

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**ПОЛЫЕ СВЕТОВОДЫ КАК СЕНСОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
ВОЛОКОННЫХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

Автореферат бакалаврской работы
по направлению 03.03.02 Физика

студента 4 курса, 4022 группы
Института физики
Владимирова Артема Вадимовича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н. _____ Е. А. Романова

Заведующий кафедрой

профессор, д.ф.-м.н. _____ В.М. Аникин

Саратов 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Химический анализ состава веществ в современном мире становится все более востребованным в разных сферах деятельности, таких как промышленность, медицина и мониторинг природных систем. Ранее для определения химического состава вещества и его свойств было необходимо брать пробу этого вещества и переносить в лабораторию, что существенно замедляет определение тех или иных примесей в веществе. Разработка средств для обеспечения контроля таких процессов с наименьшей затратой времени является актуальной научной задачей. Для такого контроля могут быть использованы волоконно-оптические спектроскопические датчики, действие которых основано на спектральном анализе излучения, прошедшего через световод, погруженный во внешнюю исследуемую среду, и частично поглотившегося в этой среде, поскольку часть излучения, распространяющегося в световоде, проникает через боковую поверхность световода и взаимодействует с этой средой.

В волоконно-оптических датчиках используются стеклообразные материалы, не проводящие электричество, что позволяет использовать их в местах с высоким напряжением. По прошествии нескольких лет развития данной технологии, волоконные датчики до сих пор не пользуются коммерческой популярностью, так как трудно заменить уже имеющиеся технологии, хоть и у предшественников есть определенные ограничения, но есть несколько областей, в которых данное устройство пользуется спросом, это, например, мониторинг условий, в ветровых турбинах, нефтяных скважинах и другие дистанционно и в реальном масштабе времени. В качестве оптических излучателей в таких устройствах могут использоваться как когерентные источники, так и некогерентные.

Стеклянные волоконные световоды были известны еще до изобретения лазеров, но поскольку они имели очень большое затухание, их использование в целях связи не считалось перспективным. После обнаружения того, что высокое затухание в стеклянных волокнах обусловлено не фундаментальными свойствами самого стекла, а наличием в нем примесей, стало ясно, что в оптическом диапазоне стекло может иметь затухание менее 20 дБ/км. Эта работа явилась мощным толчком для разработки стеклянных волоконных световодов с низким затуханием. В 1970 году были изготовлены стеклянные волоконные световоды с потерями в видимой области спектра менее 20 дБ/км. Одновременно была получена непрерывная генерация излучения при комнатной температуре полупроводникового лазера изготовленного на основе двойной гетероструктуры Ga-As (Арсенид Галлия).

Оптическое волокно представляет собой нить из оптически прозрачного материала, как, например, стекло или пластик, используемое для переноса света посредством полного внутреннего отражения. Оптическое волокно производят из кварцевого стекла, но для применения в дальнем инфракрасном диапазоне могут использоваться другие материалы, такие как халькогенидные стекла.

Достигнутый уровень оптических потерь в халькогенидных световодах позволяет уже использовать их в различных областях науки, техники, медицины и экологии, в частности в спектроскопических датчиках, о которых говорится в данной работе, для передачи ИК-излучения на расстояния вплоть до 100 м.

Сенсорный (чувствительный) элемент в общем случае представляет собой элемент из оптического материала, который обратимо изменяет свои оптические характеристики при внешнем воздействии. Волоконно-оптический датчик состоит из источника излучения, зондирующего чувствительного элемента, и фотоприемника, регистрирующий изменение оптического сигнала, прошедшего через чувствительный элемент.

Цель выпускной квалификационной работы состоит в том, чтобы в компьютерной модели исследовать возможность использования полого халькогенидного световода в качестве сенсорного элемента волоконного датчика для эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона.

Задачи работы:

1. Изучить теоретические основы моделирования световых полей в волоконных световодах, со стеклянной сердцевиной и с поллой сердцевиной.

2. Ознакомиться с методом волоконной эванесцентной спектроскопии среднего ИК диапазона и изучить методику измерения спектров пропускания халькогенидных сенсорных элементов, погруженных в поглощающую жидкость.

3. Провести расчет коэффициентов затухания эванесцентных мод бесструктурного халькогенидного световода, погруженного в поглощающую жидкость, в полосе поглощения жидкости в среднем ИК диапазоне.

4. Освоить численное моделирование световых полей в световоде с поллой сердцевиной (в виде стеклянной трубки).

5. Провести расчет коэффициентов затухания эванесцентных мод полого халькогенидного световода, погруженного в поглощающую жидкость, в полосе поглощения жидкости в среднем ИК диапазоне.

6. Рассчитать выходные характеристики сенсорного элемента с поллой сердцевиной и сравнить их с выходными характеристиками сенсорного элемента на основе бесструктурного световода.

Работа включает введение, три главы, заключение, список использованных источников из 10 наименований. Общий объем работы 37 с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы.

В главе 1 представлена физика полых «револьверных» световодов.

В главе 2 изложена волновая теория волоконных световодов, включающая следующие вопросы: физика световодов со стеклянной сердцевиной, световые волны в круглом диэлектрическом стержне, методика расчета выходных характеристик сенсорного элемента на основе световода.

В главе 3 приведены результаты компьютерного моделирования сенсорного элемента на основе бесструктурного световода, сенсорного элемента на основе световода с поллой сердцевиной.

В заключении подведены итоги работы.

Волновая модель распространения мод в диэлектрическом световоде

Мода — это одно из решений волновых уравнений Максвелла, описывающих распространение света в световоде. В рамках лучевого подхода, моды изображают в виде отдельных лучей, распространяющихся в волокне под углом к оптической оси. При этом луч, который геометрически совпадает с осью волокна носит название первой или основной моды.

В зависимости от диаметра сердцевины ОВ, показателей преломления материалов сердцевины и оболочки в оптическом волокне будет распространяться только одна или несколько мод излучения.

Для получения волновой модели распространения мод в диэлектрическом стержне, о котором будем говорить далее, запишем уравнения Максвелла в цилиндрических координатах (r, θ, z) , в виде :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} - i\beta H_\theta = -in_1^2 \varepsilon_0 \omega E_r, \quad (1)$$

$$i\beta H_r - \frac{\partial H_z}{\partial r} = -in_1^2 \varepsilon_0 \omega E_\theta, \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} = -in_1^2 \varepsilon_0 \omega E_z, \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} - i\beta E_\theta = i\omega \mu_0 H_r, \quad (4)$$

$$i\beta E_r - \frac{\partial E_z}{\partial r} (r E_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \theta} = i\omega \mu_0 H_z, \quad (5)$$

где n_1 показатель преломления, $E = (E_r, E_\theta, E_z)$, $H = (H_r, H_\theta, H_z)$. Все компоненты поля можно записать через продольные компоненты E_z, H_z , которые являются решениями волнового уравнения.

Предполагая для каждой компоненты поля азимутальную периодичность с помощью уравнений Максвелла (1-5) для поперечных компонент поля можно записать через E_z и H_z :

$$E_r = -\frac{a^2}{u^2} \left(\frac{v\omega\mu_0}{r} H_z - i\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} \right), \quad (6)$$

$$E_\theta = -\frac{a^2}{u^2} \left(i\omega\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{\beta v}{r} E_z \right), \quad (7)$$

$$H_r = \frac{a^2}{u^2} \left(\frac{vn_1^2 \varepsilon_0 \omega}{r} E_z + i\beta \frac{\partial H_z}{\partial r} \right), \quad (8)$$

$$H_\theta = \frac{a^2}{u^2} \left(in_1^2 \varepsilon_0 \omega \frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{v\beta}{r} H_z \right). \quad (9)$$

Здесь использованы определения: $u^2 = a^2(k^2 n_1^2 - \beta^2)$, $k^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0$. В общем случае продольные компоненты E_z и H_z можно найти, решив волновое уравнение. Это уравнение для функций Бесселя. Известно также, что существуют два независимых решения, которые следует выбирать в соответствии с граничными условиями. Чтобы получить осциллирующее решение в области $r \leq a$, не имеющее особенности при $r = 0$, следует выбирать функцию Бесселя $J_\nu\left(\frac{ur}{a}\right)$. При определении постоянных распространения β , v , следует учитывать поляризацию волны.

Теперь установим связь между постоянными распространения моды (β, v) и направлением траектории луча (γ, α) . Так как зависимость поля моды от координаты z имеет вид $e^{i\beta z}$ и в лучевой модели направление луча образует угол γ с осью z , имеем:

$$\beta = kn_1 \cos \gamma. \quad (10)$$

Аналогично, поскольку направление луча образует угол с тангенциальным направлением, азимутальную зависимость можно представить в виде $e^{i(kn_1 \cos \alpha)(\theta a)}$. Находим:

$$v = akn_1 \cos \alpha \quad (11)$$

Используя соотношение, связывающее θ_1 , α , и γ получаем:

$$\sqrt{\left(k^2 n_1^2 - \beta^2 - \frac{v^2}{a^2}\right)} = kn_1 \cos \theta_1 \quad (12)$$

Характеристическое уравнение, полученное в приближении лучевой оптики, с помощью соотношения (10)-(12) можно записать через параметры моды u и v :

$$\sqrt{u^2 - v^2} - v \arccos\left(\frac{v}{u}\right) = \left(N + \frac{1}{4}\right)\pi + \frac{\delta}{2} \quad (v, N = 0, 1, 2, \dots). \quad (14)$$

Уравнение (3.14) имеет вид, пригодный для сравнения с характеристическим уравнением, полученным на основе приведенного ниже модового анализа.

Рассмотрим направляющую структуру цилиндрической геометрии (рисунок 3.8), состоящую из однородной сердцевины с радиусом a и с показателем преломления n_1 , окруженной бесконечной однородной оболочкой с показате-

лем преломления n_2 . Ось стержня совпадает с осью z цилиндрической системы координат.

Все поперечные компоненты электромагнитного поля можно выразить через продольные компоненты E_z и H_z , являющиеся решениями волнового уравнения, заменив в случае оболочки n_1 на n_2 и u^2 на $-w^2$. Используя определения $u^2 = a^2(k^2 n_1^2 - \beta^2)$, $w^2 = a^2(\beta^2 - k^2 n_2^2)$, запишем волновые уравнения в виде:

$$\text{сердцевина: } \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} + \left(\frac{u^2}{a^2} - \frac{v^2}{r^2} \right) \cdot R = 0 \quad (r < a) \quad (14a)$$

$$\text{оболочка: } \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} - \left(\frac{\omega^2}{a^2} + \frac{v^2}{r^2} \right) \cdot R = 0 \quad (r > a) \quad (14б)$$

Уравнению для сердцевины (14a) соответствует решение $J_\nu(ur/a)$. В области оболочки решение уравнения (14б) должно асимптотически стремиться к нулю на больших расстояниях от сердцевины, таким решением является модифицированная функция Бесселя второго рода $K_\nu(w \cdot r/a)$, называемая также функцией Макдональда. Следовательно, общие решения уравнений (14) будем искать в виде:

$$E_z = \begin{cases} \frac{A \cdot J_\nu(ur/a)}{J_\nu(u)}, r \leq a, \\ \frac{A \cdot K_\nu(\omega r/a)}{K_\nu(\omega)}, r > a, \end{cases} \quad (15a)$$

$$H_z = \begin{cases} \frac{B \cdot J_\nu(ur/a)}{J_\nu(u)}, r \leq a, \\ \frac{B \cdot K_\nu(\omega r/a)}{K_\nu(\omega)}, r > a, \end{cases} \quad (15б)$$

где A и B - постоянные, которые требуется найти.

Остается выполнить граничные условия при $r = a$, определив тем самым отношение постоянных A и B , и найти характеристическое уравнение. На границе раздела сердцевины и оболочки ($r = a$) тангенциальные компоненты электрического и магнитного полей должны быть непрерывными. Для компонент E_z и H_z условие непрерывности выполняется автоматически при $r = a$. Таким образом, получаем:

$$\frac{A}{B} = -\frac{i\omega\mu_0}{\beta v} \left(\frac{u^2 w^2}{v^2} \right) \left[\frac{J'_\nu(u)}{u J_\nu(u)} + \frac{K'_\nu(w)}{w K_\nu(w)} \right] \quad (16)$$

$$\frac{A}{B} = -i \frac{v\beta}{\omega \varepsilon_0} \left(\frac{v^2}{u^2 w^2} \right) \left[n_1^2 \frac{J'_\nu(u)}{u J_\nu(u)} + n_2^2 \frac{K'_\nu(w)}{w K_\nu(w)} \right]^{-1} \quad (17)$$

Приравнивая правые части уравнений (16) и (17), получаем хорошо известное характеристическое уравнение для мод диэлектрического стержня:

$$\left[\frac{J'_v(u)}{uJ_v(u)} + \frac{K'_v(w)}{wK_v(w)} \right] \left[\frac{J'_v(u)}{uJ_v(u)} + (1 - 2\Delta) \frac{K'_v(w)}{wK_v(w)} \right] = \left(\frac{v\beta}{kn_1} \right)^2 \left(\frac{u}{vw} \right)^4 \quad (18)$$

где использовано определение $n_2^2 = n_1^2(1 - 2\Delta)$.

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.

Важнейшими параметрами волоконного световода являются оптические потери и затухание передаваемой энергии. Эти параметры определяют эффективность работы волоконно-оптического спектроскопического датчика на основе халькогенидных волоконных световодов, возможность проводить анализ среды дистанционно и при этом в режиме реального времени, поскольку чем меньше будет затухать передаваемый сигнал, тем на большее расстояние мы сможем его передать.

Методика расчета выходных характеристик сенсорного элемента на основе световода со стеклянной сердцевиной

Если световод используется в качестве сенсорного элемента, т.е. частично 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 $\beta = \beta' + i \cdot \beta''$ каждой моды также является комплексной и зависит от доли мощности излучения, распространяющегося в поглощающей среде за пределами сердцевины световода. Такие направляемые моды принято называть эванесцентными.

Величина β на заданной длине волны может быть определена путем решения характеристического уравнения для каждой моды световода. Коэффициент затухания определяется выражением

$$\eta_m = 2 \cdot \beta_m'' \quad (19)$$

где m – радиальный индекс моды, характеризующий радиальное распределение поля моды.

Если регулярный световод имеет оптические потери и/или находится в поглощающей среде, продольная постоянная распространения и модовые параметры становятся комплексными. Вдоль оси световода, совпадающей с осью z (рисунок 1), мощность моды с заданными радиальным m и азимутальным v порядками уменьшается экспоненциально:

$$P_{vm}(z) = P_{vm}(0) \cdot \exp(-\mu_{vm} \cdot z). \quad (20)$$

Здесь $P_{vm}(0)$ – начальное значение мощности моды в некотором сечении световода.

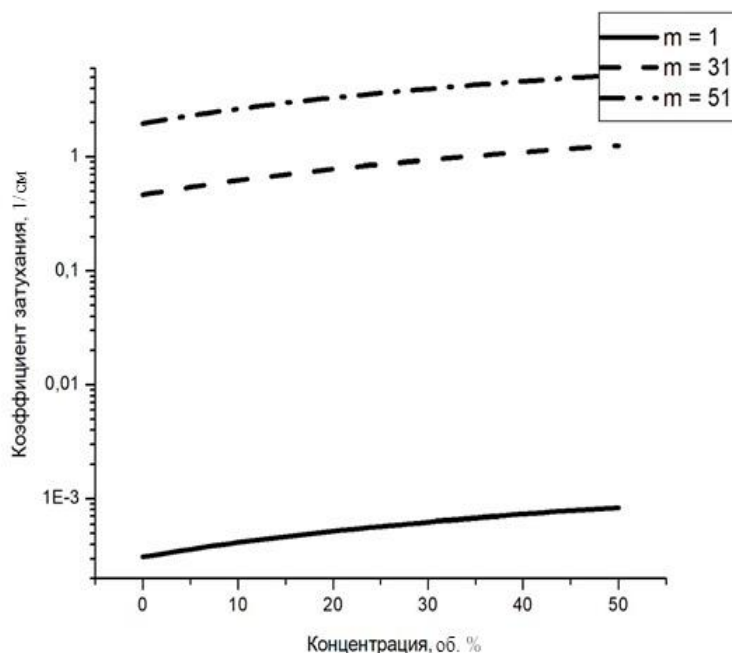


Рисунок 1 – Коэффициенты затухания мод HE_{1m} бесструктурного световода

Методика расчета выходных характеристик сенсорного элемента на основе световода с поллой сердцевиной

слоистые диэлектрические и металлодиэлектрические структуры применяются в электродинамике в широком диапазоне длин волн, от сантиметрового до субмиллиметрового.

Для расчета таких систем обычно используется метод матрицы передачи (ММП), отличающийся простотой и высокой точностью. К сожалению, ММП оказывается численно неустойчивым, если в некоторых слоях поперечное волновое число является комплексным, что соответствует туннелированию волн через слой в радиальном направлении, сильным потерям в слое или неустойчивости. В таком случае матрица передачи может стать почти вырожденной, что приводит к накоплению численных ошибок. Известные алгоритмы подавления неустойчивости приводят либо к существенному усложнению методики, либо

неприменимы к анализу азимутально-симметричных структур из-за гибридного, в общем случае, характера собственных волн.

Для световода с радиусом сердцевины $150 \mu\text{m}$ в программе Mathematica решалось характеристическое уравнение (2.20). Параметр световода $V = 219$, так что число мод HE_{1m} составило 70.

На рисунке 2 показан калибровочный график (зависимость пропускания сенсорного элемента от концентрации раствора), построенный для разных мод световода. Длина сенсорного элемента L принималась равной 1 см.

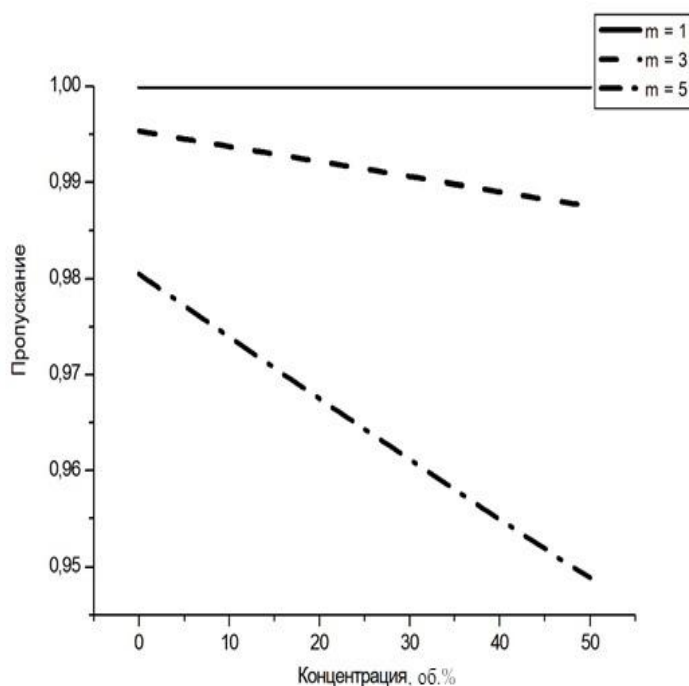


Рисунок 2 - Пропускание сенсорного элемента на основе бесструктурного световода ($L = 1 \text{ см}$)

Для каждой моды пропускание становится меньше с ростом концентрации раствора. Это обусловлено тем, что при распространении моды частично выходят из световода во внешнюю среду через поверхность сердцевины, и из-за этого раствор взаимодействует с модами, излучение которых поглощается в растворе.

На рисунке 3 показана чувствительность сенсорного элемента при разных концентрациях раствора. Видно, что чувствительность больше у моды самого высокого порядка, причем, для концентрации 25% параметр S этой моды больше, чем у моды с $m=31$ в 4 раза, и больше, чем у моды с $m=1$ на 2 порядка. Основная мода световода ($m=1$) сильно локализована в сердцевине и практически не проникает во внешнюю среду.

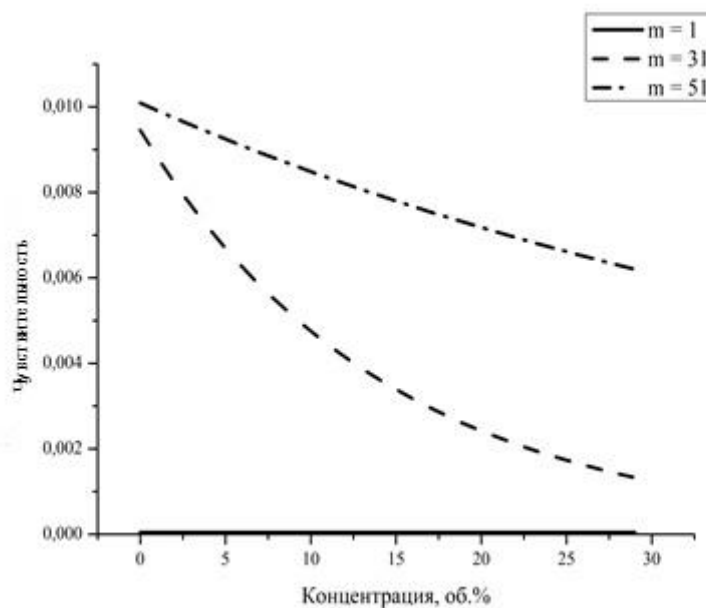


Рисунок 3 - Чувствительность сенсорного элемента на основе бесструктурного световода ($L = 1$ см)

Сенсорный элемент на основе световода с полый сердцевинной

Для сенсорного элемента в виде стеклянной трубки рассматривались два случая:

Исследуемая жидкость находится внутри трубки.

Исследуемая жидкость находится снаружи, а внутри трубка заполнена воздухом.

Для сравнения коэффициентов затухания использовались два световода разного радиуса со значениями 50 и 70 мкм, так как при больших радиусах разница видна на 5 знаке после запятой. На рисунках 4а,б видно, что разность коэффициентов затухания больше у трубки с меньшим радиусом.

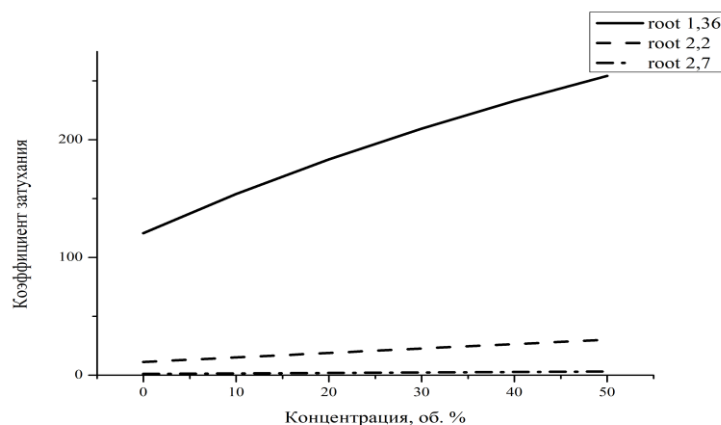


Рис. 4а – Коэффициенты затухания для световода с радиусом трубки 50 мкм

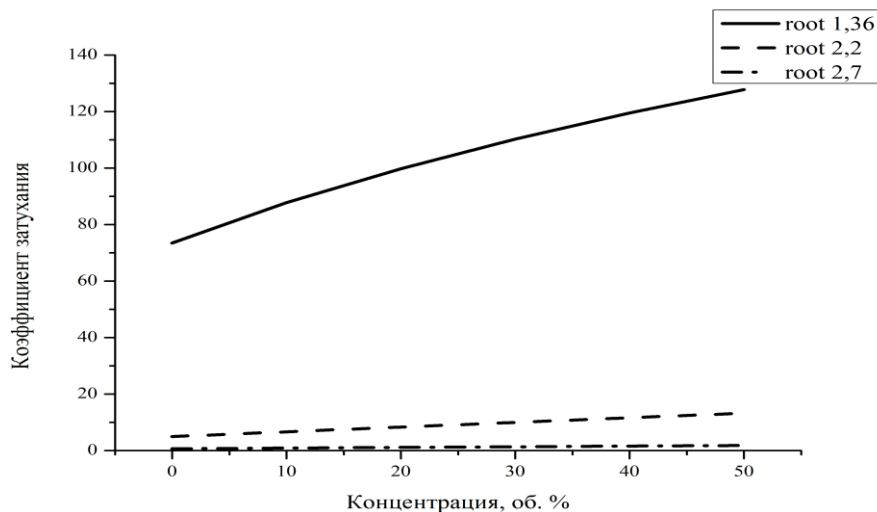


Рис. 46 – Коэффициенты затухания для световода с радиусом трубки 70 мкм

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В выпускной квалификационной работе описана структура световодов как сенсорных элементов, а также рассмотрена методика расчета выходных характеристик сенсорного элемента для световодов с полый и стеклянной сердцевиной.

Результаты изучения объекта показали, что использование световодов, как сенсорных элементов очень упрощает исследование химического состава из-за возможности использования разного состава стекол для разных оптических диапазонов, удобства применения в разных сферах деятельности, а также из-за удобства описания всех основных свойств электромагнитной волны.

Список использованных источников

1. Буфетов И. А., Косолапов А. Ф., Пряников А.Д., Гладышев А.В., Колядин А. Н., Крылов А.А., Яценко Ю. П., Бирюков А. С. Полые револьверные световоды (свойства, технология, применения) // Фотоника. 2019. Т. 13, № 5. С. 426 – 443.
2. Буфетов И. А. Волоконные световоды с полый сердцевиной и источники лазерного излучения на их основе // URL: <http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2018/11/Lazer-XI-2018-49.pdf> (дата обращения: 31.05.2023).
3. Колядин А. Н. Полые револьверные волоконные световоды с отдельными капиллярами в отражающей оболочке и их оптические свойства / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21. Лазерная физика.2021. URL: <https://www.dissercat.com/content/polye->

revolvernye-voлокonne-svetovody-s-razdelnymi-kapillyarami-v-otrazhayushchei-obolochke (дата обращения: 31.05.2023).

4. *Адамс М.* Введение в теорию оптических волноводов. М. : Мир, 1984. 512 с.
5. *Корсакова С.В., Романова Е.А., Вельмузов А.П., Котерева Т.В., Суханов М.В., Ширяев В.С.* Использование высших мод халькогенидных световодов для оптимизации метода эванесцентной спектроскопии среднего ИК-диапазона // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125, вып. 9. С. 402 – 410.
6. *Прямиков А.Д., Косолапов А.Ф., Алагашев Г.К., Колядин А.Н, Вельмискин В.В., Бирюков А.С., Буфетов И.А.* Микроструктурированный «револьверный» волоконный световод с поллой сердцевиной для УФ диапазона спектра // Квантовая электроника. 2016. Т. 46, № 12. С. 1129–1133.
7. *Litchinitser N. M., Abeeluck A. K., Headley C., Eggleton B. J.* Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides // Optics Letters. 2002, October. Vol. 27, iss. 18. Pp. 1592 – 1594. DOI: 10.1364/OL.27.001592
8. *Буфетов И. А., Косолапов А. Ф., Колядин А. Н., Яценко Ю. П.* Спектральная диагностика оптического разряда, движущегося по заполненной газом сердцевине полого волоконного световода //ВЕБИНАР НЦВО им. Е.М. Дианова РАН № 697. 9 марта 2021 года. URL : http://www.fibopt.ru/webinar/FORC-Webinar_09-Mar-2021.mp4 (дата обращения: 31.05.2023).
9. Введение в спектроскопию для учебных лабораторий URL: <http://www.oemoptic.ru/docs/OOILabBook.pdf> (дата обращения: 31.05.2023).
10. *Рожнев А.Г.* Устойчивый метод расчета слоистых диэлектрических и металлодиэлектрических структур с круглым поперечным сечением // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 6. С. 63 – 71.