

Редкий Александр Константинович

ПОПЕРЕЧНО-НЕОДНОРОДНЫЕ И ПРОДОЛЬНО-НЕРЕГУЛЯРНЫЕ ОТКРЫТЫЕ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ

05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Физика и техника оптической связи»
Нижегородского государственного технического университета

Научный руководитель -
доктор физико-математических наук, профессор
Раевский Алексей Сергеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
доцент Орлов Олег Сергеевич
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Титаренко Алексей Александрович

Ведущая организация: ФГУП НПП «Полет», г.Нижний Новгород

Защита состоится 28 мая 2007г. в 13.00 на заседании диссертационного совета
Д212.165.01 в Нижегородском государственном техническом университете по адре-
су: 603600, Нижний Новгород, ГСП-41, ул.Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НГТУ.

Автореферат разослан __ апреля 2007г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Калмык Владимир Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Открытые направляющие структуры, в частности, диэлектрические волноводы (ДВ) находят широкое применение как линии передачи, а их отрезки как базовые элементы различных устройств во всех участках высокочастотного диапазона. В диапазонах СВЧ и КВЧ на основе ДВ строятся такие функциональные узлы, как линии задержки, антенны бегущей волны, открытые диэлектрические резонаторы, антенные облучатели. На основе диэлектрических волноводов с резистивными слоями строятся фиксированные и поляризационные аттенюаторы, согласующие устройства. Периодически-нерегулярные ДВ используются при создании различных частотно избирательных устройств. Слоистый круглый ДВ является строгой математической моделью оптического волокна и декомпозиционной базой различных функциональных узлов оптического диапазона [1-3]. Прямоугольные открытые диэлектрические волноводы (ПОДВ) используются при построении функциональных узлов КВЧ и СВЧ диапазонов, а также в интегральной оптике.

Многослойным направляющим структурам со сложным профилем показателя преломления (ППП) поперечного сечения в настоящее время уделяется много внимания. Структуры с депрессированным (пониженным) показателем преломления ближней к сердцевине оболочки [4-6] используются для расширения диапазона одномодового режима работы световода. Проблема работы направляющих структур в одномодовом режиме становится все актуальнее с ростом скоростей передачи данных. Разница скоростей распространения волн вдоль волокна и перекачка энергии из одной волны в другую приводят к уширению импульсов на выходе и, соответственно, к снижению длины регенерационного участка волновода.

В работе особое внимание уделяется построению математической модели волокна с пониженным показателем преломления сердцевины и его крайнему случаю – волокну с воздушным капилляром в сердцевине. Его поперечное сечение приведено на рис.1, а распределение ППП по радиальной координате на рис.2.

В настоящей работе на основе краевой задачи для ОДВ рассматриваются особенности дисперсионных задач для волоконных световодов, их формулировки, спектры возможных решений, вопросы классификации волн, перспективы управления спектром волн волоконных световодов с помощью параметров их неоднородных поперечных сечений.

Следующей рассмотренной структурой, которая позволяет манипулировать спектром решений дисперсионной задачи для многослойного ОДВ, является структура с частичной металлизацией (так называемая секториальная металлизация) одной из оболочек. Поперечное сечение такой структуры приведено на рис.3.

Эти направляющие структуры в настоящее время очень мало изучены. Их основное достоинство состоит в том, что не обладая симметрией по азимутальной координате они еще на этапе постановки краевой задачи запрещают существование симметричных волн. Как известно, именно первая пара симметричных волн H_{01} , E_{01} ограничивает в круглых многослойных ОДВ диапазон одномодового режима распространения основной волны HE_{11} . Отсутствие симметричных волн в спектре решений такой задачи расширяет одномодовый диапазон и может способствовать созданию протяженных направляющих структур с высокой скоростью передачи данных.

Все выводы, следующие из содержания первых двух глав, применимы не только для волоконных световодов, но и для ДВ любых высокочастотных диапазонов.

В качестве структур с продольно-неоднородными параметрами в работе рассматриваются волоконные Брегговские решетки – направляющие структуры, в которых продольное изменение показателя преломления «умышленно» закладывается на стадии проектирования и изготовления [2], и волоконные световоды, находящиеся под действием продоль-

ного растягивающего напряжения. Продольное растягивающее напряжение в волокнах является случайным фактором, возникающим вследствие провисаний оптических кабелей, остаточных деформаций после прокладки кабелей и т.д.

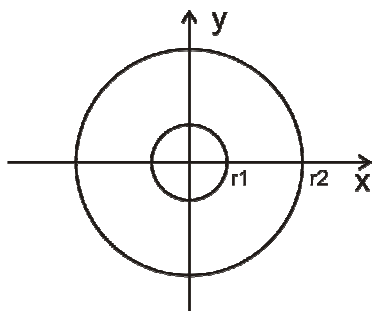


Рис.1 Поперечное сечение модели трех-слойного ОДВ

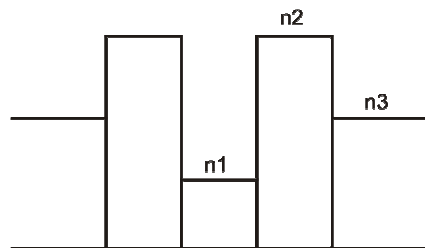


Рис.2 Распределение ППП по радиальной координате в волноводе с депрессированной сердцевиной (с воздушным капилляром при $n_1 = 1$)

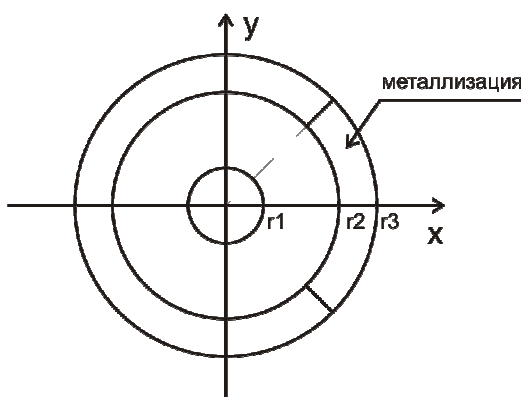


Рис.3. Поперечное сечение ОДВ с секториальной металлизацией одного из слоев

Брэгговские волоконные решетки широко используются в системах связи. Они применяются в различных устройствах оптического диапазона таких как фильтры, мультиплексоры, компенсаторы дисперсии. Их основные достоинства – низкие потери, легкость соединения с другими участками волоконного тракта, низкий температурный коэффициент длины, простая конструкция, дешевизна.

Актуальность проводимых исследований определяется отсутствием методик, позволяющих производить теоретические расчеты характеристик распространения волн в волоконных структурах с периодически изменяющимся в продольном направлении показателем преломления. Создание таких методик позволит разрабатывать новые устройства и совершенствовать имеющиеся.

Актуальность исследований воздействия продольных механических напряжений на передающие свойства ОДВ вызвана в первую очередь широким распространением такого рода напряжений, несмотря на всевозможные меры по снижению их при эксплуатации оптических кабелей. Помимо стремления к уменьшению негативного влияния продольного напряжения на поведение дисперсионных характеристик волокон проводимые исследования актуальны с точки зрения выдачи рекомендации по созданию разного рода датчиков и чувствительных элементов, способных определять малейшие деформации контролируемых объектов.

Создание чувствительных элементов датчиков различного назначения на основе диэлектрических направляющих структур – весьма перспективное направление исследований в области ОДВ [7-10]. В связи с этим в последней главе диссертации рассматриваются

прямоугольные полосковые волноводы, у которых под влиянием внешних факторов изменяются характеристики передачи, по которым можно судить о воздействующем факторе.

Целью диссертации является:

1. Разработка общей методики расчета критических частот и характеристик передачи многослойных открытых ДВ в неограниченных средах.
2. Разработка методики расчета дисперсионных характеристик поверхностных волн в ОДВ с секториальной металлизацией оболочки.
3. Исследование особенностей распространения электромагнитных волн в открытых направляющих диэлектрических структурах с периодически изменяющимся вдоль их оси показателем преломления.
4. Исследование влияния механических напряжений на характеристики передачи волоконного световода.
5. Исследование характеристик прямоугольных полосковых волноводов, граничащих с поглощающими средами, и возможностей применения таких структур в качестве чувствительных элементов датчиков.
6. Создание эффективных алгоритмов и программ, позволяющих проводить электродинамический расчет характеристик указанных направляющих структур.

Методы исследования. Представленные в диссертационной работе теоретические результаты получены на основе метода частичных областей (МЧО), модифицированного метода Галеркина, метода согласования полей, лучевого подхода [11] и метода коллокаций в сочетании с методом поверхностного тока [12 – 15].

Алгоритмы, созданные на основе этих методов удобны для использования в системах автоматизированного проектирования (САПР) функциональных узлов СВЧ, КВЧ и оптического диапазонов волн ввиду их универсальности и простоты алгебраизации функциональных уравнений, получаемых в результате реализации граничных условий.

Научная новизна. В диссертационной работе:

1. Предложен общий подход к исследованию характеристик распространения волн в многослойных ОДВ. Особое внимание уделено получению расширенного одномодового диапазона в таких структурах.
2. Подробно исследовано влияние сочетания показателей преломления слоев многослойного ОДВ на положение критических частот симметричных волн и поведение дисперсионных характеристик этих волн вблизи особых точек ($\tilde{\beta} = n_1, n_2, n_3$).
3. Предложена постановка задачи об ОДВ с секториальной металлизацией оболочки и приведены результаты ее решения в первых трех приближениях.
4. Развита модифицированный метод Галеркина в применении к исследованию характеристик распространения симметричных волн Н-типа в круглых ОДВ с периодически изменяющимся в направлении распространения показателем преломления.
5. Исследовано влияние растягивающих механических напряжений на характеристики распространения волн в оптических волокнах.
6. Предложена методика постановки и решения задачи о прямоугольном полосковом волноводе, характеристики передачи которого изменяются при выпадении на него поглощающей пленки жидкости. Даны рекомендации по применению такой структуры в качестве чувствительного элемента датчика температуры точки росы (ЧЭДТТР), применяемого в газовой промышленности.
7. Исследован прямоугольный полосковый волновод на поглощающей подложке, по характеристикам передачи которого можно определить диэлектрические параметры по-

следней. Предложено использовать полученные результаты для неразрушающего исследования диэлектриков.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается:

1. Использованием при расчете направляющих структур теоретически обоснованных методов.
2. Сравнением численных результатов, полученных различными методами.
3. Численной проверкой выполнения предельных переходов от рассматриваемых структур к структурам, решения краевых задач для которых достоверно известны.
4. Проверкой полученных результатов на сходимость.

Практическая ценность работы заключается:

1. В создании алгоритмов и программ, позволяющих производить расчет дисперсионных характеристик и критических частот волн многослойных ОДВ, с произвольным ППП в поперечном сечении.
2. В создании алгоритмов и программ, позволяющих производить расчет дисперсионных характеристик волн многослойных ОДВ с секториальной металлизацией одной из оболочек.
3. В создании алгоритмов и программ, позволяющих производить расчет дисперсионных характеристик симметричных волн Н-типа, распространяющихся в волоконных световодах с периодически изменяющимся вдоль оси показателем преломления, используемых при построении частотно избирательных устройств оптического диапазона.
4. В создании алгоритмов и программ, позволяющих производить расчет дисперсионных характеристик волн, распространяющихся в реальных продольно-напряженных световодах.
5. В создании алгоритмов и программ, позволяющих производить расчет характеристик передачи прямоугольного полоскового волновода, покрытого поглощающей пленкой, используемого в качестве ЧЭДТТР.
6. В создании алгоритмов и программ, позволяющих производить расчет характеристик передачи прямоугольного полоскового волновода на диэлектрической подложке с потерями, по которым можно определить диэлектрические параметры этой подложки.

Указанные алгоритмы и программы являются основой для создания системы компьютерного проектирования функциональных узлов СВЧ, КВЧ и оптического диапазонов волн.

Реализация и внедрение результатов. Пакеты программ расчета характеристик передачи открытых направляющих диэлектрических структур переданы в ФГУП НИИИС им. Седакова, Институт химии высокочистых веществ РАН.

Положения, выносимые на защиту:

1. Общая методика расчета характеристик передачи многослойных ОДВ. Определение влияния показателей преломления слоев на критические частоты симметричных волн.
2. Волоконный световод с пониженным показателем преломления в сердцевине как способ решения вопроса компенсации дисперсии.
3. Постановка и решение краевой задачи о многослойном ОДВ с секториальной металлизацией оболочки.
4. Способ образования приближений дисперсионной задачи. Результаты численного расчета дисперсии многослойного ОДВ с металлизацией в первых трех приближениях.

5. Поправка к приближенному методу расчета дисперсионных характеристик симметричных волн Н-типа круглого открытого ДВ с периодически изменяющимся вдоль оси показателем преломления.
6. Постановка и методика решения задачи об учете влияния продольных механических напряжений на дисперсионные характеристики оптических волокон.
7. Постановка и решение дисперсионной задачи для волн прямоугольного полоскового волновода, покрытого поглощающей пленкой. Обоснование применимости МПТ при решении данной задачи.
8. Использование прямоугольного полоскового волновода на поглощающей подложке для неразрушающего метода определения диэлектрических параметров последней.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. Международных научно-технических конференциях "Физика и технические приложения волновых процессов", 2003-2006.
2. Всероссийских научно-технических конференциях "Информационные системы и технологии. ИСТ – 2002-2007", Н.Новгород.
3. По материалам работы имеется 18 публикаций, из них 5 в изданиях одобренных ВАК.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 141 страницу печатного текста, включая библиографию из 85 наименований, 51 рисунок, 8 таблиц, 1 приложение, содержащее 2 акта внедрения результатов диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проводится анализ современного состояния вопроса, ставится цель диссертационной работы, обосновывается ее актуальность, формулируются задачи исследований, определяется новизна полученных результатов и их практическая ценность, формулируются основные положения, выносимые на защиту, кратко излагается содержание диссертации.

В первой главе диссертации: приводится общая постановка задачи о многослойном ОДВ. Записывается трехмерное уравнение Гельмгольца относительно продольных компонент электрического и магнитного векторов Герца:

$$\Delta \Pi_z^{e,m} + \epsilon \mu \omega^2 \Pi_z^{e,m} = 0,$$

где ϵ и μ - параметры сред, образующих направляющую структуру, формулируются граничные условия, определяется тип электродинамического оператора и спектр возможных решений.

Общее решение уравнения Гельмгольца в цилиндрической системе координат (r, φ, z) записывается в виде:

$$\Pi_z^{e,m} = Z_n(\alpha_m r) \begin{cases} \cos n\varphi \\ \sin n\varphi \end{cases} e^{-i\beta z},$$

где Z_n - цилиндрическая функция 1-го рода для центрального слоя, линейная комбинация цилиндрических функций 1-го и 2-го рода для промежуточных слоев, цилиндрическая функция 3-го рода для внешней области, обеспечивающая возможность выполнения условия Зоммерфельда на бесконечности для собственных волн. После разделения в уравнении Гельмгольца переменных для функции радиальной координаты образуется краевая задача на уравнении Бесселя с граничными условиями при $r = 0$; $r \rightarrow \infty$ и на поверхностях, разделяющих слои.

Исходя из выбранных граничных условий, определяется возможный спектр решений краевых задач. Самосопряженная краевая задача имеет действительные собственные зна-

чения, соответствующие поверхностным волнам. Волновые числа такой задачи имеют либо действительные, либо мнимые значения. Несамосопряженная краевая задача в общем случае имеет комплексные собственные значения, которые соответствуют различным типам комплексных волн. При отсутствии нулевого граничного условия на бесконечности, краевая задача становится полуоднородной: однородное дифференциальное уравнение и неоднородные граничные условия.

На примере симметричных поверхностных волн в трехслойном ОДВ исследуется зависимость поведения дисперсионных характеристик от сочетания диэлектрических проницаемостей слоев ОДВ. Дисперсионные уравнения симметричных волн имеют вид:

$$(\alpha_2 r_2) \left[J_0(\alpha_2 r_2) \frac{\bar{b}_0}{a_0} + Y_0(\alpha_2 r_2) \bar{\xi}_0 \right] - \frac{\bar{\epsilon}_2}{\bar{\epsilon}_3} \left[J'_0(\alpha_2 r_2) \frac{\bar{b}_0}{a_0} + Y'_0(\alpha_2 r_2) \bar{\xi}_0 \right] (\alpha_3 r_2) \frac{H_0^{(2)}(\alpha_3 r_2)}{H_0^{(2)'}(\alpha_3 r_2)} = 0$$

$$(\alpha_2 r_2) \left[J_0(\alpha_2 r_2) \frac{b_0}{a_0} + Y_0(\alpha_2 r_2) \xi_0 \right] - \frac{\tilde{\mu}_2}{\tilde{\mu}_3} \left[J'_0(\alpha_2 r_2) \frac{b_0}{a_0} + Y'_0(\alpha_2 r_2) \xi_0 \right] (\alpha_3 r_2) \frac{H_0^{(2)}(\alpha_3 r_2)}{H_0^{(2)'}(\alpha_3 r_2)} = 0$$

Первое уравнение соответствует волнам типа E_{0m} , а второе уравнение – волнам типа H_{0m} .

Показывается, что понижение показателя преломления сердцевины позволяет уменьшить в исследуемом диапазоне длин волн количество распространяющихся симметричных волн с 4-х (для волокна со ступенчатым профилем) до 2-х. Дальнейшее уменьшение показателя преломления сердцевины и переход к волокну с воздушным капилляром в сердцевине не изменяет картину качественно. Происходит сдвиг критических частот первой пары (E_{01} и H_{01}) симметричных волн в более высокочастотную область. Вторая пара волн (E_{02} и H_{02}) также испытывает сдвиг критических частот, однако он невелик.

Аналитически показано что дисперсионные характеристики симметричных волн не пересекают прямую $\tilde{\beta} = n_1$ ни при каких соотношениях геометрических размеров волокна и значениях ϵ_i . В случае, когда показатель преломления в сердцевине меньше, чем во внешней области, на критических частотах происходит вытекание волн оболочки во внешнюю область, т.к. нарушается условие полного внутреннего отражения на второй границе (оболочка - окружающая среда). Т.е. структура перестает быть направляющей при $\tilde{\beta} = n_3$, до пересечения дисперсионной характеристикой прямой $\tilde{\beta} = n_1$. Вытекание во внешнюю среду в этом случае начинается раньше, чем во внутреннюю область.

В случае, когда показатель преломления сердцевины меньше, чем у оболочки, но больше, чем во внешней области, условие полного внутреннего отражения на границе сердцевина – оболочка нарушается раньше, чем на границе оболочка - окружающая среда. Таким образом, при $\tilde{\beta} = n_1$ начинается «втекание» волн в сердцевину волокна, однако структура остается направляющей из-за наличия второй границы, т.е. дисперсионные характеристики при этом не обрываются. Аналитически дисперсионные характеристики симметричных волн имеют разрыв при $\tilde{\beta} = n_1$, однако, как показал численный анализ, они бесконечно близко подходят к этому значению как «сверху», так и «снизу». Таким образом, при рассмотрении поверхностных волн «разрывность» дисперсионных характеристик при $\tilde{\beta} = n_1$ не существенна при любых соотношениях диэлектрических проницаемостей слоев и должна исчезать при введении сколь угодно малых потерь.

На основе проведенных исследований делается вывод о том, что понижение показателя преломления сердцевины в трехслойном волокне не дает ожидаемого расширения его одномодового диапазона, однако способствует снижению межмодовой дисперсии первых волн высших типов в широком диапазоне частот, что может быть использовано при созда-

нии маломодовых волокон. Дисперсионные характеристики волокна с воздушным капилляром в сердцевине приведены на рис.4.

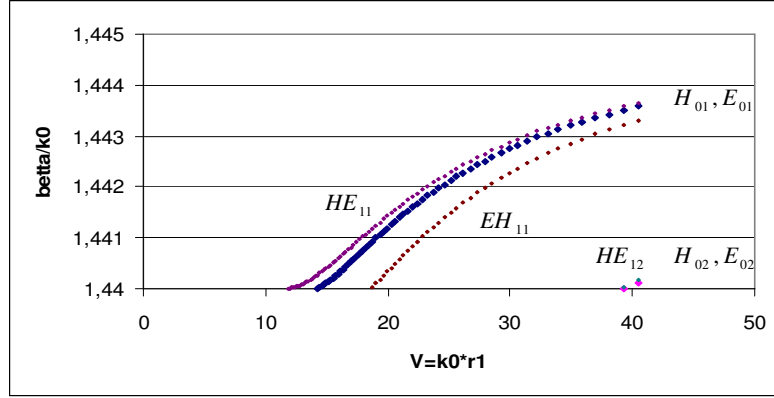


Рис.4 Дисперсионные характеристики волокна с воздушным капилляром в сердцевине

Во второй главе диссертации: рассмотрен четырехслойный волоконный световод с соосными диэлектрическими слоями, один из которых разорван на угловой координате проводящей областью. Наличие частичной металлизации одного из слоев делает поле рассматриваемой направляющей структуры принципиально гибридным, т.к. частичная металлизация запрещает существование симметричных волн. Волны, направляемые структурой, описываются продольными компонентами обоих векторов Герца, которые удовлетворяют уравнению Гельмгольца, в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Pi_z^{e,m}}{\partial z^2} + \varepsilon_i \mu_i \omega^2 \Pi_z^{e,m} = 0$$

где ε_i и μ_i - параметры слоёв, образующих направляющую структуру.

Решения этого уравнения записываются в виде:

$$\begin{cases} \Pi_{z_1}^e = \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_n(\alpha_1 r) \sin n \varphi e^{-i\beta z}; & \Pi_{z_2}^e = \sum_{n=1}^{\infty} [C_n J_n(\alpha_2 r) + D_n Y_n(\alpha_2 r)] \sin n \varphi e^{-i\beta z}; \\ \Pi_{z_1}^m = \sum_{n=1}^{\infty} B_n J_n(\alpha_1 r) \cos n \varphi e^{-i\beta z}; & \Pi_{z_2}^m = \sum_{n=1}^{\infty} [P_n J_n(\alpha_2 r) + Q_n Y_n(\alpha_2 r)] \cos n \varphi e^{-i\beta z}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Pi_{z_3}^e = \sum_{\bar{n}=1}^{\infty} [R_{\bar{n}} J_{\bar{n}}(\alpha_3 r) + S_{\bar{n}} Y_{\bar{n}}(\alpha_3 r)] \sin \bar{n} \varphi e^{-i\beta z} \\ \Pi_{z_3}^m = \sum_{\bar{n}=1}^{\infty} [G_{\bar{n}} J_{\bar{n}}(\alpha_3 r) + K_{\bar{n}} Y_{\bar{n}}(\alpha_3 r)] \cos \bar{n} \varphi e^{-i\beta z} \end{cases} \quad \varphi \in [\varphi_0 \div 2\pi - \varphi_0];$$

$$\begin{cases} \Pi_{z_3}^e = 0 \\ \Pi_{z_3}^m = 0 \end{cases} \quad \varphi \in [-\varphi_0 \div \varphi_0];$$

$$\begin{cases} \Pi_{z_4}^e = \sum_{n=1}^{\infty} M_n H_n^{(2)}(\alpha_4 r) \sin n \varphi e^{-i\beta z}; \\ \Pi_{z_4}^m = \sum_{n=1}^{\infty} Z_n H_n^{(2)}(\alpha_4 r) \cos n \varphi e^{-i\beta z}, \end{cases}$$

где $\bar{n} = n \frac{\pi}{\varphi_0}$; $\alpha_{1,2,3,4}^2 = \varepsilon_{1,2,3,4} \mu_{1,2,3,4} \omega^2 - \beta^2$; $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_0$

α_i - поперечные волновые числа; β - продольное волновое число.

Такая запись решения краевой задачи предусматривает выполнение условия ограниченности поля в центре направляющей структуры и условия Зоммерфельда для собственных волн при $r \rightarrow \infty$. Последнее будет выполняться при условии $\text{Im} \alpha_4 < 0$, где α_4 - поперечное волновое число во внешней области. При этом сформулированная краевая задача является несамосопряженной, её собственные значения в общем случае являются комплексными величинами. Таким образом, спектр волн рассматриваемой направляющей структуры должен включать в себя наряду с поверхностными волнами различные виды комплексных волн (КВ), то есть волн с комплексными волновыми числами в отсутствие диссипации энергии.

Граничные условия записываются в виде сумм и являются зависимыми от угловой координаты φ , т.е. представляют собой функциональные уравнения. Алгебраизация их (освобождение от координатной зависимости) осуществляется с использованием условий ортогональности собственных функций краевых задач по азимутальной координате. Угловые собственные функции областей II и IV ортогональны на интервале $\varphi \in [0; 2\pi]$, угловые собственные функции области III ортогональны на интервале $\varphi \in [\varphi_0; 2\pi - \varphi_0]$.

В результате применения условия ортогональности образуется бесконечная система линейных однородных алгебраических уравнений относительно амплитудных коэффициентов. В этих уравнениях суммирование производится либо по n (в этом случае число уравнений набирается по индексу \bar{n}), либо по \bar{n} (в этом случае число уравнений набирается по индексу n).

Равенство нулю главного определителя полученной системы линейных однородных алгебраических уравнений дает дисперсионное уравнение волн рассматриваемой направляющей структуры. Дисперсионная задача решается методом редукции, то есть в представлениях векторов Герца ограничиваемся конечным числом членов сумм. Дисперсионное уравнение решается совместно с соотношениями, связывающими волновые числа во всех выделенных областях. Решение производится в плоскости (β, ω) .

На основе дисперсионного уравнения, записанного в первых трех приближениях, были получены результаты, интерпретирующие частотные зависимости коэффициента замедления $\tilde{\beta} = \beta / k_0$ при различных параметрах диэлектрических слоев волокна и частичной металлизации его внешней оболочки. Приводятся дисперсионные характеристики нескольких первых гибридных волн ($n = 1$), рассчитанные в трех приближениях, при различных углах φ_0 , определяющих размеры металлизации. К примеру на рис.5 приведены дисперсионные характеристики ОДВ с металлизацией:

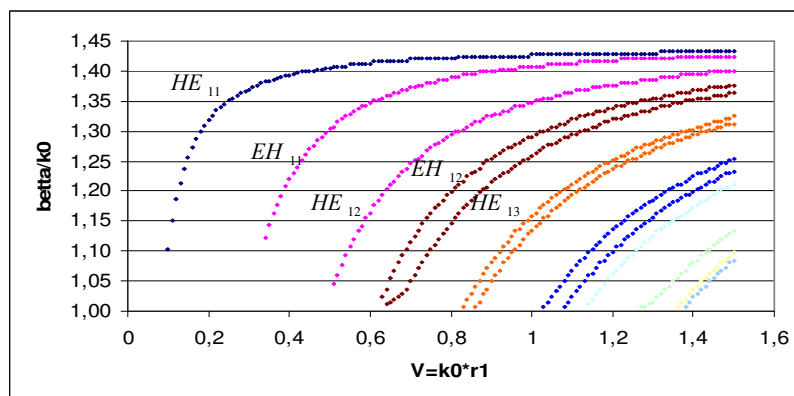


Рис.5 – $n1=1,45$ $n2=1,44$ $n3=1$, $n4=1$,
 $r1=5\text{мкм}$, $r2=30\text{мкм}$, $r3=60\text{мкм}$, $\varphi_0 = \pi/8$.

Делаются выводы о том, что влияние металлизации на распространяющиеся моды проявляется только при ее близком расположении к центру структуры. Приближение металлизации к сердцевине ОДВ приводит к разрежению спектра волн. Симметричные волны при этом принципиально отсекаются, это приводит к расширению диапазона одномодового режима.

В третьей главе диссертации: приводятся результаты исследования дисперсионных свойств симметричных волн типа H в круглом диэлектрическом волноводе с периодически изменяющимся вдоль оси показателем преломления. Дисперсионные уравнения составляются с использованием методов Галеркина и частичных областей (МЧО). При их решении применяется итерационный процесс.

В данном случае дисперсионная задача решается как система двух трансцендентных уравнений. Первое из них составляется на основе дифференциального уравнения, описывающего продольную зависимость поля, с использованием процедуры Галеркина. Второе получается из граничных условий на поверхности ДВ.

Записав условия неразрывности тангенциальных компонент поля на границе раздела двух диэлектрических сред, подставив в эти условия выражения для электрической и магнитной компонент поля и приравняв в полученных уравнениях коэффициенты при одинаковых гармониках, получаем характеристические уравнения относительно α и χ_m , где

$$\chi_m = \sqrt{\varepsilon_{II} \cdot \mu \cdot \omega^2 - \left(-i \cdot \gamma - \frac{\pi \cdot m}{d}\right)^2}. \text{ Поскольку все } \chi_m \text{ связаны с продольным волновым}$$

числом β , возникает неоднозначность решения дисперсионной задачи, то есть мы получаем множество характеристических уравнений относительно α и β при различных m . Полагая, что продольная периодичность внутренней области слабо влияет на характер продольной зависимости поля во внешней области, то есть в этой области доминирует нулевая пространственная гармоника, из всей системы указанных характеристических уравнений оставляем лишь одно – с $m = 0$. Таким образом, получаем систему двух трансцендентных уравнений относительно поперечного для внутренней области волнового числа α и постоянной распространения γ . Для ее решения используется итерационный процесс. На основе составленного алгоритма были получены численные результаты.

Анализ численных результатов показал, что у частотных зависимостей фазовых постоянных волн в нижней части частотного диапазона имеются горизонтальные участки. В области частот, соответствующей этим “полочкам”, у постоянной затухания наблюдаются всплески. Комплексность волновых чисел является следствием несамосопряженности краевой задачи.

Достоверность полученных результатов проверена сходимостью решений по волновым числам в зависимости от числа собственных функций, учитываемых в представлениях полей.

Предложенный метод расчета дисперсионных характеристик волн волокна с периодически изменяющимся вдоль оси показателем преломления строго применим лишь для симметричных волн магнитного типа. Однако с помощью него можно установить общие физические закономерности распространения волн в периодически-нерегулярных волоконных световодах, которые характерны и для симметричных волн типа E , и для гибридных волн.

Во второй части третьей главы рассмотрено влияние продольного механического напряжения на характеристики передачи ОДВ. Задача ставится и решается на основе теории фотоупругости. Согласно этой теории, когда в уравнениях Максвелла используются связь между электрическим полем и электрической индукцией в тензорном виде - $D_i = \varepsilon_{ij} E_j$, то получается следующий результат: в общем случае в диэлектрической среде

могут распространяться не одна, а две волны, имеющие одну и ту же волновую нормаль. Эти волны плоскополяризованы и скорость их различна. Значение c/V для каждой волны можно назвать показателем преломления n для данной волны.

В общем случае показатель преломления среды можно представить с помощью индикатрисы, которая имеет форму эллипсоида. Коэффициенты уравнения этого эллипсоида являются компонентами тензора относительной диэлектрической непроницаемости B_{ij} , т.е. $B_{ij}x_ix_j = 1$ (по определению $B_{ij} = \epsilon_0 \partial E_i / \partial D_j$). Небольшое изменение показателя преломления, вызванное механическим напряжением, идентично небольшому изменению формы, размера и ориентации индикатрисы.

Показано, что под действием механического растягивающего напряжения первоначально изотропное стекло превращается в одноосный кристалл с оптической осью, параллельной направлению напрягающей силы. Так же необходимо отметить, что показатели преломления в двух других перпендикулярных направлениях тоже не остаются постоянными. Этот эффект наблюдается даже при введенном упрощении, при котором модуль Юнга является числом, а не тензором.

Получено следующее дисперсионное уравнение:

$$\left(\frac{\beta n}{a}\right)^2 \left(1 - \frac{\alpha^2}{\alpha_1^2}\right)^2 + \omega^2 \mu_0 \alpha \left[\epsilon_2 \frac{H_n^{(2)'}(\alpha a)}{H_n^{(2)}(\alpha a)} - \epsilon \frac{\alpha_2 \alpha J_n'(\alpha_2 a)}{\alpha_1^2 J_n(\alpha_2 a)} \right] \left[\frac{\alpha^2 J_n'(\alpha_1 a)}{\alpha_1 J_n(\alpha_1 a)} - \alpha \frac{H_n^{(2)'}(\alpha a)}{H_n^{(2)}(\alpha a)} \right] = 0$$

здесь α - поперечное волновое число оболочки, которую считаем неограниченной по координате r , что вполне справедливо в случае одномодового волокна, поле волны HE_{11} в котором практически затухает на расстоянии порядка 3λ от границы сердцевина-оболочка. Уравнение решается совместно с уравнениями, связывающими волновые числа.

Получена зависимость коэффициента замедления основной волны от относительной деформации на рабочей длине волны $\lambda = 1.3 \mu\text{м}$ (рис.6). Эта зависимость практически линейная, что дает возможность использовать растянутое волокно в качестве чувствительного элемента датчиков различного назначения.

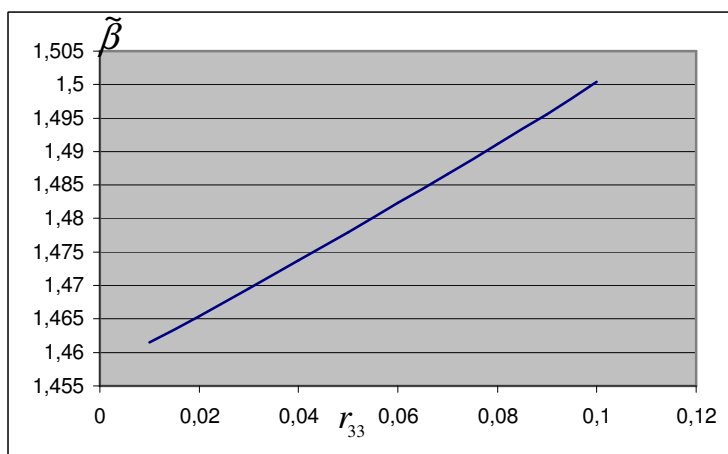


Рис.6 Зависимость коэффициента замедления основной волны от относительной деформации на рабочей длине волны $\lambda = 1.3 \mu\text{м}$

В четвертой главе диссертации: приводятся исследования передающих свойств открытых прямоугольных диэлектрических волноводов, граничащих с поглощающими средами. В первом параграфе главы рассматривается расчет ПОДВ, покрытого поглощающей пленкой. На основе отрезка такого волновода может быть изготовлен чувствительный элемент датчика точки росы для использования в газовой промышленности с целью контроля влажности газа.

Краевая задача ставится на уравнении Гельмгольца относительно электрических и магнитных потенциальных функций, описывающих зависимость векторов Герца от поперечных координат: $\Pi_z^{e,m}(x, y, z) = \psi^{e,m}(x, y)e^{-i\beta z}$. Уравнение Гельмгольца в каждой из однородных областей имеет вид: $\Delta\psi_{1,2}^{e,m} + \alpha_{1,2}^2\psi_{1,2}^{e,m} = 0$, где $\alpha_{1,2}$ – поперечные волновые числа каждой из областей. $\alpha_{1,2}$, β и волновые числа $k_{1,2}$ свободного пространства с параметрами соответствующей области связаны соотношением $k_{1,2}^2 = \alpha_{1,2}^2 + \beta^2$.

Задача решается методом коллокаций с использованием метода поверхностного тока (МПТ). Этот метод позволяет в случае, когда на границе сред находится тонкая резистивная пленка, не учитывать ее как слой, а вводить разрывные граничные условия для тангенциальных к границе компонент магнитного поля. В замене проводящего слоя малой, но конечной толщины, бесконечно тонкой проводящей поверхностью и наложении соответствующих разрывных условий на тангенциальные к этой поверхности компоненты вектора \vec{H} и заключается МПТ. Обоснование справедливости этого подхода показано на примере сравнения получаемых результатов для трехслойного круглого ОДВ и двухслойного с бесконечно тонкой проводящей пленкой. Круглые ОДВ выбраны для обоснования МПТ по той причине, что, с одной стороны, это структуры, краевые задачи для которых ставятся в замкнутой форме. С другой стороны, очевидно, что при одних и тех же $\frac{\Delta}{a}$, ϵ_1 , ϵ , ϵ_2 относительное расхождение волновых чисел в трехслойной и двухслойной моделях ОДВ с проводящей пленкой имеет одинаковый порядок для прямоугольной и круглой геометрии.

При наличии пленки воды расчет корней производился на комплексной плоскости продольного волнового числа β методом вариации фазы. Получена зависимость затухания от длины ПОДВ при различной толщине пленки воды (рис.7). С помощью этой зависимости можно подбирать длину полоска для обеспечения необходимой чувствительности.

Во второй части третьей главы рассматривается ПОДВ на поглощающей диэлектрической подложке. При наличии поглощения в материале подложки диэлектрическая проницаемость $\tilde{\epsilon}_2$ в дисперсионном уравнении для волн рассматриваемого полоскового волновода является комплексной величиной. Построение математической модели обобщенной полосковой структуры производится на основе лучевого подхода. Рассматривается частный случай такой обобщенной структуры – возвышающаяся полоска (полосковый волновод). Решая это уравнение методом вариации фазы можно проследить влияние параметров диэлектрической подложки на характеристики основной моды HE_{00} такого волновода. Представляет интерес определить зависимость действительной части нормированной постоянной распространения моды HE_{00} от действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости подложки и зависимость затухания моды HE_{00} от тех же параметров подложки.

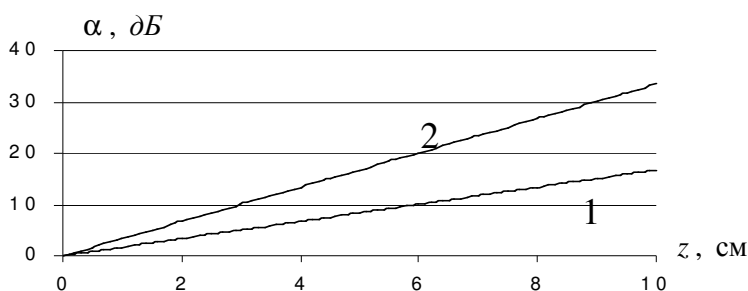


Рис.7 Зависимости затухания от длины ПОДВ при различной толщине пленки воды

Показано, что потери в подложке практически не влияют на действительную часть нормированной постоянной распространения моды HE_{00} . Следовательно, действительная часть нормированной постоянной распространения этой моды фактически целиком определяется действительной частью диэлектрической проницаемости подложки (при условии постоянства всех остальных параметров структуры). Из-за малого, практически нулевого, влияния потерь в подложке на постоянную распространения моды можно восстановить действительную часть диэлектрической проницаемости подложки по действительной части нормированной постоянной распространения.

Результаты предлагается применять для неразрушающего определения комплексной диэлектрической проницаемости материала подложки по результатам расчета характеристик передачи ПОДВ.

В заключении к диссертации перечислены основные результаты, полученные в процессе ее выполнения.

В приложении приведены акты внедрения результатов диссертации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Дисперсионные характеристики симметричных волн в трехслойном ОДВ аналитически не пересекают прямую $\tilde{\beta} = n_1$ ни при каких соотношениях геометрических размеров волокна и значениях ε_i его слоев.
2. Критические частоты волн E_{0m} и H_{0m} трехслойного волокна всегда отличны друг от друга. В то время, как в двухслойном волокне они всегда совпадают.
3. Понижение показателя преломления сердцевинки в трехслойном волокне не дает ожидаемого расширения его одномодового диапазона, однако, способствует снижению межмодовой дисперсии первых 4-х волн высших типов в широком диапазоне частот, что может быть использовано при создании маломодовых волокон, в которых максимальные скорости передачи данных ограничены в основном именно этим видом дисперсии.
4. Влияние металлизации в задаче об ОДВ с частичной металлизацией внешней оболочки проявляется только при ее близком расположении к сердцевинке волокна.
5. Приближение металлизации к сердцевинке волокна приводит к разрежению спектра волн. Симметричные волны отсекаются принципиально, это приводит к облегчению реализации одномодового режима.
6. Смещение дисперсионных характеристик волн вниз по частоте с приближением металлизации к сердцевинке имеет особенность – основная волна смещается сильнее остальных волн при любом угле металлизации. Этот факт, опять же, при отсутствии симметричных волн, может способствовать расширению одномодового диапазона.
7. Влияние угла сектора металлизации на ход дисперсионных характеристик, в отличие от расстояния до нее, гораздо слабее, и приводит лишь к незначительным сдвигам дисперсионных характеристик.
8. На основе модифицированного метода Галеркина составлена краевая задача для волоконного световода с периодически изменяющимся показателем преломления сердцевинки. Получено дисперсионное уравнение для симметричных волн Н-типа.
9. Рассчитаны дисперсионные характеристики первых трех симметричных Н-волн такого волновода.

10. Показано, что изменение показателя преломления стекла, проявляющееся при приложении к волоконному световоду механических напряжений, способно внести изменения в его передающие свойства. Фазовая скорость волны HE_{11} в волоконном световоде практически линейно зависит от приложенного к нему продольного напряжения (в рамках применимости закона Гука).
11. На основе метода коллокаций поставлена краевая задача для ПОДВ с поверхностью, покрытой поглощающей пленкой воды. Составлен расчетный алгоритм. Обосновано применение МПТ для расчета характеристик передачи ПОДВ, покрытого поглощающей пленкой воды. Рассчитаны характеристики передачи ЧЭДТТР в зависимости от длины волновода при различных значениях толщины пленки воды.
12. С помощью метода вариации фазы рассчитаны комплексные корни дисперсионного уравнения ПОДВ, находящегося на поглощающей диэлектрической подложке. Предложен неразрушающий метод определения комплексной диэлектрической проницаемости материала подложки на основе результатов измерения характеристик передачи ПОДВ, находящегося на ней.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:

1. Бриттов, И.Е. Расчет чувствительного элемента СВЧ датчика влажности газа / И.Е. Бриттов, А.С. Раевский, А.К. Редкий // Информационные системы и технологии. ИСТ –2002: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Н.Новгород, 2002.
2. Бриттов, И.Е. Обоснование метода поверхностного тока при расчете характеристик передачи прямоугольного ОДВ, покрытого пленкой воды / И.Е. Бриттов, А.С. Раевский, А.К. Редкий // Информационные системы и технологии. ИСТ –2003: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Н.Новгород, 2003.
3. Бриттов, И.Е. Расчет открытых диэлектрических волноводов методом коллокаций / И.Е. Бриттов, А.С. Раевский, А.К. Редкий // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. 2 Междунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2003. – С.225.
4. Бриттов, И.Е. Расчет слоистых открытых волноводов с разнокоординатными границами / И.Е. Бриттов, А.С. Раевский, А.К. Редкий // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. 3 Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград, 2004.
5. Бриттов, И.Е. Расчет характеристик передачи прямоугольного открытого диэлектрического волновода покрытого поглощающей пленкой / И.Е. Бриттов, А.С. Раевский, А.К. Редкий // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, -2004. -Том 7, №4. -С.18-23.
6. Павлова, Г.Д. Прямоугольный оптический волновод с анизотропией, вызванной одноосным механическим напряжением / Г.Д. Павлова, А.С. Раевский, А.К. Редкий // Будущее технической науки Нижегородского региона: тез. докл. 3 регион. молодежной науч.-техн. конф. – Н.Новгород, 2004.
7. Раевский, А.С. Математическое моделирование анизотропных волоконных световодов с частично металлизированной поверхностью / А.С. Раевский, А.К. Редкий // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. 4 Междунар. науч.-техн. конф. – Н.Новгород, 2005. – С.262.
8. Раевский, А.С. Постановка задачи о расчете характеристик волоконного световода с частично металлизированной поверхностью / А.С. Раевский, А.К. Редкий // Информационные системы и технологии. ИСТ –2005: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Н.Новгород, 2005. -С.24.

9. Редкий А.К. Об особенностях волн круглого ДВ вблизи особых точек дисперсионных характеристик // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. 5 Междунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2006. – С.124.
10. Раевский, А.С. Расчет дисперсионных характеристик многослойных волоконных световодов / А.С. Раевский, А.К. Редкий, О.В. Усков // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. 5 Междунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2006. – С.125.
11. Раевский, А.С. Об априорном определении спектров решений краевых задач для открытых ДВ / А.С. Раевский, А.К. Редкий // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. и сообщ. 5 Междунар. науч.-техн. конф. – Самара, 2006. – С.125.
12. Раевский, А.С. Асимптотический метод исследования спектров волн открытых направляющих структур / А.С. Раевский, А.К. Редкий // Антенны. -2006. -№5(108). - С.20-24.
13. Раевский, А.С. Волоконный световод с частично металлизированной внешней оболочкой / А.С. Раевский, А.К. Редкий, О.В. Усков // Информационные системы и технологии. ИСТ –2007: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Н.Новгород, 2007.
14. Раевский, А.С. Волоконный световод с частично-металлизированной внешней оболочкой / А.С. Раевский, А.К. Редкий // Труды НГТУ. Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы и устройства. – 2006. – Вып. 11. – С.49-57.
15. Ильин, А.М. Исследование характеристик передачи полоскового диэлектрического волновода на диссипативной подложке и основанный на нем косвенный метод определения комплексной диэлектрической проницаемости / А.М. Ильин, А.С. Раевский, А.К. Редкий, О.В. Усков // Антенны. -2007. -№2(117). -С.34-37.
16. Павлова, Г.Д. Влияние продольных напряжений на передающие свойства волоконных световодов / Г.Д. Павлова, А.С. Раевский, А.К. Редкий // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. -2007. -Т10, №1. -С.83-88.
17. Раевский, А.С. О дисперсионных свойствах многослойных волоконных световодов / А.С. Раевский, А.К. Редкий // Антенны. -2007. -№2(117). -С.41-46.
18. Бриттов, И.Е. Вытекающие волны ОВ с депрессированной оболочкой / И.Е. Бриттов, А.С. Раевский, А.К. Редкий, О.В. Усков // Труды НГТУ. Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы и устройства. – 2006. – Вып. 11. – С.41-48.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гауэр, Дж. Оптические системы связи / Дж. Гауэр – М.: Радио и связь, 1989. – 500 с.
2. Убайдуллаев, Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р.Убайдуллаев – М.: Экотрендз, 2000. – 267 с.
3. Элион, Г. Волоконная оптика в системах связи / Г. Элион, Х. Элион – М.: Мир, 1981. – 196 с.
4. Беланов, А.С. Предельные скорости передачи информации по волоконным световодам / А.С. Беланов, Е.М. Дианов // Радиотехника, -1982, -Т.37, №2, -С.35-43.
5. Беланов, А.С. О возможности компенсации материальной дисперсии в трехслойных волоконных световодах в диапазоне $\lambda < 1,3\text{мкм}$. / А.С. Беланов, А.В. Белов, Е.М. Дианов [и др.] // Квантовая электроника, -2002, -Т.32, №5.
6. Желтиков. Дырчатые волоконные световоды // Успехи физических наук, -2000, -Т.170, №12, -С.2007-2020.

7. Зайцев, А.Н. Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение / А.Н. Зайцев, П.А. Иващенко, А.В. Мыльников - М.: Издательство стандартов, 1989. – 238 с.
8. Фетисов, В.С. Средства измерения влажности нефти: Современное состояние, проблемы и перспективы (обзор) // Датчики и системы, -1999. -№3. -С.33-38.
9. Москалев, И.Н. Микроволновая техника для газовой промышленности / И.Н. Москалев, И.П. Кириткин, Н.И. Москалев [и др.] // Газовая промышленность, -1997. -№4. - С.56-58.
10. Халиф, А.Л. Приборы для определения влажности газа / А.Л. Халиф, Е.И. Туревский, В.В. Сайкин [и др.] -М.:ИРЦ «Газпром», 1995. -45 с.
11. Унгер, Х.Г. Планарные и волоконные оптические волноводы / Х.Г. Унгер – М.: Мир, 1980. – 656 с.
12. Горячев, Ю.А. Особенности распространения симметричных Е – волн в круглом двухслойном экранированном волноводе с резистивной пленкой / Ю.А. Горячев, В.А. Калмык, С.Б. Раевский // Изв. Вузов СССР, – Радиоэлектроника. – 1979, – Т.22, №9, – С.29-32.
13. Калмык, В.А. Симметричная Е – волна в двухслойном круглом волноводе с резистивной пленкой между слоями / В.А. Калмык, С.А. Маркова, С.Б. Раевский // Радиотехника и электроника. – 1975, – Т.20, №7, – С.1496-1498.
14. Раевский, С.Б. Двухслойные цилиндрические волноводы с резистивными пленками / С.Б. Раевский, Т.Н. Балабанова // Изв. Вузов СССР – Радиофизика. – 1982, – Т.25, №1, – С.99-103.
15. Веселов, Г.И. Слоистые метало-диэлектрические волноводы / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский – М.: Радио и связь, 1988. – 247 с.