

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

**Дисперсионные свойства эванесцентных мод
халькогенидных волоконных световодов**

АВТОРЕФЕРАТ

ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ
студентки 2 курса 254 группы

направления 03.04.02 «Физика» физического факультета

Виноградовой Елены Александровны

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 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В различных сферах жизнедеятельности человека востребованы датчики, позволяющие определять химический состав газовой или водной среды. 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.

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 волоконных спектроскопических датчиков наиболее подходящим материалом являются халькогенидные волоконные световоды, прозрачные в области длин волн 1 – 15 мкм (в зависимости от состава). Халькогенидные световоды наиболее подходят для передачи и преобразования излучения в таких информационных оптических системах. 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.

При наличии поглощения во внешней среде направляемые моды бесструктурного световода (световода, состоящего из стеклянной сердцевины, но

без стеклянной оболочки) становятся эванесцентными – т.е. затухающими вдоль оси световода. Постоянные распространения мод становятся комплексными, причем, мнимая часть продольной постоянной распространения является коэффициентом затухания моды световода.

Создание волоконно-оптических эванесцентных датчиков 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. Метод волоконной эванесцентной спектроскопии был использован, в частности, для определения химического состава жидкостей.

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. Поэтому разработка устройств, в которых будут лучше согласовываться разные элементы датчика, является актуальным вопросом на данный момент.

Цель работы выявление особенностей дисперсионных свойств мод многомодового халькогенидного световода в ближнем и среднем ИК диапазоне на основе компьютерного моделирования сенсорного элемента волоконного датчика для эванесцентной спектроскопии.

Задачи работы:

1. Изучить дисперсионные свойства халькогенидных стекол составов As_2S_3 , As_2Se_3 , $As_{30}Se_{50}Te_{20}$.
2. Провести расчет коэффициентов затухания эванесцентных мод многомодового халькогенидного световода, погруженного в поглощающую жидкость, в области полос поглощения в среднем ИК диапазоне.
3. Провести расчет параметра дисперсии групповой скорости мод многомодового халькогенидного световода, используемого как сенсорный элемент волоконного датчика, в ближнем и среднем ИК диапазоне.
4. Определить возможность получения суперконтинуума в многомодовом халькогенидном световоде с накачкой в ближнем ИК диапазоне.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура и объём работы. Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объём работы составляет 46 страниц.

Во введении обосновывается актуальность работы, обсуждается научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе описываются моды волоконных световодов.

Рассмотрим направляющую структуру цилиндрической геометрии (рисунок 1), состоящую из однородной сердцевины с радиусом a и с показателем преломления n_1 , окруженной бесконечной однородной оболочкой с показателем преломления n_2 . Ось стержня совпадает с осью z цилиндрической системы координат.

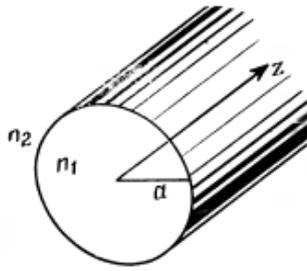


Рисунок 1 - Волоконный световод с круговой симметрией поперечного сечения и неограниченными размерами вдоль осей r и z .

Параметр высоты профиля, или относительная разность показателей преломления

$$\Delta = \frac{1}{2} (1 - n_2^2/n_1^2) \quad (1)$$

Мода представляет собой математическое и физическое понятие, связанное с процессом распространения электромагнитных волн в волноводе.

Рассмотрим характеристическое уравнение:

$$\left[\frac{J'_v(u)}{uJ_v(u)} + \frac{K'_v(w)}{wK_v(w)} \right] \left[\frac{J'_v(u)}{uJ_v(u)} + (1 - 2\Delta) \frac{K'_v(w)}{wK_v(w)} \right] = \left(\frac{v\beta}{kn_1} \right)^2 \left(\frac{u}{vw} \right)^4.$$

Здесь J'_v и K'_v - производные функций Бесселя и Макдональда, u и w - параметры моды в сердцевине и оболочке, соответственно, $\beta = \sqrt{k^2 n_1^2 - u^2 / R^2}$ - продольная постоянная распространения моды, $V = k \cdot R \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ - параметр волокна, $k = 2\pi/\lambda$, R - радиус сердцевины, n_1 - показатель преломления сердцевины, n_2 - показатель преломления оболочки.

Во второй главе дается общая характеристика халькогенидных стекол. Халькогенидные стеклообразные полупроводники являются типичными представителями стеклообразных полупроводников и представляют собой сплавы халькогенов с элементами пятой (мышьяк As , сурьма Sb) или четвертой (крем-

ний 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.

Халькогенидные стекла системы As-S-Se являются прозрачными в ИК диапазоне длин волн. Халькогенидные стекла представляют интерес для создания компактных нелинейных оптических устройств ближнего и среднего ИК диапазона.

В третьей главе описываются дисперсионные свойства мод халькогенидных световодов.

Показатели преломления стёкол рассчитывались по формулам Зельмейера

$$n^2 = 1 + \sum_i \frac{A_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - B_i^2} .$$

Дисперсия обычно определяется как зависимость постоянной распространения β в диэлектрической среде от частоты. Используя ряд Тейлора относительно угловой оптической частоты ω , ряд для постоянной β может быть записан в следующем виде:

$$\beta(\omega) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n(\omega) = \frac{\omega}{c} \cdot n(\omega) = \sum_{m \in \mathbb{N}_0} \left(\frac{1}{m!} \frac{d^m \beta}{d\omega^m} \Big|_{\omega=\omega_0} \cdot (\omega - \omega_0)^m \right)$$

Форма оптического импульса не зависит от β_1 . Изменение формы импульса связано с дисперсией второго порядка

$$\beta_2 \equiv GVD = \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} .$$

Параметр β_2 соответствует изменению обратной групповой скорости в зависимости от частоты ω , и измеряется в единицах $[S^2/m]$ или в $[fs^2/mm]$.

В волоконной оптике для оценки дисперсии принято использовать параметр дисперсии групповой скорости $D = \frac{d\beta^2}{d\lambda} = \frac{d^2\beta}{d\lambda \cdot d\omega}$. Этот параметр определен как изменение параметра первого порядка дисперсии β_1 с длиной волны λ .

Параметр дисперсии групповой скорости D в волоконной оптике обычно дается в единицах $\left[\frac{нс}{нм \cdot км} \right]$ и может использоваться, чтобы вычислить различие в групповой задержке двух оптических импульсов с различными центральными длинами волн после расхождения в оптоволокне с длиной L .

В четвертой главе описывается нелинейное преобразование частоты излучения в высших модах халькогенидного световода.

Традиционно для теоретического описания нелинейного распространения света в оптических волокнах использовалось нелинейное уравнение Шредингера. При распространении сверхкоротких импульсов требуется модификация этого уравнения. Различные авторы рассмотрели эффект дисперсии третьего порядка и эффект изменения формы огибающей импульса. Чтобы описать эффект комбинационного рассеяния [18], уравнения рассматривались с учетом как действительной части, так и мнимой части нелинейной восприимчивости третьего порядка.

Распространение света в одномодовом волокне с нелинейностью третьего порядка описывается скалярным волновым уравнением для электрического поля $E(t, r)$:

$$\Delta E(t, r) - (1/c^2) \frac{\partial^2 D(t, r)}{\partial t^2} = \left(\frac{4\pi}{c^2} \right) \frac{\partial^2 P^3(t, r)}{\partial t^2},$$

где $\Delta = \partial^2/\partial z^2 + \Delta_{\perp}$ - оператор Лапласа. Линейная электрическая индукция D и нелинейная поляризация третьего порядка $P^{(3)}$ описываются выражениями:

$$D(t, r) = \int \varepsilon(t', r) E(t - t', r) dt',$$

$$P^{(3)}(t, r) = E(t, r) \int R(t') |E(t - t', r)|^2 dt',$$

где $\varepsilon(t)$ и $R(t)$ - функции линейного и нелинейного отклика среды, соответственно, причем, $R(t)$ содержит как мгновенный электронный отклик, так и запаздывающий рамановский отклик [4]. Электрическое поле $E(t, r)$ можно представить как суперпозицию монохроматических волн:

$$E(t, r) = \int d\omega E(\omega, z) U(\omega, r_{\perp}) \exp[i\beta(\omega)z - i\omega t],$$

где $U(\omega, r_{\perp})$ - поперечный профиль моды волокна, $U(\omega, 0, 0) = 1$, $\beta(\omega) = n_{\text{eff}}(\omega) \cdot \omega / c$ - постоянная распространения моды, а $n_{\text{eff}}(\omega)$ - эффективный показатель преломления. При усреднении по поперечным координатам r_{\perp} , уравнение (5.5) сводится к уравнению:

$$\frac{\partial E(\omega, z)}{\partial z} = \frac{i2\pi\omega}{cn_{\text{eff}}(\omega)} \int d\omega' \int d\omega'' \left[\begin{array}{l} G(\omega, \omega', \omega'') \times E(\omega', z) E(\omega'', z) \cdot \\ E^*(\omega' + \omega'' - \omega, z) \times \chi^{(3)}(\omega - \omega') \exp(i\Delta\beta z) \end{array} \right],$$

$\chi^{(3)}(\omega) = \int R(t) \exp(i\omega t)$ - нелинейная восприимчивость третьего порядка. Действительная часть $\chi^{(3)}(\omega)$ отвечает за параметрические эффекты и эффект самомодуляции фазы, а мнимая часть отвечает за рамановский эффект.

Комбинационное рассеяние света (эффект Рамана) — неупругое рассеяние оптического излучения на молекулах вещества (твёрдого, жидкого или газообразного), сопровождающееся заметным изменением частоты излучения. В отличие от рэлеевского рассеяния, в случае комбинационного рассеяния в спектре рассеянного излучения появляются спектральные линии, которых нет в спектре первичного (возбуждающего) света.[9] Число и расположение появившихся линий определяется молекулярным строением вещества.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (или рамановская спектроскопия) — эффективный метод химического анализа, изучения состава и строения веществ.

Результаты проведенных исследований.

Проведем расчеты для лазера накачки пиковой длиной волны 2 мкм и шириной гауссовой огибающей спектра 0.02 фс^{-1} . Подберем высшие моды волоконного световода из селенида мышьяка, находящегося в воздухе, с радиусом сердцевины 150 мкм, таким образом, чтобы длина волны накачки попадала как в область нормальной дисперсии, так и аномальной дисперсии.

В результате численного решения вышеупомянутых уравнений, были получены амплитуды спектральных компонент электрического поля импульса и зависимость интенсивности от длины волны.

ВЫВОДЫ

Бесструктурный световод может быть использован как сенсорный элемент волоконного спектроскопического датчика, а также как преобразователь частоты. Дисперсия высших мод многомодового световода может быть использована для компенсации дисперсии халькогенидных стекол, которая является нормальной в ближнем ИК диапазоне. Это дает возможность использования лазерных импульсов в ближнем ИК для накачки суперконтинуума в халькогенидных световодах.

В отличие от маломодовых световодов с тонкой сердцевиной, использование многомодовых световодов имеет технологические преимущества.

При этом функции генератора СК в среднем ИК диапазоне и сенсорного элемента могут быть реализованы в одном многомодовом халькогенидном световоде. Это позволит избежать трудностей, которые возникают при согласо-

нии одномодового волоконного генератора СК как с лазером накачки, так и с многомодовым сенсорным элементом.

Использование высших мод многомодового халькогенидного световода для получения широкополосного когерентного излучения и химического анализа различных веществ позволяет оптимизировать метод волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона.

Список использованных источников:

- [1] Shiryaev V.S., Churbanov M.F.//J.Non-Cryst. Solids.2013.V.377.P. 225-230.
- [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] Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика/ Г. Агравал; пер. с англ.-М.Мир, 1996.-323 с.
- [5] Адамс, М. Введение в теорию оптических волноводов/ М. Адамс; пер. с англ.-М.:Мир,1984.-512 с.
- [6] Ахманов, С.А. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов/С.А. Ахманов, В.А. Выслоух, А.С. Чиркин.-М.:Наука, 1988.-312 с.
- [7] Сидоров, Н.К. Введение в волновую нелинейную оптику/Н.К. Сидоров - Саратов, Издательство Саратовского Университета, 1991.
- [8] Шен, И.Р. Принципы нелинейной оптики/ И.Р. Шен - М.:Наука, 1989. – 559 с.
- [9] Slusher, R.E. Large Raman gain and nonlinear phase shifts in high-purity As₂Se₃ chalcogenide fibers/ R.E. Slusher, G.Lenz, J.Hodelin, J. Sanghera, L.B. Shaw, I.D. Aggrawal – J.Opt.Soc.Am. B 21, 1146-1155(2004)

- [10] Po.H. Proc.Optical Fiber Communication Conf./H.PO, E. Snitzer, L. Tumminelli,F.Hakimi, N.M. Chu, T.Haw 1989, paper PD7.
- [11] Zakery, A. Optical nonlinearities in chalcogenide glasses and their applications Springer-Verlag/A. Zakery - Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [12] Бенуэлл, К. Основы молекулярной спектроскопии/К. Бенуэлл: Пер. с англ. — М.: Мир, 1985. — 384 с.
- [13] Горелик, В.С. Современные проблемы спектроскопии комбинационного рассеяния света/ В.С. Горелик, под ред. М.М. Сущинского – М.: Наука, 1978. – с.28-47.
- [14] Ландсберг, Г.С. Журн.Рус.физ.-хим. о-ва/Г.С. Ландсберг, Л.И. Мандельштам – М.: Мир, 1928, т.60.- с.355
- [15] Дебай, П. Теория электрических свойств молекул/ П. Дебай, Г.Закк – 1936. – 144 с.
- [16] Беккер, Ю. Спектроскопия/ Ю.Беккер;-М.: Техносфера, 2009. - 528 с
- [17] Толмачев, И.Д. Применение халькогенидных стеклообразных полупроводников в сенсорах и сенсорных системах (обзор)/ И.Д. Толмачев, А.В. Стронский ОПТ .Б.и. — 2009. — Вып. 44.
- [18] Спектроскопия комбинационного рассеяния [Электронный ресурс]/[сайт]/ URL:<http://www.chem.spbu.ru/files/Vladimir/Vasiliev/KombRasseyanie> (дата обращения 08.01.2019)
- [19] Метод рэлеевского рассеяния [Электронный ресурс]/[сайт]/ URL: <https://www.chem21.info/info/1565160/> (дата обращения 13.03.2019)
- [20] Дисперсионные свойства халькогенидов [Электронный ресурс]/[сайт]/ URL: <https://chem21.info/info/1537687/> (дата обращения 27.04.2019)
- [21] Messica A."J.Appl.Opt."/A. Messica, A. Greenstein, A. Katzir, 1996.V.35.№13.P.2274-2284. doi