

Министерство образования и науки Российской Федерации
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 многомодовых волноводов и
микрорезонаторов из халькогенидного стекла**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 431 группы
направления 03.03.02 «Физика» физического факультета
Виноградовой Елены Александровны

Научный руководитель

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

Заведующий кафедрой

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

Саратов 2017

Введение

Актуальность работы. В последние десятилетия интегрально-оптические устройства разрабатываются и исследуются во многих оптических лабораториях мира. Так же, как и разработчики электронных интегральных схем, разработчики интегрально-оптических устройств рассматривают возможность их реализации в виде отдельных модулей, в каждом из которых соединено несколько оптических функций. Перечень таких устройств включает в себя функциональные оптические компоненты— прямые и изогнутые волноводы, которые в основном используются для передачи света из одной точки пространства в другую, фильтры на основе оптических волноводов определенной формы, которые могут быть использованы для контроля спектральных характеристик света, а также линзы и зеркала, встраиваемые в такие волноводы и служащие для изменения формы световых пучков.

Для преобразования формы световых пучков и спектра лазерных импульсов могут быть основаны нелинейные эффекты. В этой связи, при изготовлении нелинейных интегрально-оптических устройств необходимо использовать материалы с ярко выраженными нелинейными свойствами. Большая нелинейность позволяет получить накопление нелинейных эффектов на малой длине и, таким образом, сократить размеры устройств.

Для осуществления нелинейного преобразования частот оптических импульсов надо обеспечить малую дисперсию групповой скорости (ДГС) и большую нелинейную модуляцию. Наряду с использованием таких «традиционных» материалов как кварц и кремний в технологии SOI (silicon-on-insulator), ведутся разработки новых оптических материалов, и в частности, оптических стекол.

Цель выпускной квалификационной работы состоит в том, чтобы определить возможность использования модовой дисперсии оптических структур на основе многомодовых халькогенидных волноводов и

микрорезонаторов для компенсации дисперсии групповой скорости халькогенидного стекла.

Задачи исследования:

1. Изучить теоретические основы описания световых полей в оптических волноводах на примере модели планарного волновода. Ознакомиться с классификацией мод планарного волновода.
2. Изучить теоретические основы описания резонансных световых полей в оптическом резонаторе на примере трекового микрорезонатора.
3. Ознакомиться с оптическими свойствами халькогенидных стекол, методиками расчета параметра ДГС для объемных образцов стекла.
4. Построить спектральные зависимости параметра ДГС для ТЕ мод халькогенидного планарного волновода с учетом дисперсии показателя преломления халькогенидного стекла.
5. Построить спектральные зависимости параметра ДГС для мод халькогенидного оптического микрорезонатора с учетом дисперсии показателя преломления халькогенидного стекла.
6. Выявить зависимость полученных дисперсионных характеристик от размеров структуры: от толщины сердцевины планарного волновода и от радиуса микрорезонатора.

Структура и объём работы

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

Краткое содержание работы

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

В первой главе дается описание оптических волноводов, их свойств и основных характеристик.

Оптические волноводы – это диэлектрические структуры, по которым может распространяться электромагнитная энергия в видимой и инфракрасной областях спектра. Реальные волноводы, используемые в оптической связи, представляют собой гибкие волокна из прочных диэлектрических материалов. В интегральной оптике используются волноводы планарного типа на подложке. Обычно волновод состоит из сердцевины и оболочки. Показатель преломления сердцевины может быть постоянным или изменяться по сечению, показатель преломления оболочки обычно постоянен по сечению.

Оптические волноводы можно условно разделить на две группы - многомодовые (с относительно большим поперечным размером сердцевины) и одномодовые (с относительно малым поперечным размером сердцевины).

В данной работе мы рассматриваем планарный оптический волновод. В планарном волноводе различают два типа мод: ТЕ- и ТМ-моды. В ТЕ-моды вектор поля E перпендикулярен к плоскости падения волны на границу раздела сред, так что поле E имеет только составляющую E_y вдоль оси y (рисунок 5, а). В ТМ-моды вектор поля B перпендикулярен к плоскости падения волны, поле B имеет только одну составляющую B_y вдоль оси y .

Таблица 2. Свойства мод планарных волноводов со ступенчатым профилем показателя преломления (а) и асимптотические выражения для U (б)

а)

	Четные ТЕ-моды	Нечетные ТЕ-моды	Четные ТМ-моды	Нечетные ТМ-моды
Характеристическое уравнение	$W = U \tan U$	$W = -U \cot U$	$n_{co}^2 W = n_{cl}^2 U \tan U$	$n_{co}^2 W = -n_{cl}^2 U \cot U$
Нормировка	$N = \frac{\rho\beta}{2k} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0}\right)^{1/2} \frac{V^2}{U^2} \frac{1+W}{W}$		$N = \frac{\rho k n_{co}^2}{2\beta} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0}\right)^{1/2} \left\{ 1 + \frac{n_{co}^4}{n_{cl}^4} \frac{W^2}{U^2} + \frac{n_{co}^2}{n_{cl}^2} \frac{V^2}{U^2 W} \right\}$	
Мощность в сердцевине	$\eta = 1 - \frac{U^2}{V^2(1+W)}$		$\eta = 1 - \frac{n_{co}^2 n_{cl}^2 U^2}{n_{co}^2 n_{cl}^2 V^2 + n_{co}^4 W^3 + n_{cl}^4 W U^2}$	
Групповая скорость	$v_g = \frac{c}{n_{co}^2} \frac{\beta}{k} \frac{1}{1 - 2\Delta(1 - \eta)}$			
Число направляемых мод	$M_b = \text{Int} \left\{ \frac{4V}{\pi} \right\}$			

б)

	ТЕ _j -моды	ТМ _j -моды
Отсечка $U = V, W = 0$	$U = V = j \frac{\pi}{2}$	
Вблизи отсечки $U \approx V, W \approx 0$	$U \approx V - \frac{V^3}{2} \quad (j = 0)$	$U \approx V - \frac{n_{cl}^4}{n_{co}^4} \frac{V^3}{2} \quad (j = 0)$
	$U \approx V - j \frac{\pi}{4} \left(V - j \frac{\pi}{2} \right)^2 \quad (j > 0)$	$U \approx V - \frac{n_{cl}^4}{n_{co}^4} j \frac{\pi}{4} \left(V - j \frac{\pi}{2} \right)^2 \quad (j > 0)$
$V = W = \infty$	$U = (j+1) \frac{\pi}{2}$	
Вдали от отсечки $V \approx W \gg 1$	$U \approx (j+1) \frac{\pi}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{V+1} \right\}$	$U \approx (j+1) \frac{\pi}{2} \left\{ 1 - \frac{n_{cl}^2}{n_{cl}^2 + V n_{co}^2} \right\}$
Диапазон одномодового режима $0 < V < \frac{\pi}{2}$		

Параметры u и w являются параметрами моды в сердцевине и оболочке, соответственно. Для того, чтобы определить эти параметры, надо решить характеристическое уравнение при условии, что $U^2 + W^2 = V^2$.

Продольную постоянную β можно определить из выражений $W^2 = a^2(\beta^2 - n_2^2 k^2)$ и $U^2 = a^2(n_1^2 k^2 - \beta^2)$. Решение обычно представляют графически в виде дисперсионных кривых $\beta(V)$, $U(V)$, $W(V)$.

Каждая дисперсионная кривая соответствует отдельной моде волновода. Условие отсечки задается выражением $\beta = kn_2$. На языке лучевого описания это соответствует условию нарушения полного внутреннего отражения, а на языке модового описания означает нарушение локализации поля в сердцевине и расплывание его в область оболочки.

Тогда на отсечке $U=V$ и $W=0$. Подставим эти значения в характеристическое уравнение и получим: $V_c \text{tg} V_c = 0$. Отсюда $V_c = N\pi$ ($N=0, 1, 2, \dots$) – четные моды. Для нечетных мод $V_c = N\pi/2$.

В волоконной оптике для оценки дисперсии принято использовать параметр дисперсии групповой скорости D . Этот параметр определен как изменение параметра первого порядка дисперсии β_1 с длиной волны λ .

$$D = \frac{d\beta^2}{d\lambda} = \frac{d^2\beta}{d\lambda \cdot d\omega} .$$

Во второй главе дается описание оптических микрорезонаторов, их свойств и основных характеристик.

Существует большое многообразие интегрально-оптических структур на основе ОМ. Изготовление трекового микрорезонатора осуществляется литографическим способом. Это значит, что микрорезонатор вырезается с помощью электронного луча по заданному шаблону. ОМ тороидального типа изготавливаются с использованием метода литографии. На кремниевой подложке вырезается диск из плавленого кварца.

Основными характеристиками микрорезонатора являются добротность и свободный спектр частот. Добротность микрорезонатора связана со спектральной шириной $\Delta\omega$ резонансной кривой следующим образом:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} .$$

При широкополосной накачке, в резонаторе может возбудиться несколько резонансных частот. Расстояние между этими частотами называется

свободным спектром частот (FSR - free spectral range), в шкале частот определяется следующим образом: $\Delta\nu_{FSR} = \frac{c}{2nL}$.

Резонансные частоты мод микрорезонатора можно определить следующим образом: $\nu_l = \frac{l \cdot c}{2\pi \cdot R \cdot n}$, где l - целое число, c - скорость света в вакууме, R - радиус резонатора и n - показатель преломления.

Параметр дисперсии групповой скорости в микрорезонаторе имеет вид:

$$D = \frac{\nu_l^2}{2\pi \cdot R \cdot c} \cdot \frac{\Delta(\Delta\nu_l)}{(\Delta\nu_l)^3}.$$

В третьей главе дается описание халькогенидных стекол, их электронных и оптических свойств.

Халькогенидные стёкла – относительно новый класс полупроводниковых веществ, открытый в 1954 году Б.Т. Коломийцем и Н.А. Гориной. В состав халькогенидных стеклообразных полупроводников входят халькогены – элементы VI группы периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева: сера, селен и теллур. В состав стекла могут также входить элементы Ge, P, As, Sb, S, Se, Te. Типичные системы: Ge - S, Ge - Se, As - S, As - Se, Ge - S - P, Ge - As - Se, Ge - Se - Te, As - Se - Te, Ge - As - Se - Te. Халькогенидные стёкла являются идеальными материалами для разработки волоконно-оптических лазеров и усилителей, дистанционных передатчиков и других устройств, работающих в инфракрасном диапазоне длин волн от 1 до 10 мкм.

Халькогенидные стекла являются прозрачными в инфракрасном диапазоне на длинах волн, которые используются в современных оптических телекоммуникационных системах, работающих на длинах волн в окнах прозрачности кварцевого стекла (спектральные области 1.3 и 1.55 мкм). Таким образом, некоторые составы халькогенидных стекол могут быть использованы в этой области. Другим важным для современной фотоники свойством халькогенидных стекол является большая нелинейность третьего порядка, которая, в частности, в однородной среде выражается в зависимости

показателя преломления n от интенсивности световой волны I :
 $n = n_0 + n_2 I$. Здесь n_2 – керровская постоянная.

Соединения халькогенов с мышьяком в кристаллической форме образуют слоистые кристаллы, и часто считается, в первом приближении, что эта слоистая структура сохраняется и в аморфной фазе.

Халькогенидные стекла, так же, как и другие аморфные полупроводники, характеризуются наличием «хвостов» локализованных электронных состояний в запрещенной зоне вследствие нарушения трансляционной инвариантности.

В результате распространения в микрорезонаторе, оптический импульс на выходе будет расширен относительно начального импульса. Это связано с таким явлением как дисперсия. Дисперсия в ОМ разделяется на: материальную (скорость распространения волны в материале зависит от частоты); геометрическую (скорость волны зависит от формы и размеров резонатора); модовую (различные моды резонатора имеют разную скорость волны); поляризационную (скорость волны меняется за счет поляризационных эффектов).

Материальная дисперсия может быть определена как зависимость показателя преломления от длины волны. Для описания материальной дисперсии обычно используются формулы Зельмейера в виде степенного

ряда:
$$n^2 = 1 + \sum_i \frac{A_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - B_i^2}$$
, где A_i и B_i - коэффициенты Зельмейера.

Заключение

В работе рассмотрен планарный оптический волновод, сердцевина которого состоит из халькогенидного стекла состава $As_{40}S_{60}$ (сульфида мышьяка), а оболочка – из стекла состава $As_{40}S_{45}Se_{15}$. Основным характеристическим параметром распространения моды является продольная постоянная распространения β , которую можно определить из выражений $w^2 = a^2(\beta^2 - n_2^2 k^2)$ или $u^2 = a^2(n_1^2 k^2 - \beta^2)$. Параметры моды u и w определяются путем численного решения характеристического уравнения для мод волновода. Решение обычно представляют графически в виде дисперсионных кривых для β , u и w в зависимости от параметра V или от длины волны. Меняя полутолщину сердцевины, мы наблюдали, как меняются дисперсионные характеристики волновода для нескольких четных мод TE_0 , TE_2 , TE_4 . Для этих мод характеристическое уравнение имеет вид: $W = U \operatorname{tg}(U)$.

Мода TE_0 является фундаментальной модой планарного волновода и не имеет отсечки. Мода TE_2 имеет отсечку, когда параметр $V = \pi$. Мода TE_4 имеет отсечку, когда параметр $V = 2\pi$. Были построены зависимости эффективного показателя преломления $n_{\text{eff}} = \beta/k$ от длины волны для нескольких значений полутолщины сердцевины a для данных мод. А также построены спектральные зависимости параметра D .

На основе анализа всех полученных результатов можно сделать вывод, что в данном волноводе при различной толщине сердцевины наблюдаются сдвиги нулевых значений ДГС. Однако, существенные изменения дисперсионных кривых происходят в среднем ИК диапазоне, а в ближнем ИК значения параметра ДГС слабо отличаются от значений ДГС халькогенидного стекла.

Далее был рассмотрен микрорезонатор из халькогенидного стекла состава As_2S_3 (сульфида мышьяка). Для него были построены частотные

зависимости мод микрорезонатора с азимутальным индексом i , и

$$D_i = \frac{v_i^2 \cdot \Delta(\Delta v_i)}{2\pi R \cdot c (\Delta v_i)^3}.$$

спектральная зависимость параметра

Отметим, что нуль полной дисперсии микрорезонатора находится на длинах волн, больших, чем нуль коэффициента материальной дисперсии. При больших радиусах резонатора нуль коэффициента дисперсии находится ближе к нулю коэффициента материальной дисперсии.

- С учетом дисперсии показателя преломления халькогенидного стекла: построены дисперсионные зависимости для продольных постоянных распространения TE_0 , TE_2 и TE_4 мод планарного волновода; рассчитаны частоты мод трекового микрорезонатора.
- Получены спектральные зависимости параметра ДГС для TE_0 , TE_2 и TE_4 мод планарного волновода и для мод трекового микрорезонатора с учетом дисперсии показателя преломления халькогенидного стекла.
- Показано, что внутримодовая дисперсия моды TE_0 не позволяет компенсировать ДГС халькогенидного стекла в области длин волн 1 – 5 мкм. Внутримодовая дисперсия мод TE_2 и TE_4 может быть использована для получения положительных значений параметра ДГС в некоторой области частот.
- Показано, что ДГС мод трекового микрорезонатора не позволяет компенсировать ДГС халькогенидного стекла в области длин волн 1 - 5 мкм и сдвигает нуль ДГС в область больших длин волн.

Список использованных источников

1. Городецкий, М. Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью / М. Л. Городецкий М.: ФИЗМАЛИТ, 2011.
2. Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика/ Г. Агравал; пер. с англ.- М.: Мир, 1996.-323 с.
3. Matsko, A. B. Mode-locked Kerr frequency combs/ A. B. Matsko, A. A. Savchenkov, W. Liang, V. S. Ilchenko, D. Seidel, and L. Maleki., OPTICS LETTERS 2011, Vol. 36, No. 15, p. 2845.
4. Шен, И.Р. Принципы нелинейной оптики/ И.Р. Шен, М.: Наука, 1989.
5. Oraevsky A.N. Whispering-gallery waves // Quantum Electronics, vol. 32, no. 5, pp. 377–400, 2002.
6. Del'Haye, P. Optical Frequency Comb Generation in Monolithic Microresonators : Doktorarbeiten für Physik : vorgelegt 23.02.2011/ Pascal Del'Haye ; Erstgutachte: Prof.Dr.Teodor W. Hansch, Zweitgutachter: Prof. Ulf Kleineberg, der Ludwig-Maximilians-Universitdt Мьнchen, 2011. 207s.
7. Унгер, Х. Г. Планарные и волоконные волноводы / Х. Г. Унгер; пер. с англ. М.: Мир, 1980. 656 с.
8. Маркузе, Д. Оптические волноводы / Д. Маркузе; пер. с англ. М.: Мир, 1974. 576 с.
9. Снайдер, А. Теория оптических волноводов / А. Снайдер, Л. Джон; пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.