

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

**ПЛАНАРНЫЙ ВОЛНОВОД КАК СЕНСОРНЫЙ ЭЛЕМЕНТ
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОГО ДАТЧИКА**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4022 группы
направления подготовки 03.03.02 «Физика» института физики
Рассыпнова Дмитрия Александровича

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

Е.А. Романова

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

В. М. Аникин

Саратов 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Последние достижения в нанотехнологиях позволяют создавать миниатюрные сенсорные устройства, которые превосходят и, возможно, заменяют их обычные громоздкие аналоги. Эти устройства основаны на знаниях и технологиях, разработанных в области микрофотоники, микрофлюидики и микроэлектроники, и привели к появлению платформ для «датчиков с чипом» или «лабораторий в кристалле». Конкурентные преимущества таких миниатюрных сенсорных устройств превосходят обычные датчики похожих конфигураций. Небольшая занимаемая площадь устройства открывает возможности для новых методов использования и системных приложений, таких как развертывание удаленной сенсорной сети. Эти сети, например, невозможно использовать (по причине дороговизны производства) при обычной конструкции большого размера. Наконец, интеграция различных функциональных компонентов в плоскую платформу обеспечивает расширенные интеллектуальные возможности.

Халькогенидные стекла (ХГ) хорошо известны своей высокой прозрачностью в инфракрасном диапазоне и способностью к изготовлению в виде волокон и тонких пленок, что делает их привлекательными кандидатами по созданию инфракрасных оптических датчиков. Недавние исследования были сосредоточены на разработке новой интегрированной сенсорной системы с повышенной чувствительностью и специфичностью, подходящей для использования в передовых приложениях химико-биологического обнаружения на основе новых материалов из халькогенидного стекла. Такой прогресс дает возможность оценить масштабируемость и экономичность при изготовлении и интеграции оптических конструкций и устройств для использования в химических и / или биологических сенсорах на основе чипов.

Новизна конструкции датчика на основе ХГ состоит в следующем.

Новые материалы из халькогенидного стекла с высоким показателем преломления для мультиспектрального химического зондирования позволяют расширить диапазон рабочих длин волн для устройств от УФ до видимого и дальнего инфракрасного спектра, а также использовать низкотемпературный процесс для изготовления оптического резонатора с атомно-гладкой поверхностью (это приводит к сильным взаимодействиям фотон-молекула и высокой чувствительности обнаружения).

По сравнению с оптоволоконными аналогами плоские резонаторные устройства на основе ХГ более механически устойчивы и легко удешевляются, чтобы обеспечить более масштабную интеграцию с другими встроенными фотонными и электронными устройствами, обеспечивающими полный спектр считывания оптических сигналов и функции обработки.

Механизм обнаружения оптических химических сенсоров из халькогенидного стекла основан на оптической абсорбционной спектроскопии, где устройство обнаруживает поглощение молекул-мишеней. Матрица характеристик оптических химических датчиков состоит из двух ключевых параметров: спе-

цифичность и чувствительность / точность. Специфика методики, обеспечивается подбором измеренных спектров с характерными для молекулярного поглощения отпечатками пальцев.

Примечательно, что такой принцип работы аналогичен принципу обычной инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием (ИСФП), и поэтому алгоритмы подбора данных и аналитические методы в данном случае подобны анализу главных компонент (АГК), традиционно используемые для анализа данных ИСФП, и также могут применяться для дальнейшего анализа данных.

Было обнаружено значительное улучшение способности идентификации молекул путем улучшения сенсорных поверхностей с помощью полимерных покрытий, разработанных для обеспечения избирательного обогащения целевых молекулярных частиц.

Вышеизложенное определяет актуальность темы данной выпускной квалификационной работы (ВКР).

Цель ВКР – выяснить причины затухания излучения в планарном волноводе, находящемся в поглощающей жидкой среде.

Задачи ВКР:

1. В рамках волновой теории оптических волноводов описать свойства мод двухслойного волновода из халькогенидного стекла, погруженного в ацетон, в области полос поглощения ацетона.

2. Провести анализ модового состава излучения в волноводе с заданной толщиной сердцевины, рассчитать постоянные распространения и поперечные профили мод.

3. Рассчитать коэффициенты затухания мод с разными поперечными порядками в максимуме полосы поглощения ацетона.

4. Рассмотреть зависимость коэффициента затухания от толщины сердцевины волновода и поперечного порядка моды.

Структура ВКР. Работа включает введение, четыре главы, заключение, список использованных источников (12 наименований), приложение с расчетными программами и результатами. Объем ВКР – 33 с.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируются аспектные характеристики работы – аспектных характеристик работы – актуальность тематики, методы исследования, объект и предмет исследования, цели и задачи исследования.

В главе 1 рассматривается физика планарных диэлектрических волноводов оптического диапазона на языке электромагнитных мод (направляемые волны, их структура, модовые числа и условия отсечки). В частности, приведены характеристические уравнения для ТЕ-моды и ТМ-моды.

В главе 2 рассмотрены основы эванесцентной спектроскопии на основе оптических волноводов.

В главе 3 приводятся структурная и оптическая характеристики халькогенидных стекол.

В главе 4 изучается затухание мод планарного волновода в поглощающей среде.

В заключении подводятся выводы и формулируются результаты работы.

Особенности эванесцентной спектроскопии. Освоение среднего ИК диапазона для передачи и обработки информации является одной из наиболее актуальных задач современной фотоники. Спектроскопия среднего ИК диапазона - это надежное средство определения химического состава различных сред. В этом диапазоне находятся полосы поглощения колебательных спектров жидких, газообразных и твердых веществ.

Для создания спектроскопических датчиков наиболее подходящим материалом являются халькогенидные стекла, прозрачные в области длин волн 1 – 15 мкм (в зависимости от состава). На основе халькогенидных световодов можно создавать спектроскопические датчики и сети датчиков для дистанционного контроля технологических процессов, мониторинга состояния воздуха и воды, состояния биологических тканей в реальном времени. Такие световоды могут передавать информацию по волоконно-оптическим сетям, а также использоваться как чувствительные элементы датчиков.

Создание спектроскопических датчиков на основе оптических волноводов особенно актуально для химического анализа жидких сред, так как поглощение излучения на колебательных переходах молекул в жидкости настолько велико, что характерные длины поглощения излучения в среднем ИК диапазоне составляют величины порядка нескольких микрон. Это создает определенные трудности при работе с объемными образцами, толщина которых в измерениях должна быть настолько мала, что не превышает длины волны излучения в полосе поглощения исследуемого вещества.

Волоконная эванесцентная спектроскопия – это метод, который позволяет перенести химический анализ веществ из лабораторных условий, на любую местность, т.е. дистанционно и при этом в режиме реального времени. До недавнего времени, еще не было компьютерных моделей, таких волоконно-оптических эванесцентных датчиков, поэтому данная сфера плохо изучена.

Большой проблемой является также согласование разных элементов датчика. Например, источника суперконтинуума на основе одномодового световода и многомодового сенсорного элемента.

При наличии поглощения во внешней среде направляемые моды световода становятся затухающими вдоль оси световода. Постоянные распространения мод становятся комплексными, причем, мнимая часть продольной постоянной распространения β является коэффициентом затухания поля моды световода.

Халькогенидные стекла. Самым распространенным материалом, используемым для изготовления оптических волноводов, является плавный кварц (SiO_2). Кварц, химически являющийся диоксидом кремния - один из самых распространенных минералов на Земле. Кварц - кристалл, но при температуре выше 1700 градусов он плавится и при последующем быстром охлаждении превращается в изотропное кварцевое стекло. Плавный кварц высокой чистоты

ты обладает чрезвычайно низкими оптическими потерями в видимом и ближнем ИК диапазонах и именно кварц является главным материалом в оптических кабелях.

Использование плавленого кварца с показателем преломления ~ 1.5 в качестве материала для изготовления оптического волновода не позволяет обеспечить высокую локализацию излучения в сердцевине. В качестве альтернативы можно использовать халькогениды, как материал с высоким показателем преломления ($n = 2,2 - 3,4$). Халькогениды имеют широкие спектральные окна прозрачности в средней ИК - области, известны высокой оптической нелинейностью и фоточувствительностью. Халькогениды в стеклообразном состоянии называются халькогенидными стеклами.

Основными составляющими халькогенидных стекол являются халькогены. Так называют элементы VI группы главной подгруппы периодической системы Д.И. Менделеева. К халькогенам относятся кислород (O), сера (S), селен (Se), теллур (Te) и полоний (Po). В природе они встречаются чаще всего в форме соединений меди (сульфидов, оксидов, селенидов и т.д.). Сера, селен и теллур, которые входят в состав оптических стекол, известны как в кристаллических, так и в аморфных модификациях.

Халькогенидные стекла являются типичными представителями стеклообразных полупроводников и представляют собой сплавы халькогенов с элементами пятой (мышьяк As, сурьма Sb) или четвертой (кремний Si, германий Ge) групп периодической системы Д.И. Менделеева. Типичные системы халькогенидных стекол: As - S - Se, Ge - S - Se, Ge - Se - Te, As - Se - Te, Ge - As - Se - Te и др. Отличительной особенностью этих стекол являются широкий диапазон прозрачности в инфракрасной области спектра и большие значения линейного и нелинейного показателей преломления.

Физические и химические свойства халькогенов изменяются с увеличением порядкового номера. Появление новых электронных слоёв влечет за собой увеличение радиусов атомов, с увеличением заряда ядра неметаллические свойства ослабевают, а металлические возрастают. Кислород и сера - типичные диэлектрики, селен и теллур - полупроводники.

Среди всех оптических стекол, халькогенидные стекла имеют наибольший нелинейный оптический отклик, который характеризуется нелинейной поляризацией третьего порядка. Значения керровской постоянной в этих стеклах на 2-3 порядка больше, чем в плавленом кварце, причем нелинейный отклик является быстрым (порядка нескольких фемтосекунд), что обусловлено электронным характером поляризации среды. Широкий диапазон прозрачности в инфракрасной области спектра, большие значения линейного показателя преломления, варибельность состава, высокая химическая стабильность - эти свойства определяют растущий интерес к исследованию и применению халькогенидных стекол.

На рисунке 1 показана диаграмма для линейного и нелинейного показателей преломления различных стекол. Видно, что сульфидные (As-S) и селенидные (As-Se) стекла имеют наибольшие значения этих коэффициентов.

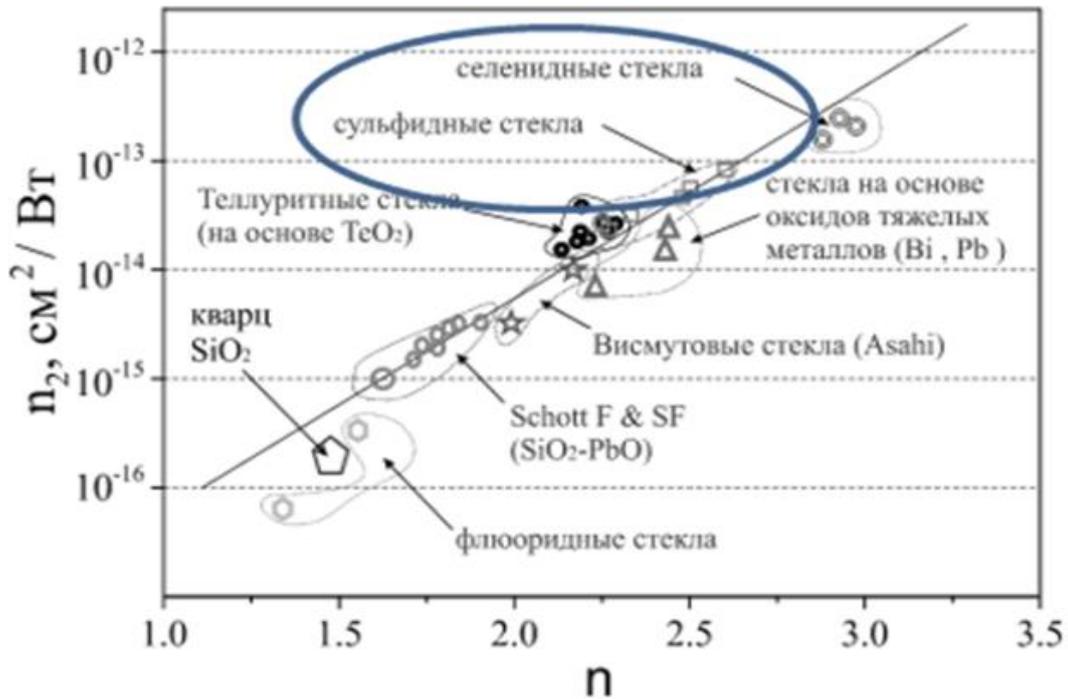


Рисунок 1 – Диаграмма показателей преломления оптических стекол

Халькогенидные стекла прозрачны в среднем ИК- диапазоне. Их область прозрачности перекрывает диапазон длин волн от 1 до 20 мкм (рисунок 2).



Рисунок 2 – Пропускание ИК - излучения в оптических стёклах

Оптические свойства халькогенидных стекол вблизи края полосы фундаментального поглощения определяются особенностями строения энергетических зон. Локализованные электронные состояния в запрещенной зоне приводят к появлению области экспоненциального спада в спектральной зависимости коэффициента однофотонного поглощения.

Халькогенидные стёкла являются идеальным материалом для разработки волоконно - оптических лазеров и усилителей, дистанционных передатчиков и других устройств, работающих в инфракрасном диапазоне длин волн от 1 до 10 мкм.

Халькогениды представляют собой универсальную платформу, которая уже использовалась в объемной системе, волокнах, плоских волноводах, плоских фотонно - кристаллических структурах, и совсем недавно - в геометрии микросфер. Прозрачность в ИК диапазоне длин волн и большая нелинейность третьего порядка делают халькогенидные стёкла перспективными материалами, представляющими интерес для современной фотоники. Они могут быть использованы в создании устройств волоконной и интегральной оптики, таких, как оптические переключатели, регенераторы оптического сигнала, широкополосные источники инфракрасного излучения, оптические датчики.

Они имеют большие нелинейные показатели преломления и большие коэффициенты усиления комбинационного рассеяния. Сочетание высокого волнового ограничения, достигаемое за счет высокого индекса контраста с кварцем и воздухом, и большим, позволяет изготавливать чрезвычайно компактные волокна и встроенные устройства.

Триселенид мышьяка (As_2Se_3), халькогенидное стекло, обладает особенно большим нелинейным показателем преломления $n_2 = 2,4 \times 10^{13} \text{ см}^2/\text{Вт}$ и большим коэффициентом усиления комбинационного рассеяния $5,1 \times 10^{-9} \text{ см}/\text{Вт}$, что составляет в 930 и 780 раз больше, соответственно, чем у кварцевого стекла. Триселенид мышьяка имеет широкую область прозрачности, от 1 до 17 мкм. Кроме того, As_2Se_3 имеет большой показатель преломления 2,83 и поглощение 5 м^{-1} при 1550 нм.

Затухание мод планарного волновода в жидкой поглощающей среде.
Рассмотрим планарный волновод (рисунок 3), сердцевина которого состоит из халькогенидного стекла состава As_2S_3 , а подложка – из плавленого кварца.

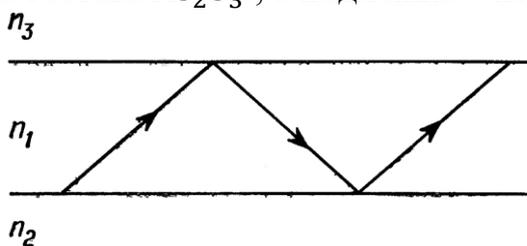


Рисунок 3 – Планарный волновод

Этот волновод погружен в чистый ацетон, спектр поглощения которого показан на рисунке 4.

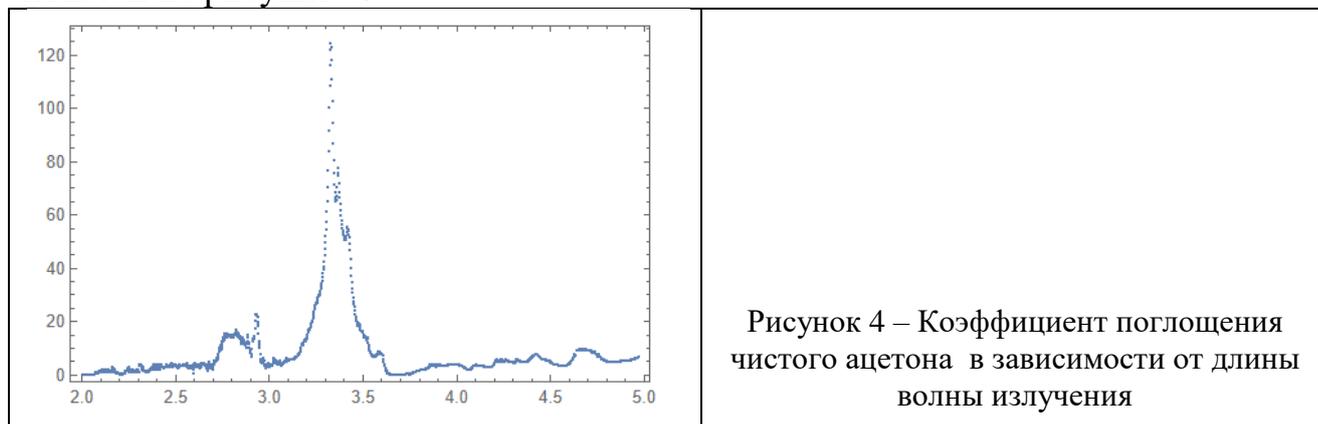


Рисунок 4 – Коэффициент поглощения чистого ацетона в зависимости от длины волны излучения

Численное решение уравнения для волновода с полутолщиной сердцевины $a = 2$ мкм показано на рисунке 5. Точки пересечения кривых с горизонтальной осью соответствуют параметру q характеристического уравнения для TE_{0m} мод с поперечным индексом m .

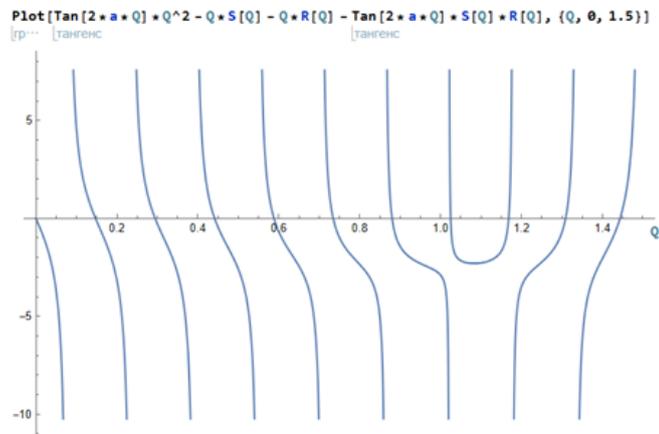


Рисунок 5 – Графическое решение характеристического уравнения для TE мод

Для получения постоянной распространения профиля поля моды надо решить характеристическое уравнение для TE мод и для TM мод в программе Mathematica.

На рисунке 6 а, б, в показаны профили полей мод с индексами $m = 0, 5, 10$.

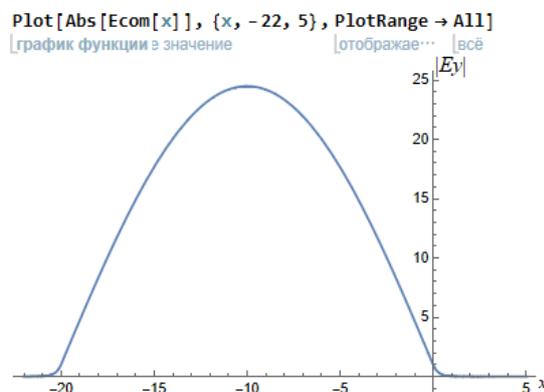


Рисунок 6 (а) – Профиль электрического поля TE_{0m} моды с индексом $m=0$

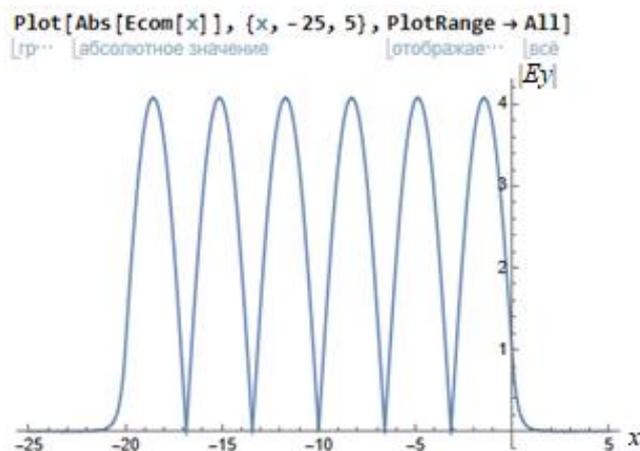


Рисунок 6 (б) – Профиль электрического поля TE_{0m} моды с индексом $m=5$

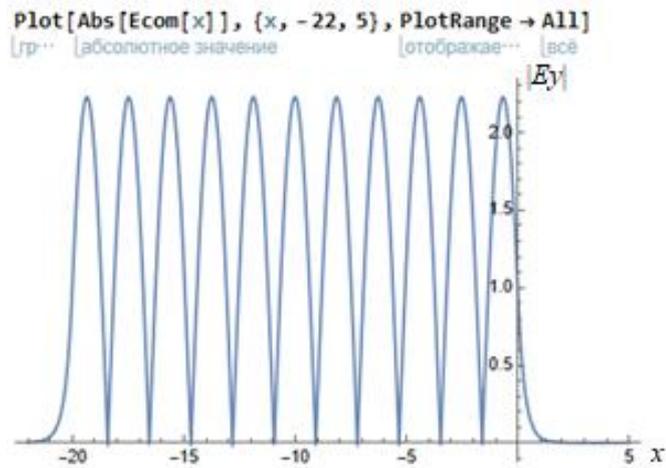


Рисунок 6 (в) – Профиль электрического поля TE_{0m} моды с индексом $m=10$

Рассчитаем коэффициенты затухания η мод волновода при поглощении излучения в ацетоне на длине волны 3.33 мкм для сердцевины толщиной 5 мкм (рисунок 7 (а-в)), 10 мкм (рисунок 8 (а-в)), 20 мкм (рисунок 9 (а-в)). На рисунках показаны как коэффициенты затухания, так и профили электрического поля некоторых мод, а также графическое решение характеристического уравнения.

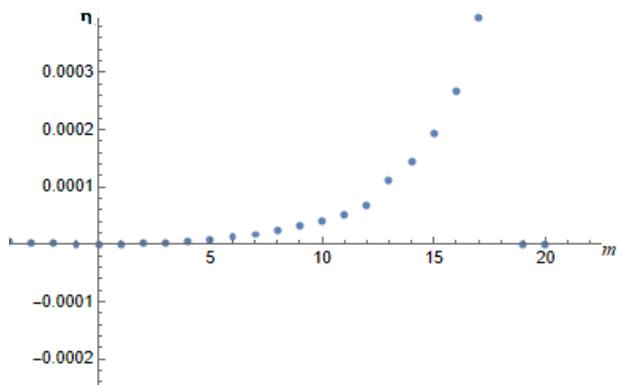


Рисунок 7 (а). Коэффициент затухания моды TE_m в зависимости от индекса моды, $a = 5$ мкм

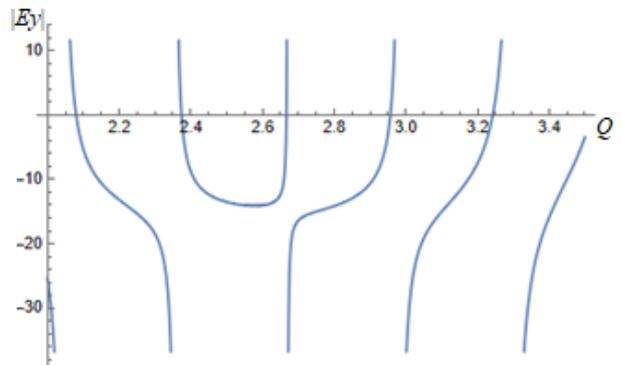


Рисунок 7 (б) – Графическое решение характеристического уравнения при $a = 5$ мкм

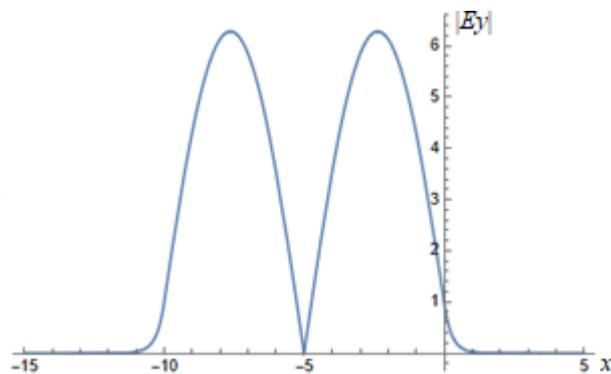


Рисунок 7 (в) – Профиль электрического поля TE_m моды при $m = 2$ и $a = 5$ мкм

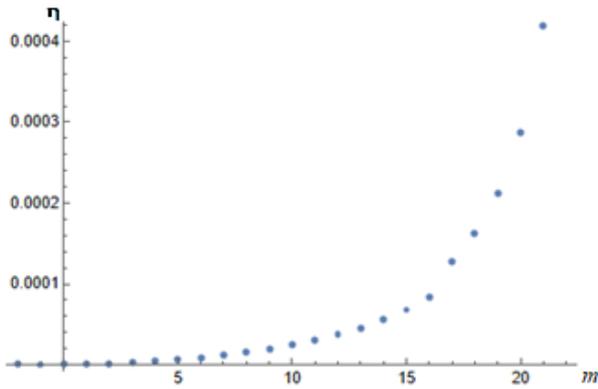


Рисунок 8 (а) – Коэффициент затухания моды TE_m в зависимости от индекса моды $a = 10$ мкм

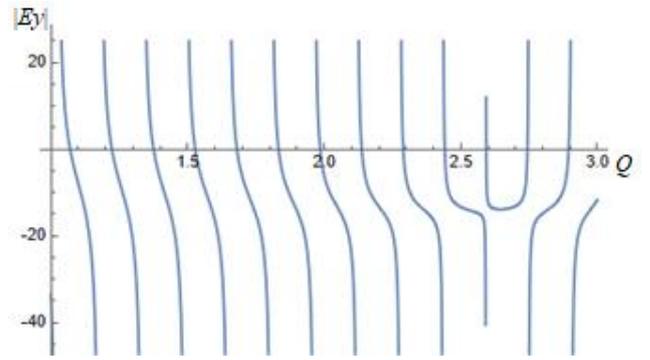


Рисунок 8 (б) – Графическое решение характеристического уравнения поля при $a = 10$ мкм

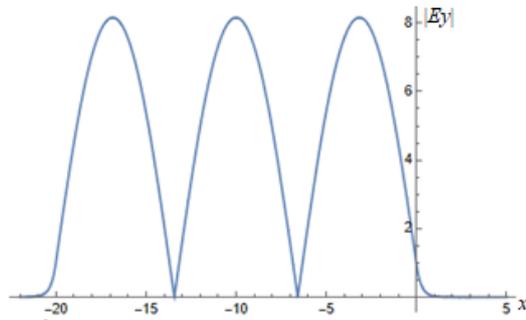


Рисунок 8 (в) – Профиль электрического поля TE_m моды при $m = 2$ и $a = 10$ мкм

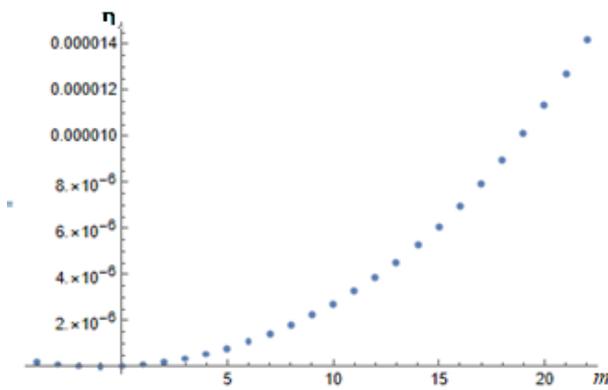


Рисунок 9 (а) – Коэффициент затухания моды TE_m в зависимости от индекса моды $a = 20$ мкм

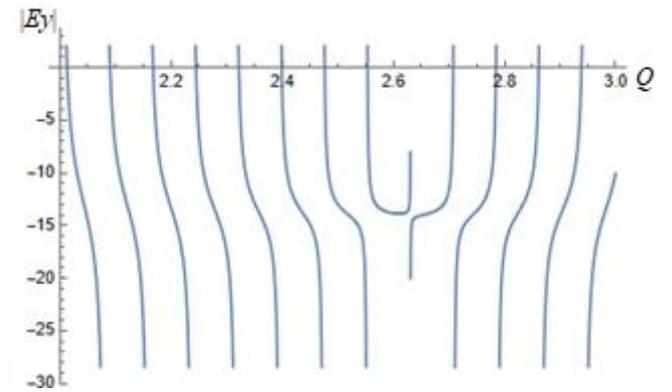


Рисунок 9 (б) – Графическое решение характеристического уравнения поля при $a = 20$ мкм.

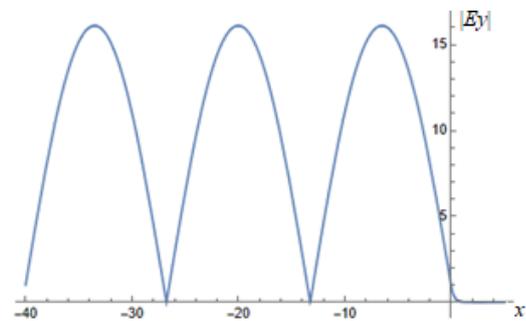


Рисунок 9 (в) – Профиль электрического поля TE_m моды $m = 2$ и $a = 20$ мкм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Планарный волновод может быть использован как сенсорный элемент волоконного спектроскопического датчика. В выпускной квалификационной работе описаны планарные волноводы и представлено их описание на языке электромагнитных мод.

Бурное развитие волоконной и интегральной оптики вызвано высокой практической эффективностью волоконно-оптических и интегрально-оптических устройств. Потребности современной техники передачи и обработки информации оптическими методами привели к разработке и созданию быстродействующих интегрально-оптических устройств различного назначения. Постоянно создаются все новые типы оптических волноводов и волноводных устройств, позволяющих повысить информационную емкость волоконных линий связи и быстродействие обработки информации в системах телекоммуникаций.

Для изготовления интегрально-оптических устройств используются стекла, полупроводниковые и диэлектрические монокристаллические материалы, а также оптические композиты. Промышленное производство таких устройств основано на традиционных технологиях микроэлектроники. В то же время, оптический характер сигналов, используемый в интегрально-оптических устройствах потребовал разработки новых материалов и создания новых технологических методов и приемов, которые уже успешно применяются в промышленности.

В рамках волновой теории оптических волноводов описаны свойства мод двухслойного волновода из халькогенидного стекла, погруженного в ацетон, в области полос поглощения ацетона.

Получены необходимые уравнения для решения поставленных задач и установлено, что коэффициент затухания моды в сенсорном элементе оптического датчика на основе планарного волновода растет с радиальным порядком моды, а также при уменьшении толщины сердцевины.

Использование высших мод, а также планарных волноводов в виде тонких пленок микронных и субмикронных размеров для химического анализа различных веществ позволит оптимизировать метод волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона: получить высокую чувствительность и сократить размеры датчика, уменьшить предел обнаружения вещества в растворе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Marcatili E.A.J., Schmeltzer R.A.. Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers // The bell system technical journal. 1964. P. 1783 – 1809.
2. Birch J.R., Cook R.J., Harding A.F., Jones R.G., Price G.D. The optical constants of ordinary glass from 0.29 to 4000 cm⁻¹ // J. Phys. D: Appl. Phys. 1975. – Vol. 8. P. 1353– 1358.

3. Katz M., Katzir A., Schnitzer I., et.al. Quantitative evaluation of chalcogenide glass fiber evanescent wave spectroscopy // *Applied Optics*. 1994.– V.33. I.25.
4. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов / пер. с англ. М. : Мир,1984. 512 с.
5. Блинов Л.Н. Моделирование, синтез, и исследование новых стеклообразных и кристаллических материалов. СПб.: СПбГПУ, 2010. 181с.
6. Борисова З. У. Халькогенидные полупроводниковые стекла. Л.: ЛГУ, 1983. 344 с.
7. Гринев А.Ю., Темченко В.С. Поверхностные электромагнитные волны в планарных диэлектрических волноводах. Москва. Издательство МАИ, 2006.
8. Коломиец Б.Т. Стеклообразные полупроводники. Л.: Знание, 1963. 43 с.
9. Конюхов А.И., Романова Е.А., Ширяев В.С. // *Оптика и спектроскопия*. 2013. Т.115, № 2. С. 288–296.
10. Корсакова С.В., Виноградова Е.А., Романова Е.А., Ширяев В.С. Использование высших мод халькогенидных световодов для оптимизации метода эванесцентной спектроскопии среднего ИК-диапазона // *Письма в журнал технической физики*. 2019. Вып.10. Т.45 С. 17 – 21.
11. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов / пер. с англ. под ред. Е.М. Дианова и В.В. Шевченко. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
12. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972. 534 с.