

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**БИКОНИЧЕСКИЕ СЕНСОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ  
ВОЛОКОННЫХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ  
студента 2 курса направления 03.04.02 «Физика» Института физики  
Рассыпнова Дмитрия Александровича

Научный руководитель  
профессор, д.ф.-м.н.

Е. А. Романова

Заведующий кафедрой  
общей, теоретической и  
компьютерной физики  
профессор, д.ф.-м.н.

В.М. Аникин

Саратов

2024

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** данной выпускной квалификационной работы определяется тем, что датчики, позволяющие определять химический состав газовой или водной среды, востребованы в различных сферах жизнедеятельности человека, они ускоряют процесс мониторинга и контроля окружающей среды. Для обеспечения качественного контроля за постоянно текущими промышленными и экологическими процессами могут быть использованы волоконно-оптические спектроскопические датчики, которые имеют значительные преимущества: быстродействие, 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 позволило бы эффективно решать производственные, экологические и научные задачи.

Халькогенидные волоконные световоды, имеющие низкие оптические потери в области 1 – 15 мкм (в зависимости от состава), являются наиболее подходящим материалом для создания волоконных спектроскопических датчиков среднего ИК диапазона.

Использование халькогенидного световода в качестве сенсорного элемента (СЭ) в спектроскопическом датчике основано на поглощении световой волны, распространяющейся в световоде, в исследуемой среде.

Основными компонентами спектроскопического датчика являются источники, приемники излучения, сенсорные элементы и среда для передачи информационного сигнала.

**Цель работы:** методом компьютерного моделирования исследовать свойства мод и выходные характеристики сенсорного элемента волоконного спектроскопического датчика в виде многомодового халькогенидного световода с плавным биконическим пространственным переходом в виде перетяжки, погруженного в поглощающую жидкость.

### **Задачи работы:**

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 мод регулярного халькогенидного световода, погруженного в водный раствор изопропилового спирта, в полосе поглощения жидкости в среднем ИК диапазоне при разных диаметрах световода и концентрациях раствора.

5. Провести расчет пропускания биконического сенсорного элемента с использованием метода локальных мод. Исследовать зависимость пропускания от геометрических параметров сенсорного элемента.

6. Построить зависимости пропускания биконического сенсорного элемента от концентрации водного раствора изопропилового спирта.

**Научную новизну** составляют данные по расчету выходных характеристик волоконно-оптического спектроскопического датчика с сенсорным элементом в виде биконического световода.

**Структура и объём работы.** Выпускная квалификационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемых источников (21 наименование). Общий объём работы составляет 48 страницы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность работы, практическая значимость результатов исследования. Особое внимание уделяется использованию бесструктурного халькогенидного световода в качестве сенсорного элемента. Обосновывается необходимость применения спектроскопического датчика в различных областях жизнедеятельности человека.

**В первой главе** описывается метод волоконной эванесцентной спектроскопии. Спектроскопия среднего ИК диапазона - это надежное средство определения химического состава различных сред. Халькогенидные световоды, область прозрачности которых приходится на диапазон длин волн 0.5 - 20 мкм, являются подходящей средой для распространения излучения среднего ИК диапазона. На основе халькогенидных световодов можно создавать спектроскопические датчики для дистанционного контроля технологических процессов, мониторинга состояния воздуха и воды, состояния биологических тканей в реальном времени.

**Во второй главе** рассматриваются свойства халькогенов - химических элементов VI группы периодической системы Д.И. Менделеева. К халькогенам относятся кислород (O), сера (S), селен (Se), теллур (Te) и полоний (Po). Халькогенидные стеклообразные полупроводники являются сплавами халькогенов и элементов пятой (мышьяк As, сурьма Sb) или четвёртой (кремний Si, германий Ge) групп периодической системы.

Физические и химические свойства халькогенов изменяются с увеличением порядкового номера и появлением новых электронных слоёв. Прозрачность в ИК-диапазоне наряду с химической стойкостью, устойчивостью к расстеклованию позволяет рассматривать халькогенидные стёкла как конкурентоспособный материал для ИК-волоконных световодов.

Экспериментальная установка для создания биконических световодов состоит из: вертикальной 30-сантиметровой кварцевой трубки с нагревателем Ni-Cr, установленной на прецизионной 3-осевой подвижной платформе и

снабженной системами регулирования температуры и расхода газа; двух моторизованных микропозиционеров (Zaber A105L) с возможностью позиционирования закрепленного на них оптоволокна по отношению к нагревателю и регулирования силы натяжения; InGaAs фотодетектора и одномодового диодного лазера с волоконным выходом и рабочей длиной волны 1.6 мкм для *in situ* контроля интенсивности сигнала при изготовлении биконической перетяжки; микроскопа, снабженного CCD камерой для *in situ* контроля процесса изготовления биконической перетяжки; компьютера снабженного программным комплексом LabView для управления экспериментальным стендом, а также сбора и хранения информации. Задаваемая геометрия биконической перетяжки формируется соотношением скоростей движения платформ микропозиционеров, а также температурой и потоком аргона.

**В третьей главе** описаны лучевой и волновой подходы в теории волоконных световодов. Рассматриваются световые волны в круглом диэлектрическом стержне. Структура цилиндрической геометрии (рисунок 1), состоит из однородной сердцевины с радиусом  $a$  и показателем преломления  $n_1$ , окруженной бесконечной однородной оболочкой с показателем преломления  $n_2$ . Ось стержня совпадает с осью  $z$  цилиндрической системы координат.

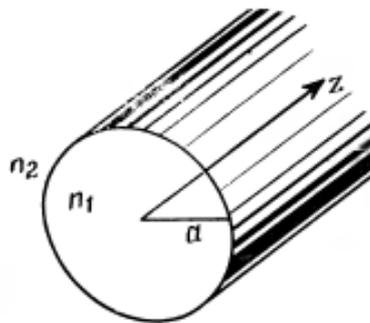


Рисунок 1 - Круглый диэлектрический стержнеобразный волновод с неограниченными размерами вдоль оси  $z$ .

Если на заданной рабочей частоте параметры световода выбрать так, чтобы следующие высшие моды с более высокими частотами отсечки не могли распространяться, то получим одномодовый световод, т. е. световод с одной только распространяющейся модой  $HE_{11}$ .

Для определения параметров мод световода надо решить характеристическое уравнение.

**В четвертой главе** описаны волноводы с плавно меняющимися параметрами. В волоконных световодах можно создавать пространственные переходы, зависящие от продольной координаты, например, при изменении радиуса сердцевины. Рассмотрим неоднородности, которые изменяются достаточно плавно вдоль оси световода. Световоды с меняющимися по длине параметрами трансляционно неинвариантны, и поэтому в общем случае для таких структур не существует точных решений уравнений Максвелла. Однако, если параметры световода меняются плавно, моды некоторого невозмущенного световода точно аппроксимируются решением уравнений Максвелла

внутри локальных областей. Такие приближенные моды называются локальными.

В нерегулярных световодах большинство важных для практики проблем можно легко решить с помощью метода локальных мод. Однако поля локальных мод будут хорошей аппроксимацией точных полей только в том случае, если неоднородности изменяются вдоль световода достаточно плавно.

**В пятой главе** проводится компьютерное моделирование биконического сенсорного элемента для волоконной спектроскопии. Приведён расчёт коэффициентов затухания локальных мод для регулярного световода.

Если сенсорный элемент погружен в поглощающую жидкость, уменьшение мощности излучения в световоде происходит за счет поглощения во внешней среде. Показатель преломления внешней среды является комплексным, и его мнимая часть определяется коэффициентом поглощения среды. Излучение в световоде представляется как сумма направляемых мод, причем, продольная постоянная распространения каждой моды также является комплексной и зависит от доли мощности излучения, распространяющегося в поглощающей среде за пределами сердцевины световода. Комплексная величина  $\beta$  на заданной длине волны может быть определена путем решения характеристического уравнения для каждой моды световода. Коэффициент затухания мощности моды равен  $2\beta''$  ( $\beta''$  – мнимая часть  $\beta$ ).

Были рассчитаны коэффициенты затухания мод  $HE_{1m}$  многомодового бесструктурного световода из стекла состава  $Ge_{20}Se_{80}$  (селенид германия) для биконического световода, радиус сердцевины которого меняется от 250 мкм до 70 мкм. Профиль биконического световода вдоль оси  $z$  является экспоненциальным (рисунок 2).

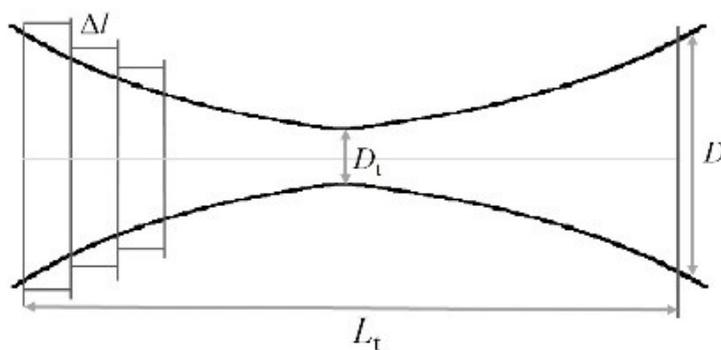


Рисунок 2 - Профиль биконического световода

В расчетах в качестве модельной жидкости для химического анализа использован водный раствор изопропилового спирта. Спектр пропускания регулярного световода, погруженного в такой раствор, измеренный при разных концентрациях спирта, показан на рисунке 3. Для расчетов была выбрана длина волны  $\lambda = 10.56$  мкм в минимуме соответствующей полосы поглощения.

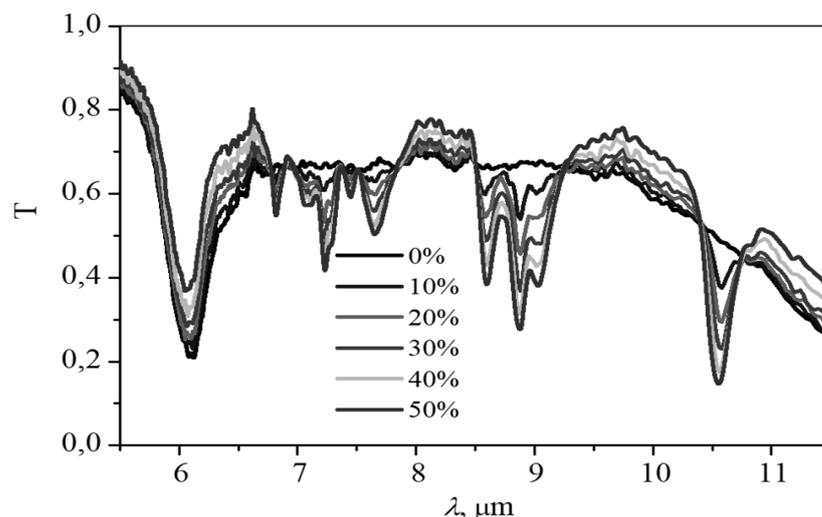


Рисунок 3. Спектры пропускания регулярного халькогенидного световода, погруженного в водный раствор изопропилового спирта разной объемной концентрации

В расчетах рассматривались объемные концентрации изопропилового спирта от 0 до 50 %. Молярные концентрации, соответствующие таким объемным концентрациям, показаны на рисунке 4.

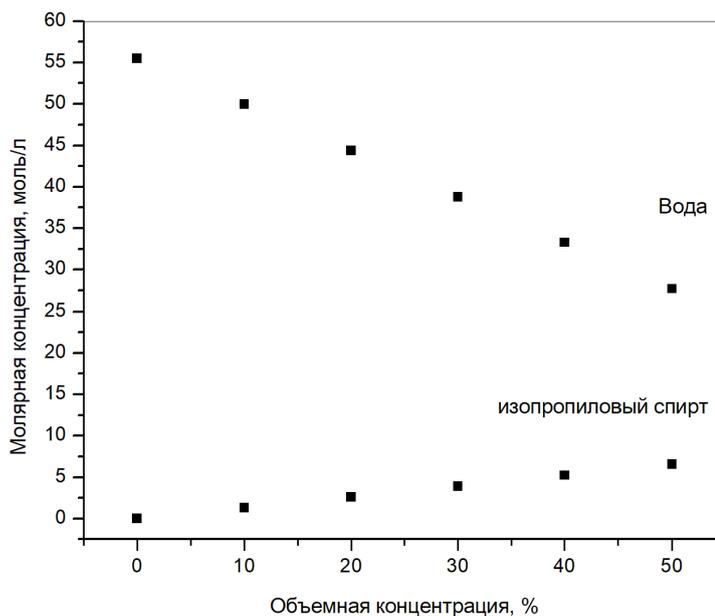


Рисунок 4.

Исследуем зависимость коэффициента затухания локальной моды от радиального порядка для каждого сегмента биконического световода с радиусом  $a_i$  и длиной  $\Delta l$  (рисунок 5). Коэффициенты затухания рассчитываются для мод бесконечного вдоль оси  $z$  световода с разным радиусом  $a_i$ , в соответствии с геометрией сенсорного элемента.

Молярные коэффициенты поглощения воды и изопропилового спирта на длине волны 10.56 мкм равны 125 л/см/моль и 6.65 л/см/моль, соответственно.

Для световода из стекла состава  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{80}$   $n_1 = 2.39$  - показатель преломления сердцевинки, для водного раствора спирта  $n_2 = 1.35$  - действительная часть показателя преломления жидкости (оболочки). Мнимая часть показателя преломления раствора рассчитывается как  $n'' = \alpha / (2k)$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\alpha$  - коэффициент поглощения раствора, который определяется по формуле

$$\alpha = (\alpha_{mol}^1 \cdot C_M^1 + \alpha_{mol}^2 \cdot C_M^2) \cdot \ln(10)$$

Где  $\alpha_{mol}^1$  и  $\alpha_{mol}^2$  - молярные коэффициенты поглощения воды и изопропилового спирта,  $C_M^1$  и  $C_M^2$  - молярные концентрации воды и изопропилового спирта, соответственно.

Значение параметра волновода  $v$  задается формулой:

$$v = a \cdot k \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Число мод каждого типа в световоде зависит от его радиуса и определяется по условию отсечки для данного типа мод.

Представим результаты расчетов зависимости коэффициентов затухания мод  $\text{HE}_{1m}$  от радиального порядка моды на рисунке 5. При заданном радиусе сердцевинки коэффициент затухания больше у мод более высоких порядков, потому что электромагнитное поле моды сильнее выходит за пределы сердцевинки у высших мод. При увеличении радиуса сердцевинки уменьшается коэффициент затухания у каждой моды. При увеличении объемной концентрации изопропилового спирта коэффициент затухания увеличивается.

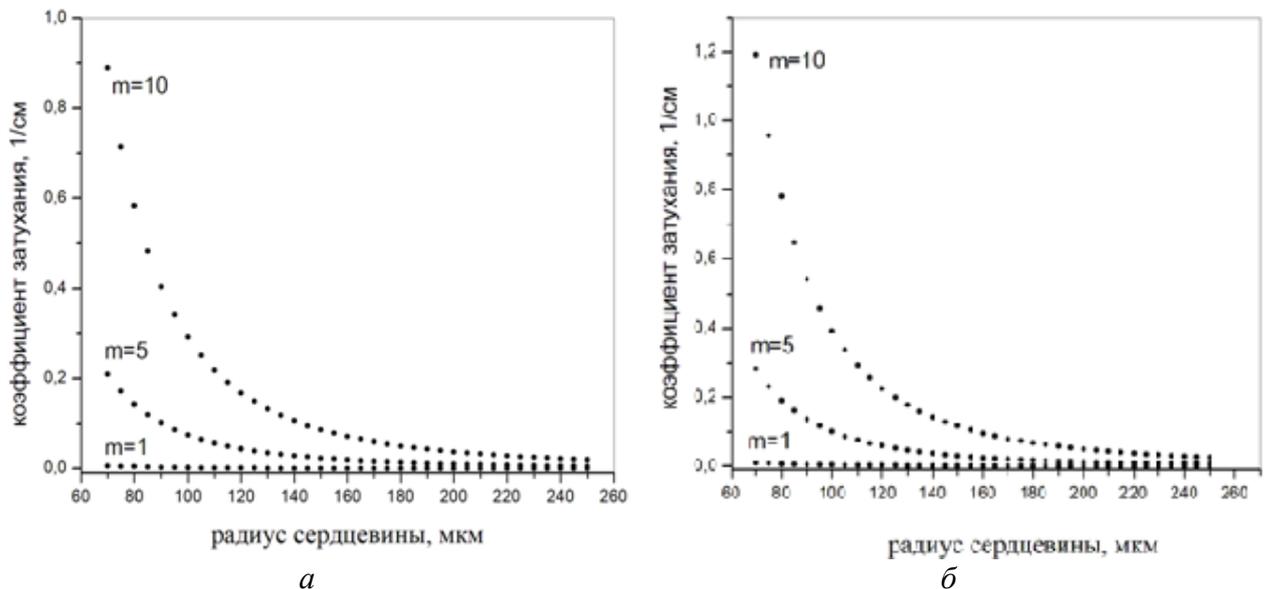


Рисунок 5. Коэффициент затухания локальной моды в зависимости от радиуса сердцевинки световода при объемной концентрации изопропилового спирта 0% (а), 10% (б)

Для расчета пропускания сенсорного элемента использовался метод локальных мод. Мощность локальной моды  $HE_{1m}$  уменьшается на длине  $\Delta l$   $i$ -го сегмента (рисунок 5.1) из-за поглощения, а коэффициент пропускания:

$$T_{m,i}(\Delta l) = P_{m,i}(\Delta l) / P_{m,i}(0) = \exp(-\eta_{m,i} \cdot \Delta l)$$

Полное пропускание биконического сенсорного элемента для заданной локальной моды определяется как произведение пропускания этой моды, рассчитанного для каждого из  $N_c$  сегментов:

$$T_m(L) = \prod_i T_{m,i}^2(\Delta l), (i = 1, N_c)$$

На рисунке 6 показано уменьшение мощности излучения в разных модах при распространении вдоль биконического сенсорного элемента на половине его длины от максимального до минимального диаметра. Видно, что мощность уменьшается больше в модах более высоких порядков. Поскольку спад мощности излучения из-за поглощения в исследуемой среде зависит от концентрации раствора, можно построить калибровочные графики.

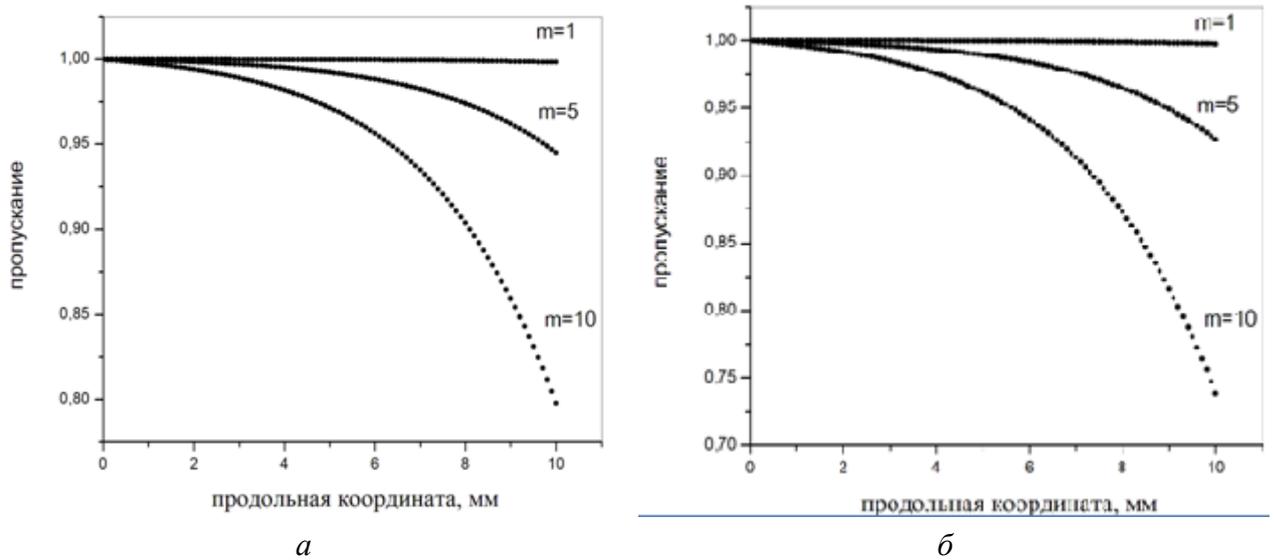


Рисунок 6. Пропускание биконического сенсорного элемента в зависимости от продольной координаты при объемной концентрации изопропилового спирта 0% (а), 10% (б).

На рисунке 7 показаны калибровочные графики в виде зависимости пропускания биконического сенсорного элемента разной геометрии от объемной концентрации раствора. Были выбраны три структуры с разными значениями максимального и минимального радиуса сердцевин: структура 1:  $a_1=250$  мкм,  $a_2=70$  мкм; структура 2:  $a_1=200$  мкм,  $a_2=56$  мкм; структура 3:  $a_1=150$  мкм,  $a_2=42$  мкм. Видно, что с пропускание уменьшается при увеличении объемной концентрации, причем для каждой моды наклон кривой  $T(C)$  зависит от геометрии сенсорного элемента.

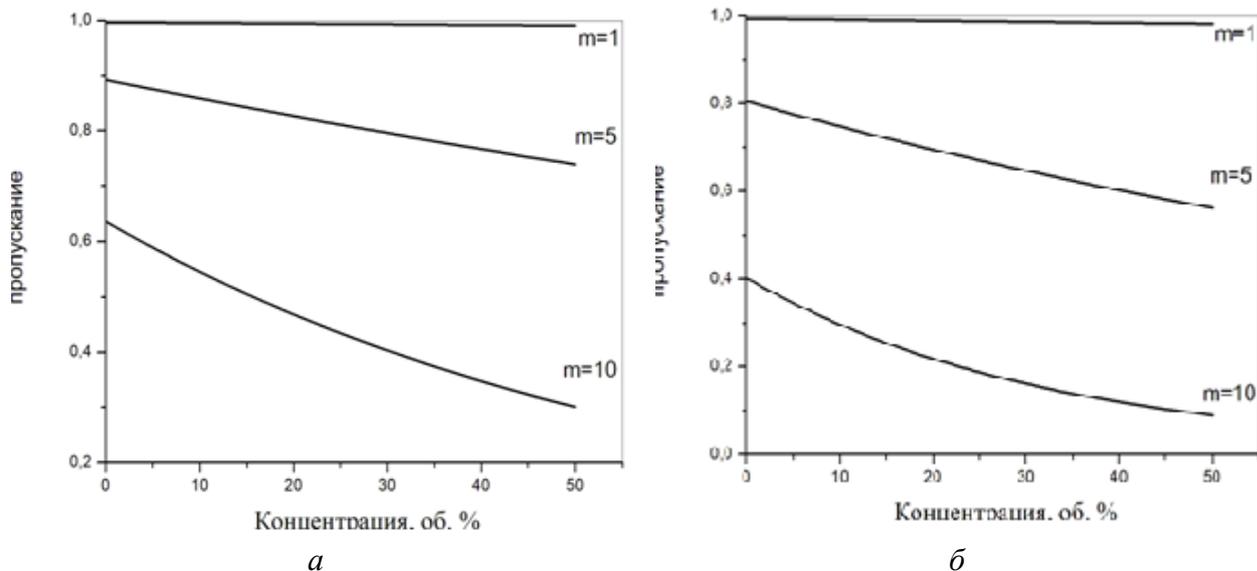


Рисунок 7 – Пропускание биконического сенсорного элемента рассчитанное для отдельных мод структуры 1 (а) и структуры 2 (б), в зависимости от объемной концентрации изопрпилового спирта.

Определим для каждой моды чувствительность сенсорного элемента как производную  $dT/dC$ . На рисунке 8 показаны графики производной для трех структур сенсорных элементов с той же геометрией. Видно, что у структуры 1 самую высокую чувствительность при всех  $C$  имеет мода с  $m=10$ . У структуры 2 мода с  $m=10$  имеет самую высокую чувствительность при  $C < 30\%$ , а при более высокой концентрации изопрпилового спирта самая высокая чувствительность получена у моды с  $m=5$ . В случае структуры 3 самую высокую чувствительность при всех  $C$  имеет мода с  $m=5$ . При  $C > 35\%$  мода с  $m=10$  имеет самую низкую чувствительность.

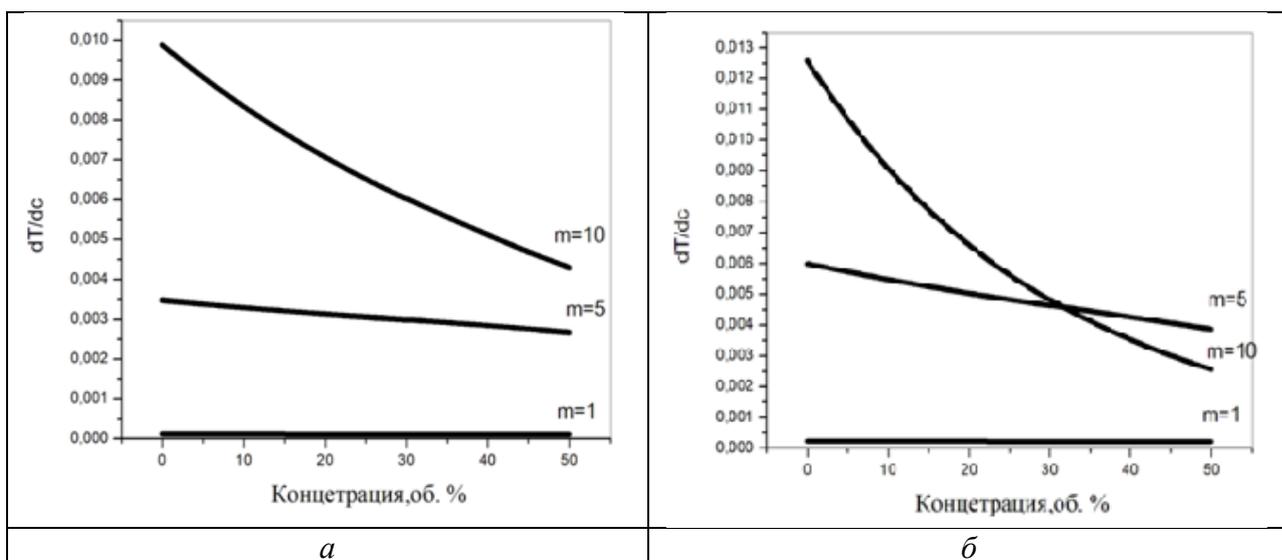


Рисунок 8 – Чувствительность сенсорного элемента, рассчитанная для отдельных мод структуры 1 (а) и структуры 2 (б)

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенного компьютерного моделирования получены выходные характеристики волоконно-оптического спектроскопического датчика с сенсорным элементом в виде биконического световода.

Построены зависимости пропускания сенсорного элемента от концентрации раствора для трех структур с разными значениями минимального и максимального радиуса сердцевины световода.

Для каждой структуры рассчитаны чувствительность и построены графики зависимости чувствительности от концентрации раствора. Расчеты проводились для отдельных мод  $HE_{1m}$  с разными радиальными индексами.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) Зависимость пропускания от концентрации раствора зависит от радиального порядка моды. Чем выше порядок моды, тем сильнее падает мощность в сенсорном элементе из-за поглощения во внешней среде, потому что чем выше порядок моды, тем больше ее коэффициент затухания.

2) Чувствительность сенсорного элемента зависит от геометрии структуры. Подбирая величину максимального и минимального радиуса световода, можно получить высокую чувствительность на заданном интервале концентраций раствора.

3) Поскольку чувствительность сенсорного элемента зависит от порядка моды, селективное возбуждение отдельных мод позволит увеличить чувствительность датчика.

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

- [8] Гречишников, В. М. Схемотехника волоконно-оптических устройств: учеб. пособие / В.М. Гречишников. Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. 172 с.
- [9] 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
- [10] Jonas R.E., Braiman M.S. // J.Appl. Spectrosc. 1993.V. 47. №11.P.1751 – 1759. doi 10.1366/0003702934066118
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [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.doi 10.1109/JSTQE.2016.2630846
- [15] 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
- [17] Krug A., Kellner R.// J. Mol. Struct. 1993. V.294. P. 211-214. doi 10.1016/0022-2860(93)80352-V
- [18] Artyushenko V., Schulte F., Zabarylo U., Berlien H.-P., Usenov I., Saeb Gilani T., Eichler H., Pieszczyk Ł., Bogomolov A., Krause H., Minet O.// Proc. of SPIE. 2015. V. 9537. P. 953720-1 - . 953720-10. doi 10.1364/ECBO.2015.953720
- [19] Raichlin Y., Katzir A.// J.of Appl. Spectrosc.2008. V.62. №2.P.55A – 72A. doi 10.1366/000370208783575456
- [20] 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
- [21] Дианов Е. М., Плотниченко В. Г. Инфракрасные волоконные световоды, М: «Знание» 1991 г. 64 с.