрах световода.
5. Провести расчет пропускания сенсорного элемента с перетяжкой с использованием метода локальных мод. Исследовать зависимость пропускания от диаметра перетяжки.

Структура работы

Данная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и библиографического списка. Глава 1: Спектроскопия как метод определения химического состава веществ. Глава 2: Халькогенидные стёкла. Глава 3: Основы теории волоконных световодов. Глава 4: Волноводы с плавно меняющимися параметрами. Глава 5: Компьютерное моделирование сенсорного элемента для волоконной эванесцентной спектроскопии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи выпускной квалификационной бакалаврской работы.

В **Главе 1** рассматривается спектроскопия как важная область исследований современной науки, позволяющая осуществлять количественный и качественный анализ испускания и поглощения света атомами и молекулами [10]. При наличии поглощения во внешней среде направляемые моды бесструктурного световода становятся эванесцентными – т.е. затухающими вдоль оси световода. Эванесцентная спектроскопия среднего ИК-диапазона на основе волоконных световодов является надежным средством определения химического состава различных сред[3]. В этом диапазоне находятся полосы поглощения колебательных спектров жидких, газообразных и твердых веществ.

В **Главе 2** представлена общая характеристика химических элементов «халькогенов», обсуждаются некоторые свойства халькогенидных стекол [8]. Рассмотрены оптические потери в халькогенидных световодах [22] в разных спектральных диапазонах, при наличии примесей в исходных материалах, говорится об области слабого поглощения для халькогенидных стекол.

В **Главе 3** обсуждаются основы теории волоконных световодов [1]. Представлены лучевой и волновой подходы в описании распространения света по оптоволокну. Рассмотрен ступенчатый волоконный световод, показан ход лучей в многомодовом оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления. Более строгим свляется волновой подход, основанный на решении уравнений Максвелла и представлении электрического и магнитного полей на основе функций Бесселя и Макдональда. Рассматриваются световые волны в круглом диэлектрическом стержне. На основе волновых уравнений для сердцевины и оболочки записывается характеристическое уравнение для мод диэлектрического стержня. Также представлены соотношения для *HE*-мод, распространение которых рассмотрено в данной работе, а также условия их отсечки.

В Главе 4 рассматриваются волноводы с плавно меняющимся радиусом сердцевины. Для формирования поля локальных мод осуществляется аппроксимация нерегулярного световода последовательностью цилиндров. Приведён вывод выражений для полей локальных мод. Поле внутри конечного цилиндра аппроксимируется полем бесконечно длинного световода [2]. Представлен критерий плавного изменения параметров. Рассмотрена технология и установка для получения перетяжек волоконного световода.

В Главе 5, п.5.1 производится расчет коэффициентов затухания эванесцентных мод регулярного многомодового бесструктурного световода из стекла состава As_2S_3 (сульфид мышьяка) с радиусами сердцевины 273 мкм, 282 мкм, 292 мкм, 338 мкм, 350 мкм, 371 мкм. В качестве исследуемого вещества для химического анализа был использован 1% раствор присадки «антигель» в дизельном топливе. Излучение в световоде представляется как сумма направляемых мод, причем продольная постоянная распространения $\beta = \beta' + i \cdot \beta''$ каждой моды является комплексной и зависит от доли мощности излучения, распространяющегося в поглощающей среде за пределами сердцевины световода. Величина β на заданной длине волны может быть определена путем решения характеристического уравнения для каждой моды световода. Коэффициент затухания определяется выражением $\eta_m = 2 \cdot \beta_m''$, где m – радиальный индекс моды, характеризующий радиальное распределение поля моды. Представим результаты расчётов на общем сводном графике (рисунок 1):

Сравнение кривых на рисунке 1 показывает, что коэффициент затухания зависит от радиального порядка моды для каждого радиуса a волоконного световода. Моды с высокими порядками m имеют большие коэффициенты затухания. Видно, что при заданном порядке m кривые, полученные при меньших радиусах сердцевины регулярного волоконного световода лежат выше кривых, полученных при больших радиусах. Таким образом, моды световода с более тонкой сердцевиной сильнее затухают при распространении.

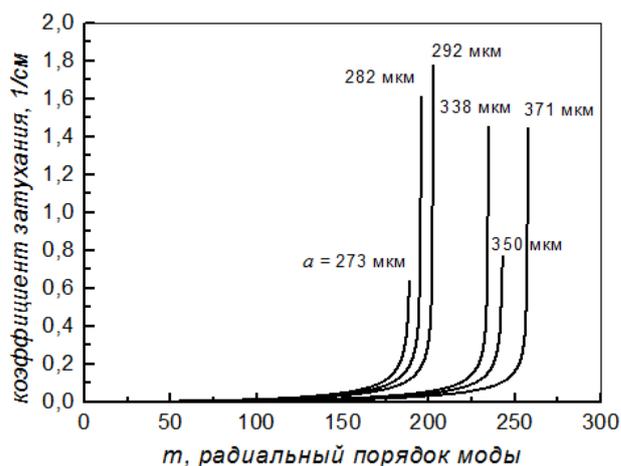


Рисунок 1 - Коэффициенты затухания η_m мод HE_{1m} , рассчитанные на длине волны 5.74 мкм (полоса поглощения присадки) в зависимости от радиального порядка моды в световоде с разным радиусом сердцевины a .

В п.5.2 производится расчет пропускания сенсорного элемента на основе регулярного световода. Пропускание сенсорного элемента, погруженного на длине L в раствор дизельного топлива с присадкой, для каждой моды в отдельности рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{P}{P_0} = e^{-\eta_m L}$$

Результаты расчета показаны на рисунке 2.

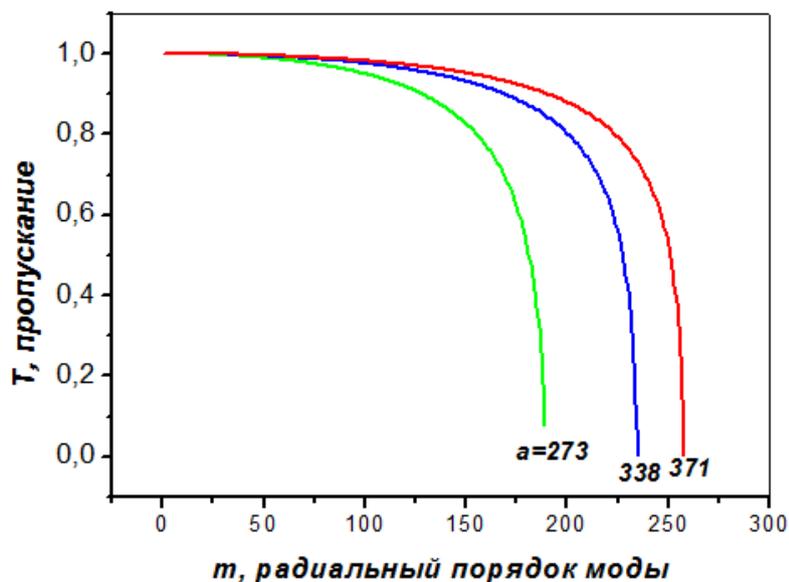


Рисунок 2 - Пропускание сенсорного элемента длиной 1 см, рассчитанное на длине волны 5.74 мкм (полоса поглощения присадки) в зависимости от радиального порядка моды в световоде с разным радиусом сердцевины a .

Сравнение кривых на рисунке 2 показывает, что при заданном порядке m кривые, полученные при больших радиусах сердцевины регулярного волоконного световода лежат выше кривых, полученных при меньших радиусах. Мы видим, что пропускание сенсорного элемента зависит от радиуса

сердцевины волоконного световода. Таким образом, установлено, что в световоде с меньшим радиусом сердцевины мощность излучения, передаваемого в одной моде с заданным порядком m , уменьшается сильнее, чем в световоде с большим радиусом сердцевины. Это согласуется с результатами, показанными на рисунке 1.

В п.5.3 производится расчет пропускания сенсорного элемента на основе световода с плавным изменением диаметра (перетяжкой). Световод аппроксимируется последовательностью цилиндров, как показано на рисунке 3. Электромагнитное поле внутри каждого цилиндра конечной длины Δl аппроксимируется полем направляемой моды бесконечного цилиндра того же диаметра. Предполагалось, что диаметр световода d_1 линейно уменьшается с координатой z до минимального значения d_2 , а затем линейно увеличивается до d_1 .

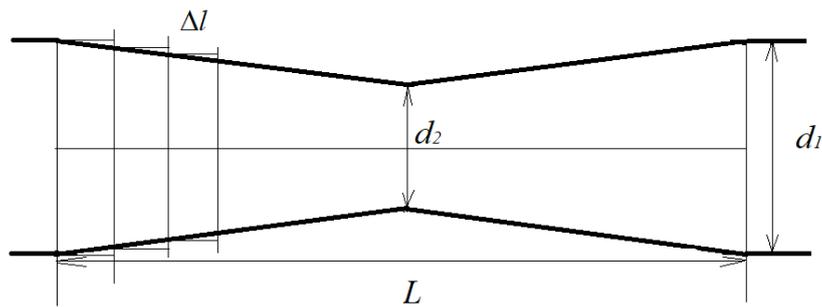


Рисунок 3. Схема сенсорного элемента на основе волоконного световода с перетяжкой.

Полное пропускание сенсорного элемента $T = \prod_i T_i$ ($i = 1, N_c$) определялось как произведение значений пропускания $T_i = e^{-\eta_i \Delta l}$ локальных эванесцентных мод для всех N_c цилиндров конечной длины с диаметрами d_i , аппроксимирующих световод с изменением диаметра. Коэффициент затухания η_i рассчитывался для бесконечного цилиндра с диаметром d_i по методике, описанной в п.5.1.

Расчеты проводились для перетяжки, полученной на конечной длине бесструктурного световода из стекла состава GeSe₄ с показателем преломления $n = 2.4$, со следующими параметрами: $d_1 = 400$ мкм, $d_2 = 200, 100, 50$ мкм, $L = 10$ мм. Число HE_{1m} мод в световоде рассчитывалось для бесконечного цилиндра с минимальным диаметром. Так, для $d_2 = 200, 100, 50$ мкм число мод, соответственно, составляет $m=68, 34, 16$.

Пропускание сенсорного элемента, рассчитанное в предположении, что вся входная мощность передается в одной эванесцентной моде HE_{1m} с заданным m , показано на рисунках 4 - 6 для радиуса $a_1 = d_1/2$ каждого локального цилиндра. Таким образом, видно, как меняется пропускание при распространении моды по световоду с перетяжкой по мере уменьшения диаметра световода. Полное пропускание определяется по значению T_2 в середине перетяжки, т.е. при минимальном диаметре, а для всей структуры равно T_2^2 .

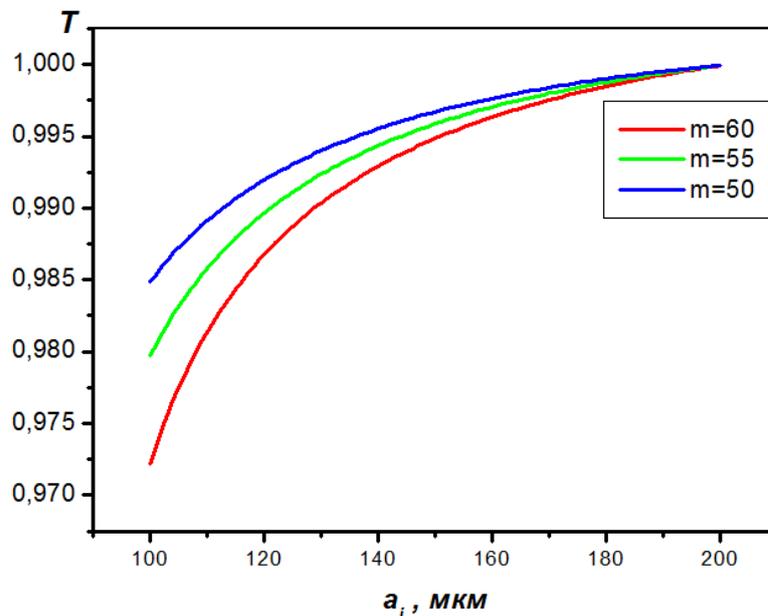


Рисунок 4. Пропускание сенсорного элемента длиной $L=10$ мм с $d_1 = 400$ мкм, $d_2 = 200$ мкм в зависимости от радиуса локального цилиндра для HE_{1m} мод с разными радиальными порядками.

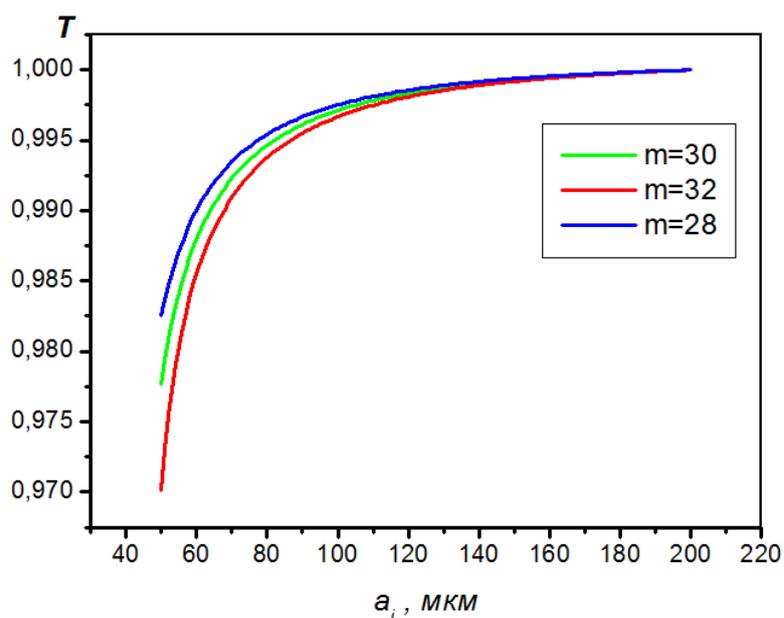


Рисунок 5. Пропускание сенсорного элемента длиной $L=10$ мм с $d_1 = 400$ мкм, $d_2 = 100$ мкм в зависимости от радиуса локального цилиндра для HE_{1m} мод с разными радиальными порядками.

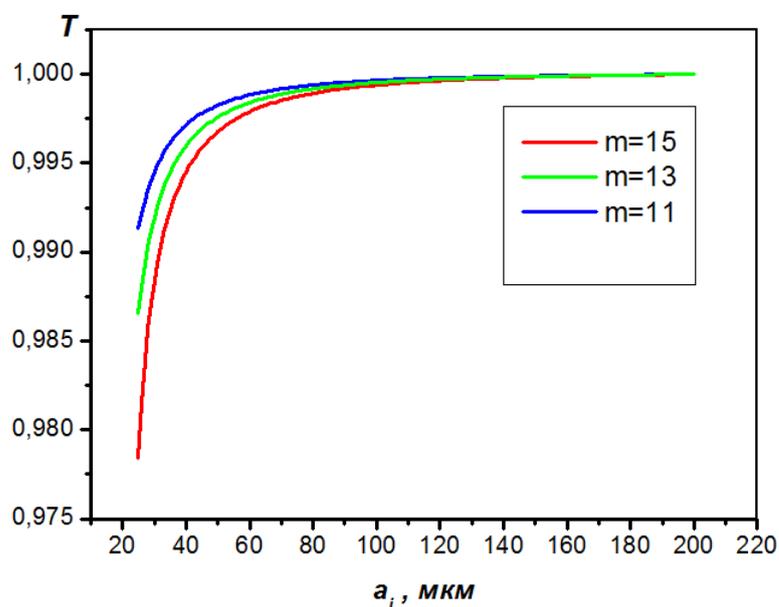


Рисунок 6. Пропускание сенсорного элемента длиной $L=10$ мм с $d_1 = 400$ мкм, $d_2 = 50$ мкм в зависимости от радиуса локального цилиндра для HE_{1m} мод с разными радиальными порядками..

Сравнение кривых на каждом рисунке показывает, как меняется пропускание при уменьшении радиуса световода. Мы видим, что чем больше m , тем сильнее уменьшается пропускание в перетяжке.

В Таблицах 1-3 представлены конечные значения для пропускания сенсорных элементов с каждой из перетяжек на рисунках 4-6.

Таблица 1

$d_1 = 400 \text{ мкм}, d_2 = 200 \text{ мкм}$			
m	50	55	60
T	0.984889	0.979729	0.972195

Таблица 2

$d_1 = 400 \text{ мкм}, d_2 = 100 \text{ мкм}$			
m	28	30	32
T	0.982521	0.977673	0.970084

Таблица 3

$d_1 = 400 \text{ мкм}, d_2 = 50 \text{ мкм}$			
m	11	13	15
T	0.991318	0.986575	0.978415

На рисунке 7 показано пропускание сенсорного элемента, рассчитанное в предположении, что вся входная мощность передается в одной эванесцентной моде с заданным m . Рассматривалась перетяжка с разным минимальным диаметром, расчеты проводились для HE_{1m} мод с m от 1 до m_{max} , где m_{max} определяется в области перетяжки. На рисунке 7 показаны результаты расчета для шести мод для одной половины перетяжки.

Поскольку перетяжка состоит из двух частей, в одной части диаметр уменьшается, а в другой увеличивается, полное пропускание равно произведению пропускания этих двух частей. Это пропускание будет одно и то же, если мы считаем от уменьшения к увеличению диаметра или наоборот. На рисунке 8 показаны результаты расчета для шести мод для всей перетяжки.

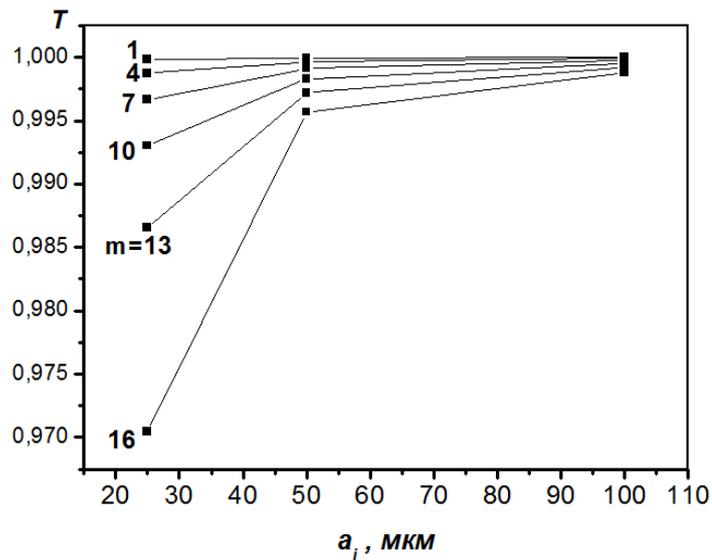


Рисунок 7. Пропускание сенсорного элемента для половины перетяжки, показанного на Рис.3, погруженного в дизельное топливо с присадкой на длине L , рассчитанное для отдельных эванесцентных мод HE_{1m} .

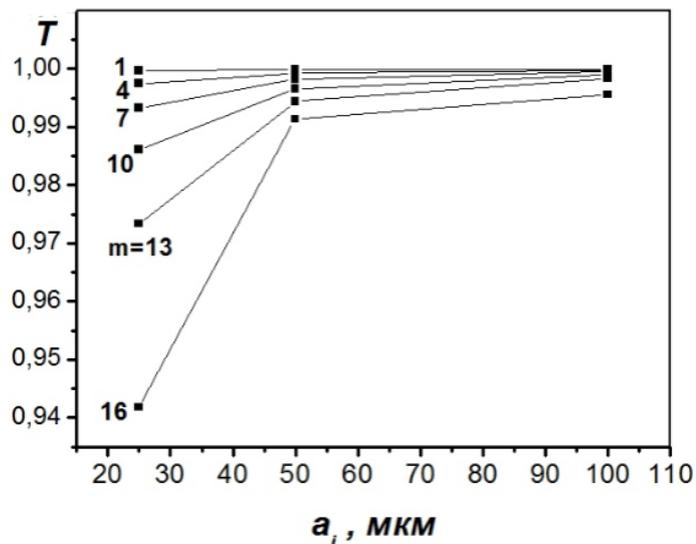


Рисунок 8. Пропускание сенсорного элемента, показанного на Рис.3, погруженного в дизельное топливо с присадкой «антигель» на длине L , рассчитанное для отдельных эванесцентных мод HE_{1m} .

Из сравнения кривых на рисунке 8 можно сделать вывод, что чем меньше радиус перетяжки, тем сильнее уменьшается пропускание сенсорного элемента, полученное для каждой моды, причем этот эффект выражен сильнее у мод более высоких порядков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного численного анализа были выявлены следующие особенности эванесцентной спектроскопии жидких сред с использованием многомодового халькогенидного волокна.

Эванесцентные моды HE_{1m} регулярного световода с большими радиальными порядками имеют большие коэффициенты затухания и, соответственно, меньшие длины затухания. Коэффициент затухания моды растет при уменьшении диаметра волокна. Поэтому для создания компактных сенсорных элементов надо использовать высшие моды световодов с малым диаметром. Однако, при уменьшении диаметра волокно становится более хрупким, с ним трудно работать. Решением проблемы является плавное уменьшение диаметра световода на конечной длине, т.е. создание перетяжки.

В выпускной работе проведен расчет пропускания перетяжки в халькогенидном световоде, частично погруженном в поглощающую жидкость. Предполагалось, что излучение на длине волны в полосе поглощения жидкости передается в одной моде HE_{1m} с заданным радиальным порядком. Установлено, что пропускание такого сенсорного элемента заданной длины уменьшается больше в перетяжке с меньшим радиусом. Однако, при использовании мод с большим m можно получить такое же пропускание в перетяжке с большим радиусом. Оптические потери в такой перетяжке меньше, чем в тонкой, что объясняется особенностями технологии их изготовления методом локального нагрева волокна.

Таким образом, использование высших мод многомодового халькогенидного световода для химического анализа различных веществ позволяет оптимизировать метод волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

[1] Адамс, М. Введение в теорию оптических волноводов/ М. Адамс; пер. с англ.-М.:Мир,1984.-512 с.

[2] Снайдер, А. Теория оптических волноводов/ А. Снайдер, Дж. Лав Пер. с англ. под редакцией Е.М. Дианова и В.В. Шевченко. — М.:Радио и связь, 1987. — 656 с.

[3] Корсакова, С.В. Оптика и спектроскопия/ С.В Корсакова, Е.А. Романова, А.П.,Вельмузов et.al – 2018 - С.402-410.

[4] Бенуэлл, К. Основы молекулярной спектроскопии/К. Бенуэлл: Пер. с англ. — М.: Мир, 1985. — 384 с.

[5] Беккер, Ю. Спектроскопия/ Ю.Беккер;-М.: Техносфера, 2009. - 528 с

[6] Д.Б. Шумкова, А.Е. Левченко, Специальные волоконные световоды – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011 – 178 с.

[7] <http://foos.sfedu.ru/glava1/1.3.html>

[8] Кузюткина Ю.С. Особенности нелинейного оптического отклика в халькогенидных стёклах вблизи края полосы фундаментального поглощения, СГУ, 2015 – 141 с.

[9] Гречишников, В. М. Схемотехника волоконно-оптических устройств: учеб. пособие / В.М. Гречишников. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. – 172 с.

[10] Введение в спектроскопию для учебных лабораторий <http://www.oemoptic.ru/docs/OOILabBook.pdf>

[11] Heo J., Monica Rodrigues M., Saggese S.J., Sigel G.H.// J. of Appl.Opt. 1991. V.30. № 6. P.3944 – 3951. doi 10.1364/AO.30.003944

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

[13] Sanghera J. S., Kung F. H., Pureza P. C., Nguyen V. Q., Miklos R. E., Aggarwal I. D.// J. of Appl. Opt. 1994. V.33. №27. P. 6315 – 6322. doi 10.1364/AO.33.006315

[14] Sanghera J.S., Kung F.H., Busse L.E., Pureza P.C., Aggarwal I.D.// J. Am. Ceram. Soc. 1995. V. 78. №8. P. 2198 – 2202. doi 10.1111/j.1151-2916.1995.tb08636.x

[15] Katz M., Katzir A., Schnitzer I., Bornstein A. // J. of Appl. Opt. 1994. V. 33. № 25. P.5888 – 5894. doi 10.1364/AO.33.005888

[16] 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.doi 10.1109/JSTQE.2016.2630846

[17] Korsakova S., Romanova E., Velmuzhov A., Kotereva T., Sukhanov M., Shiryaev V.// J. Non-Cryst. Solids.2017.V.475.P.38-43. doi 10.1016/j.jnoncrysol.2017.08.027

[18] Krug A., Kellner R.// J. Mol. Struct. 1993. V.294. P. 211-214. doi 10.1016/0022-2860(93)80352-V

[19] Artyushenko V., Schulte F., Zabarylo U., Berlien H.-P., Usenov I., Saeb Gilani T., Eichler H., Pieszczek Ł., Bogomolov A., Krause H., Minet O.// Proc. of SPIE. 2015. V. 9537. P. 953720-1 - . 953720-10. doi 10.1364/ECBO.2015.953720

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

[21] Michel K., Bureau B., Boussard-Plédel C., Jouan T.,Adam J.L., Staubmann K., Baumann T./ Sens. Actuators B. 2004.101.P. 252–259. doi 10.1016/j.snb.2004.03.014

[22] Дианов Е. М., Плотниченко В. Г. Инфракрасные волоконные световоды, – М: «Знание» 1991 г. – 64 с.