

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
"ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ"

УДК 530.1:51-72+535:621.372.8

Новицкий Андрей Викторович

**ОПЕРАТОРЫ ЭВОЛЮЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ В БИАНИЗОТРОПНЫХ ВОЛОКНАХ**

01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Минск, 2006

Работа выполнена на кафедре теоретической физики Белорусского государственного университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Барковский Леонид Матвеевич,
профессор кафедры теоретической физики БГУ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Петров Николай Степанович,
проректор, профессор кафедры технической физики института повышения квалификации и переподготовки кадров Белорусского национального технического университета

кандидат физико-математических наук
Грода Ярослав Геннадьевич,
преподаватель кафедры теоретической механики Белорусского государственного технологического университета

Оппонирующая организация: НИИ ядерных проблем БГУ

Защита состоится 9 июня 2006 г. в 14³⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при Институте физике им. Б. И. Степанова НАН Беларуси по адресу: 220072, Минск, пр. Независимости, 68, тел. 284-04-41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Институте физике им. Б. И. Степанова НАН Беларуси

Автореферат разослан “_____” _____ 2006 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций, кандидат
физико-математических наук

Ю. П. Выблый

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Одно из актуальных направлений в теории взаимодействия излучения с веществом связано с описанием волноводов. Волноводы могут отличаться по ряду признаков: по форме поперечного сечения (планарные, круглые, прямоугольные, треугольные, микроструктурированные), материалу (анизотропные, гиротропные, градиентные), числу мод (одномодовые и многомодовые). Как правило, для волноводов различного типа используют различные математические методы определения собственных мод: метод интегральных уравнений, лучевой, волновой, аналитический, полуаналитический методы. Поэтому большое значение приобретает проблема формулировки универсального математического метода, который оказался бы эффективным для анализа собственных мод волокна произвольной структуры. Такой единый подход может быть реализован на основе операторного метода, базирующегося на формализме, разработанном Ф.И. Федоровым. В Беларуси, в частности, на кафедре теоретической физики БГУ, этот подход был применен для анализа многослойных бианизотропных планарных волноводов. Сформулированный при этом метод решения задачи оказался эффективным для волноводов, которые изготовлены из оптических сред произвольной сложности, состоящих из любого числа слоев.

Диссертационная работа посвящена дальнейшему развитию операторных методов и их применению к актуальным разделам электродинамики: волоконной оптике и оптике пучков волн. Создание и теоретическое описание многослойных бианизотропных волокон существенно для расширения частотной области одномодового распространения, локализации энергии в сердцевине и компенсации дисперсии. Распространение векторных цилиндрически симметричных пучков (например, бесселевых пучков) имеет важное значение и широко исследуется в мировых центрах. Значительный вклад в развитие этой тематики внесли белорусские ученые: В. Н. Бельский, Н. С. Казак, Н. А. Хило, А. М. Гончаренко, С. Н. Курилкина. Однако распространение цилиндрически симметричных пучков в средах сложной структуры изучено недостаточно полно. Для общего и последовательного описания распространения таких пучков в бианизотропных структурах необходима разработка бескоординатного тензорного подхода, что стало одной из задач диссертационной работы.

Еще одной актуальной задачей исследования является выяснение особенностей распространения электромагнитных волн в средах с отрицательным показателем преломления (одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемости). Теоретическое и экспериментальное изучение поляризационных и энергетических характеристик

направляемых мод в волноводах с отрицательным показателем преломления входит в число проблем, решаемых в ведущих научных центрах мира (университете Сан-Диего, Австралийском национальном университете и др.). Особенность сред с отрицательным показателем преломления заключается в том, что в них групповая и фазовая скорости плоской электромагнитной волны направлены противоположно друг другу. В связи с этим условия реализации эффектов Доплера и Черенкова в таких средах отличаются от условий наблюдения этих явлений в среде с положительным показателем преломления. Поэтому для описания собственных мод в волокнах с отрицательным показателем преломления требуется обобщение известных теоретических методов.

Связь работы с крупными научными программами, темами.

Исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, выполнены в рамках тем Фонда фундаментальных исследований: “Метод эволюционных операторов в теории объемных и поверхностных волн в регулярных волноведущих структурах” (проект N⁰Ф04М-140, 2004-2006 гг.) и “Развитие аналитических и численных методов исследований активно-пассивных фотонных кристаллов для создания высокоэффективных частотно-чувствительных элементов управления светом в наноразмерных и метаразмерных системах” (проект N⁰Ф05МС-028, 2005-2007 гг.).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является обобщение операторных методов для теоретического описания взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, исследования характеристик мод, распространяющихся в многослойных круглых волокнах, и установление закономерностей трансформации векторных пучков в средах со сложной структурой.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи.

1. Построение операторов эволюции и тензоров импеданса, соответствующих волнам, распространяющимся в бианизотропных волокнах круглого поперечного сечения;
2. Формулировка ковариантных дисперсионных уравнений для собственных мод волокна с круглым сечением, определение поляризации мод и потока их энергии;
3. Определение операторов отражения и пропускания, соответствующих взаимодействию векторных цилиндрических (в том числе и бесселевых) пучков с многослойными структурами;
4. Установление закономерностей распространения мод в волокнах, характеризующихся отрицательным показателем преломления.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются

электромагнитные волновые пучки в бианизотропных средах и волокнах. Предметом исследования являются операторы пространственной эволюции электромагнитных волн.

Методология и методы проведенного исследования. При решении поставленных задач использованы методы прямого тензорного исчисления, линейной алгебры, теории дифференциальных уравнений, математические соотношения для функций Бесселя.

Научная новизна и значимость полученных результатов. В работе получены следующие новые результаты.

1. Операторный метод обобщен для описания распространения электромагнитных волн в многослойных бианизотропных волокнах круглого сечения, что позволило сформулировать в ковариантной форме дисперсионные уравнения для мод волокна и определить их основные характеристики.

2. Предложен тензорный подход, пригодный к исследованию пространственной эволюции векторных цилиндрических пучков в сложных средах (анизотропных, биизотропных, бианизотропных), на основе которого получены новые решения, соответствующие цилиндрически симметричным пучкам в анизотропных средах. Получены операторы отражения векторных бесселевых пучков от границ плоскостойких бианизотропных сред и соответствующие таким средам операторы пропускания пучков излучения указанного типа.

3. Впервые исследовано распространение направляемых мод в двуслойных и многослойных волокнах с отрицательным показателем преломления. Обоснована возможность существования медленных мод, определены условия идеального фазового согласования медленных ТЕ и ТМ мод, существования мод с положительным, отрицательным и нулевым потоком энергии.

4. Предсказаны свойства направляемых ТЕМ волн, распространяющихся в планарных и круглых волноводах с отрицательным показателем преломления, определены поляризационные и энергетические характеристики таких мод. Показано, что ТЕМ моды в круглом волокне с отрицательным показателем преломления обладают нулевым полным потоком энергии и нулевой дисперсией групповой скорости.

Практическая (экономическая, социальная) значимость полученных результатов. В развитом операторном подходе реализуется общий метод исследования характеристик электромагнитного излучения, транслируемого по бианизотропным волокнам. В предложенном формализме легко формулируется дисперсионное уравнение для собственных мод многослойного волокна круглого сечения, если известны эволюционные операторы и тензоры импеданса каждого из соосно расположенных слоев, и

существенно упрощается расчет характеристик собственных мод бианизотропных круглых волноводов. В силу ряда свойств, отличных от свойств многослойных изотропных волокон, многослойные бианизотропные структуры перспективны для применения в оптоэлектронике.

В связи с экспериментальным обнаружением материалов с отрицательным показателем преломления открылись новые возможности для создания оптических устройств с необычными свойствами. Результаты, полученные в диссертационном исследовании для волокон с отрицательным показателем преломления, могут быть использованы для возбуждения цилиндрических поверхностных волн и ТЕМ мод, а также для фазового согласования мод.

Развитый в диссертации операторный метод применим к описанию распространения в средах сложной структуры цилиндрических, в том числе и бесселевых пучков, являющихся эффективным средством для управления микрочастицами, удержания и транспортировки атомов, усиления нелинейных процессов, для создания пучков высших порядков.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Обобщение операторного метода для описания электромагнитных волн, распространяющихся в многослойных бианизотропных волокнах круглого сечения. Ковариантная форма дисперсионных уравнений для собственных мод.

2. Тензорное описание цилиндрически симметричных пучков в бианизотропных средах и построение операторов отражения и пропускания векторных бесселевых пучков, взаимодействующих с многослойными структурами.

3. Теоретическое описание новых свойств электромагнитных волн в двухслойных и трехслойных волокнах с отрицательным показателем преломления: существование медленных собственных мод, ТЕМ мод, быстрых фундаментальных мод и мод, характеризующихся положительным, отрицательным или нулевым полным потоком энергии; условия идеального фазового согласования медленных ТЕ и ТМ мод.

Личный вклад соискателя. Все представленные в диссертации новые результаты получены соискателем самостоятельно. Научным руководителем д. ф.-м. н., профессором Л.М. Барковским была сформулирована тема исследования и осуществлена постановка задач. Большинство результатов опубликовано в соавторстве с научным руководителем. Соискателем выполнена часть статьи [5], в которой операторный метод применен для изучения собственных мод круглых волноводов; Г.Н. Борздову принадлежат результаты данной работы, полученные при решении обратной задачи; в статье [5] А.Н. Фурс и В.М. Галынский исследовали однонаправленное

распространение поверхностных электромагнитных волн.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертации доложены на:

1. третьей международной конференции “Фундаментальные проблемы оптики” (Санкт - Петербург, 18-21 октября, 2004);
2. одиннадцатой всероссийской конференции студентов-физиков и молодых ученых (Екатеринбург, 24-31 марта, 2005);
3. XII международной конференции “Nonlinear Phenomena in Complex Systems” (Минск, 17-20 мая, 2005).

Опубликованность результатов. Результаты диссертации опубликованы в научных журналах (4 статьи [1–4]), в сборниках тезисов научных конференций (2 тезиса докладов [6,7]) и в сборнике научных работ (статья [5]). 2 работы опубликованы без соавторов. Общий объем опубликованных материалов составляет 60 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 123 страницы, из которых 15 страниц заняты 2 таблицами и 32 рисунками, 11 страниц — списком 161 использованного источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** выполнен обзор научной литературы по проблеме применения операторных методов в электродинамике сложных сред и обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования.

В **первой главе** содержится краткое описание сути операторного подхода применительно к оптике сложных плоскостойких сред, а также обзор литературы по математическим методам, применяемым в теории волноводов, свойствам бесселевых световых пучков и закономерностям распространения электромагнитных волн в средах с отрицательным показателем преломления.

Во **второй главе** развит операторный метод исследования распространения мод в многослойных бианизотропных волокнах круглого сечения. В работе рассматриваются бианизотропные среды, тензоры диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемости и псевдотензоры гирации α , κ которых можно представить в виде разложения по диадам, составленным из базисных векторов цилиндрической системы координат (r, φ, z) с коэффициен-

тами разложения, зависящими от радиальной координаты r :

$$\xi(r, \varphi) = \sum_{i,j=1}^3 \xi_{ij}(r) \mathbf{e}_i(\varphi) \otimes \mathbf{e}_j(\varphi), \quad (1)$$

где ξ соответствует одному из тензоров ε , μ , α , κ ; $\mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_r(\varphi)$, $\mathbf{e}_2 = \mathbf{e}_\varphi(\varphi)$, $\mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_z$ – орты цилиндрической системы координат. При такой симметрии исследуемых сред легко разделить переменные в выражениях для напряженностей магнитного и электрического полей:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \\ \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \end{pmatrix} = e^{-i\omega t} \int_R d\beta e^{i\beta z} \sum_{\nu \in Z} e^{i\nu\varphi} \begin{pmatrix} \mathbf{H}(r, \varphi, \beta, \nu) \\ \mathbf{E}(r, \varphi, \beta, \nu) \end{pmatrix} \quad (2)$$

где β – продольное волновое число (постоянная распространения моды), ω – частота волны. С учетом такого разделения переменных уравнения Максвелла были сведены к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка (см. раздел 2.1):

$$\frac{d\mathbf{W}(r)}{dr} = ikM(r)\mathbf{W}(r), \quad M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad \mathbf{W} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_t \\ \mathbf{E}_t \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{i}{kr} \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi + \mathbf{e}_r^\times \alpha I + \mathbf{e}_r^\times \varepsilon \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{v}_3 + \mathbf{e}_r^\times (\mathbf{u} + \alpha \mathbf{e}_r) \otimes \mathbf{v}_1, \\ B &= \mathbf{e}_r^\times \varepsilon I + \mathbf{e}_r^\times \varepsilon \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{v}_4 + \mathbf{e}_r^\times (\mathbf{u} + \alpha \mathbf{e}_r) \otimes \mathbf{v}_2, \\ C &= -\mathbf{e}_r^\times \mu I - \mathbf{e}_r^\times \mu \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{v}_1 + \mathbf{e}_r^\times (\mathbf{u} - \kappa \mathbf{e}_r) \otimes \mathbf{v}_3, \\ D &= \frac{i}{kr} \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi - \mathbf{e}_r^\times \kappa I - \mathbf{e}_r^\times \mu \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{v}_2 + \mathbf{e}_r^\times (\mathbf{u} - \kappa \mathbf{e}_r) \otimes \mathbf{v}_4, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{H}_t = I\mathbf{H}$ и $\mathbf{E}_t = I\mathbf{E}$ – тангенциальные компоненты векторов напряженностей, $I = 1 - \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_r$ – оператор проецирования на плоскость, перпендикулярную единичному вектору \mathbf{e}_r , \mathbf{e}_r^\times – тензор, дуальный вектору \mathbf{e}_r , $k = \omega/c$. Векторам $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \mathbf{v}_4, \mathbf{u}$ соответствуют выражения

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 &= \delta_r (\kappa_{rr} \mathbf{e}_r \alpha I - \varepsilon_{rr} \mathbf{e}_r \mu I - \kappa_{rr} \mathbf{u}), & \mathbf{v}_2 &= \delta_r (\kappa_{rr} \mathbf{e}_r \varepsilon I - \varepsilon_{rr} \mathbf{e}_r \kappa I - \varepsilon_{rr} \mathbf{u}), \\ \mathbf{v}_3 &= \delta_r (\alpha_{rr} \mathbf{e}_r \mu I - \mu_{rr} \mathbf{e}_r \alpha I + \mu_{rr} \mathbf{u}), & \mathbf{v}_4 &= \delta_r (\alpha_{rr} \mathbf{e}_r \kappa I - \mu_{rr} \mathbf{e}_r \varepsilon I + \alpha_{rr} \mathbf{u}), \\ \mathbf{u} &= (\beta/k) \mathbf{e}_\varphi - \nu/(kr) \mathbf{e}_z, & \delta_r &= (\varepsilon_{rr} \mu_{rr} - \alpha_{rr} \kappa_{rr})^{-1}, & \xi_{rr} &= \mathbf{e}_r \xi \mathbf{e}_r. \end{aligned} \quad (5)$$

Операторный подход основан на использовании эволюционных операторов (классических пропагаторов, характеристических матриц) и тензоров импеданса. Пропагаторы определяют пространственную эволюцию волн и являются фундаментальными решениями уравнения (3):

$$\mathbf{W}(r) = \Omega_a^r [ikM(r)] \mathbf{W}(a), \quad a \neq 0. \quad (6)$$

С применением эволюционного оператора можно определить тангенциальные компоненты напряженностей полей в произвольной точке кольцевого

слоя, если известны их значения в некоторой начальной точке a . В отличие от плоскостойких сред матрица M , соответствующая бианизотропной среде цилиндрической симметрии, не постоянна даже для однородных сред. В общем случае оператор эволюции представляется мультипликативным интегралом (матрицантом). Посредством тензора импеданса Γ тангенциальные компоненты напряженности электрического поля выражаются через тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля $\mathbf{E}_t = \Gamma \mathbf{H}_t$.

Операторы эволюции и импеданса удобны для исследования собственных мод многослойных бианизотропных волокон. С применением условий непрерывности тангенциальных компонент полей на цилиндрических границах раздела сред получено дисперсионное уравнение

$$\overline{\Theta}_t = 0, \quad \Theta = \begin{pmatrix} \Gamma_{cl} & -I \end{pmatrix} \Omega_{a_0}^{a_n} \begin{pmatrix} I \\ \Gamma_{co} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где Γ_{co} , Γ_{cl} – тензоры импеданса сердцевинной и внешней оболочки; $\Omega_{a_0}^{a_n}$ – эволюционный оператор n кольцевых слоев, расположенных между сердцевиной и оболочкой; $\overline{\Theta}_t$ – след тензора, взаимного к Θ . Для двуслойного волокна $n = 0$ и, следовательно, $\Theta = \Gamma_{cl} - \Gamma_{co}$. Тип поляризации моды волновода определяется отношением продольных компонент напряженностей электрического и магнитного полей, то есть величиной

$$\delta = \frac{E_z}{iH_z} = \frac{\mathbf{e}_z \Gamma_{co} (\Theta - \Theta_t) \mathbf{p}}{i \mathbf{e}_z (\Theta - \Theta_t) \mathbf{p}}, \quad (8)$$

где \mathbf{p} – произвольный вектор, для которого $(\Theta - \Theta_t) \mathbf{p} \neq 0$. Значение $\delta > 0$ соответствует HE-моду, а $\delta < 0$ – EH-моду. HE- и EH-моды называются гибридными. При $\delta = 0$ мода является поперечной электрической (TE), при $\delta = \infty$ – поперечной магнитной (TM).

В разделе 2.2 получены общие выражения эволюционных операторов и тензоров импеданса волноводных структур, которые характеризуются постоянными коэффициентами ε_{ij} , μ_{ij} , α_{ij} , κ_{ij} , содержащимися в соотношении (1). Для таких сред из системы уравнений (3) следует дифференциальное уравнение второго порядка

$$\vec{w}_z'' + \left(P^{(0)} + \frac{1}{r} P^{(1)} \right) \vec{w}_z' + \left(Q^{(0)} + \frac{1}{r} Q^{(1)} + \frac{1}{r^2} Q^{(2)} \right) \vec{w}_z = 0, \quad (9)$$

где штрихами обозначены производные по r ; $\vec{w}_z = (H_z, E_z)^T$ – продольные компоненты напряженностей магнитного и электрического полей; верхним индексом T обозначена операция транспонирования; $P^{(0)}$, $P^{(1)}$, $Q^{(0)}$, $Q^{(1)}$, $Q^{(2)}$ – постоянные матрицы. Решение уравнения (9) найдено в виде обобщенно-степенного ряда, в общем случае она является линейной комби-

нацией четырех независимых решений:

$$\vec{w}_z(r) = \sum_{j=1}^4 T_j(r) c_j \vec{a}_j, \quad (10)$$

где $T_j(r)$ – одно из решений, записанное в виде матрицы 2×2 , c_j – постоянные коэффициенты, \vec{a}_j – произвольные векторы. После введения векторов трехмерного пространства $\mathbf{c}_1 = c_1 \mathbf{e}_z + c_2 \mathbf{e}_\varphi$ и $\mathbf{c}_2 = c_3 \mathbf{e}_z + c_4 \mathbf{e}_\varphi$, где c_j – постоянные коэффициенты, тангенциальные компоненты напряженностей электрического и магнитного полей \mathbf{W} представлены в виде

$$\mathbf{W}(r) = S(r)\mathbf{C}, \quad S(r) = \begin{pmatrix} \eta_1(r) & \eta_2(r) \\ \zeta_1(r) & \zeta_2(r) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{c}_2 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $\eta_1, \eta_2, \zeta_1, \zeta_2$ – планальные тензоры, определенные на основе решений (10). С учетом этих соотношений эволюционный оператор и тензоры импеданса сформулированы в виде

$$\Omega_a^r = S(r)S^-(a), \quad \Gamma_m = \zeta_m \eta_m^-, \quad m = 1, 2, \quad (12)$$

где η^- – псевдообратный тензор ($\eta\eta^- = \eta^- \eta = I$).

В разделе 2.3 изучены некоторые частные решения уравнения (9). При $P^{(0)} = 0$, $Q^{(1)} = 0$, $P^{(1)} = \hat{1}$ и $Q^{(2)} = -b\nu^2 \hat{1}$ (b – скалярная постоянная) уравнение принимает вид

$$\vec{w}_z'' + \frac{1}{r} \vec{w}_z' + (Q^{(0)} - \frac{b\nu^2}{r^2} \hat{1}) \vec{w}_z = 0. \quad (13)$$

Его решениями являются функции Бесселя первого $J_{\sqrt{b\nu}}(\sqrt{Q^{(0)}}r)$ и второго $Y_{\sqrt{b\nu}}(\sqrt{Q^{(0)}}r)$ рода при целочисленных значениях порядка $\sqrt{b\nu}$ или функции $J_{\sqrt{b\nu}}$, $J_{-\sqrt{b\nu}}$ при дробных значениях порядка. Для вычисления квадратного корня из матрицы $Q^{(0)}$ можно воспользоваться ее спектральным разложением. Уравнение (13) имеет место, например, для волн, распространяющихся в средах, для которых $\xi = \xi_{rr}(1 - \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z) + \xi_{zz} \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z + i\xi_{\varphi r} \mathbf{e}_z^\times$.

Другое аналитическое решение уравнения (9) получено в ситуации, когда все матрицы $P^{(0)}$, $P^{(1)}$, $Q^{(0)}$, $Q^{(1)}$, $Q^{(2)}$ могут быть одновременно диагонализированы. Тогда \vec{w}_z в общем случае выражается через вырожденные гипергеометрические функции и полиномы Лагерра. Для некоторых сред решения значительно упрощаются и записываются в виде произведения экспоненты и функции Бесселя.

В разделе 2.4 сформулированы дисперсионные уравнения для собственных мод бианизотропных волноводов круглого сечения. Для изотропного волокна, наиболее часто применяемого в прикладных исследованиях, полу-

чены планальные тензоры

$$\begin{aligned}\eta_m &= F_{\nu\pm}^{(m)} \left(\mathbf{e}_z \mp \frac{\beta\nu a^2}{u_{\pm}^2 r} \mathbf{e}_\varphi \right) \otimes \mathbf{e}_z \pm \frac{i k a \varepsilon}{u_{\pm}} F_{\nu\pm}^{(m)'} \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi, \\ \zeta_m &= \mp \frac{i k a \mu}{u_{\pm}} F_{\nu\pm}^{(m)'} \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_z + F_{\nu\pm}^{(m)} \left(\mathbf{e}_z \mp \frac{\beta\nu a^2}{u_{\pm}^2 r} \mathbf{e}_\varphi \right) \otimes \mathbf{e}_\varphi, \quad m = 1, 2, \quad (14)\end{aligned}$$

где $u_{\pm}^2 = \pm k^2 a^2 (\varepsilon\mu - \beta^2/k^2)$; a – радиус сердцевины волокна; $F_{\nu+}^{(1)} = J_\nu(u_+ r/a)$, $F_{\nu+}^{(2)} = Y_\nu(u_+ r/a)$; $F_{\nu-}^{(1)} = I_\nu(u_- r/a)$ и $F_{\nu-}^{(2)} = K_\nu(u_- r/a)$ – модифицированные функции Бесселя; $F_{\nu\pm}^{(m)'}(x) = dF_{\nu\pm}^{(m)}(x)/dx$ – производная функции Бесселя. С применением тензоров η и ζ по формулам (12) найдены эволюционные операторы и тензоры импеданса. Поскольку характеристическая матрица произвольного изотропного кольцевого слоя известна, то достаточно просто записать дисперсионное уравнение (7) многослойного волокна с произвольным числом слоев и далее решить его численно. В завершение подраздела 2.4.1 описан алгоритм исследования бианизотропных волокон операторным методом.

В подразделах 2.4.2, 2.4.3 и 2.4.4 получены дисперсионные уравнения для собственных мод анизотропных, бианизотропных и бианизотропных двуслойных волокон соответственно.

В **третьей главе** векторные цилиндрические пучки определены как точные цилиндрически симметричные решения уравнений Максвелла, которые не имеют особенностей ни в одной точке своего поперечного сечения. В отличие от главы 2 среда, характеризующаяся тензорами (1), в настоящем рассмотрении считается безграничной в поперечном сечении. Поэтому вместо \mathbf{E}_t , \mathbf{H}_t необходимо ввести в рассмотрение новые поперечные компоненты $\mathbf{e}_z \times \mathbf{E}$, \mathbf{H}_\perp , локализованные в плоскости $z = \text{const}$ и непрерывные на границе раздела сред. Кроме того, только два решения уравнения (9), например, T_1 и T_2 , пригодны для описания пучка, а остальные имеют особенности. Поперечные составляющие напряженностей полей определены в разделе 3.1:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{H}_\perp \\ \mathbf{e}_z \times \mathbf{E} \end{pmatrix} = e^{i\nu\varphi} \begin{pmatrix} \tau \\ \sigma \end{pmatrix} \mathbf{a}, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned}\tau &= e^{i\beta_1 z} \mathbf{f}_1(r, \varphi) \otimes \mathbf{e}_r + e^{i\beta_2 z} \mathbf{f}_2(r, \varphi) \otimes \mathbf{e}_\varphi, \\ \sigma &= e^{i\beta_1 z} \mathbf{g}_1(r, \varphi) \otimes \mathbf{e}_r + e^{i\beta_2 z} \mathbf{g}_2(r, \varphi) \otimes \mathbf{e}_\varphi, \quad (16)\end{aligned}$$

векторы $\mathbf{f}_{1,2}$, $\mathbf{g}_{1,2}$ найдены на основе решений, полученных во второй главе. Из (15), (16) следует, что векторный цилиндрический пучок представляется в виде суперпозиции двух независимых волн, каждая из которых характеризуется своей постоянной распространения (β_1 и β_2). Задавая постоянный

вектор \mathbf{a} , можно конкретизировать значения полей в начальной точке.

В подразделе 3.2.1 определен вид эволюционного оператора и тензора импеданса цилиндрического пучка. Первый из них связывает амплитуды напряженностей полей в плоскостях z_0 и z и определяется выражением

$$\Omega_{z_0}^z = S(z)S^{-1}(z_0), \quad S(z) = \begin{pmatrix} \tau & \tau' \\ \sigma & \sigma' \end{pmatrix}, \quad (17)$$

где тензоры τ' , σ' характеризуют пучок, распространяющийся назад. Тензор импеданса пучка, определяемый соотношением $\mathbf{e}_z \times \mathbf{E} = \gamma \mathbf{H}_\perp$, имеет вид

$$\gamma = \sigma\tau^{-1} \equiv [\mathbf{g}_1 \otimes (-\mathbf{f}_2^{\times 2} \mathbf{f}_1) + \mathbf{g}_2 \otimes (-\mathbf{f}_1^{\times 2} \mathbf{f}_2)] / (\mathbf{f}_1 \times \mathbf{f}_2)^2. \quad (18)$$

Подраздел 3.2.2 посвящен определению операторов отражения и пропускания цилиндрических пучков. Такие операторы могут быть введены способом, аналогичным используемому для плоских волн, только тогда, когда граничные условия выполняются для одной отраженной и одной прошедшей волн вида (15). При этом операторы отражения и пропускания амплитуд магнитного поля n -слойной структурой имеют вид

$$\begin{aligned} R &= \left[\begin{pmatrix} -\gamma_{n+1} & I_z \\ & \gamma'_0 \end{pmatrix} \Omega_{z_0}^{z_n} \begin{pmatrix} I_z \\ \gamma'_0 \end{pmatrix} \right]^{-1} \left[\begin{pmatrix} \gamma_{n+1} & -I_z \\ & \gamma_0 \end{pmatrix} \Omega_{z_0}^{z_n} \begin{pmatrix} I_z \\ \gamma_0 \end{pmatrix} \right], \\ D &= \left[\begin{pmatrix} -\gamma'_0 & I_z \\ & \gamma_{n+1} \end{pmatrix} \Omega_{z_n}^{z_0} \begin{pmatrix} I_z \\ \gamma_{n+1} \end{pmatrix} \right]^{-1} (\gamma_0 - \gamma'_0), \end{aligned} \quad (19)$$

где γ_0 , γ_{n+1} , γ'_0 – соответственно тензоры поверхностного импеданса падающей, прошедшей и отраженной волн; $\Omega_{z_0}^{z_n}$ – оператор эволюции волн, прошедших n слоев; $I_z = 1 - \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z$ – оператор проецирования на плоскость, перпендикулярную вектору \mathbf{e}_z . Операторы (19) применимы к бесселевым пучкам целочисленного порядка, распространяющимся в бианизотропных средах. Использование этих операторов удобно при выполнении численных расчетов характеристик многослойных систем. Применяя операторы отражения и пропускания, можно найти амплитуды отраженных и преломленных полей без предварительного разделения их на собственные волны.

В подразделе 3.3.1 изучены свойства векторных бесселевых пучков целочисленного порядка, распространяющихся в бианизотропной среде, для которой $\varepsilon = \varepsilon_1 I_z + \varepsilon_2 \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z$, $\mu = \mu_1 I_z + \mu_2 \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z$, $\alpha = \kappa = i\chi \mathbf{e}_z^\times$. Такие пучки характеризуются одинаковыми радиальными волновыми числами для каждой из двух независимых волн $q_1 = q_2 = q$, но разными продольными волновыми числами

$$\beta_1 = \sqrt{k^2 \varepsilon_1 \mu_1 - k^2 \chi^2 - q^2 \mu_1 / \mu_2}, \quad \beta_2 = \sqrt{k^2 \varepsilon_1 \mu_1 - k^2 \chi^2 - q^2 \varepsilon_1 / \varepsilon_2}.$$

Тензоры τ и σ , определяющие поперечные компоненты напряженностей

электрического и магнитного полей, имеют вид

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{\mu_2(\beta_1 - ik\chi)}{\mu_1 q} e^{i\beta_1 z} \mathbf{b} \otimes \mathbf{e}_r + \frac{k\varepsilon_2}{q} e^{i\beta_2 z} (\mathbf{e}_z \times \mathbf{b}) \otimes \mathbf{e}_\varphi, \\ \sigma &= \frac{k\mu_2}{q} e^{i\beta_1 z} \mathbf{b} \otimes \mathbf{e}_r + \frac{\varepsilon_2(\beta_2 + ik\chi)}{\varepsilon_1 q} e^{i\beta_2 z} (\mathbf{e}_z \times \mathbf{b}) \otimes \mathbf{e}_\varphi,\end{aligned}\quad (20)$$

где $\mathbf{b} = iJ'_\nu(qr)\mathbf{e}_r - (\nu/qr)J_\nu(qr)\mathbf{e}_\varphi$. Бесселев пучок в рассматриваемой бианизотропной среде характеризуется двумя ортогональными векторами поляризации \mathbf{b} и $\mathbf{e}_z \times \mathbf{b}$. Тензор импеданса легко вычислить по формуле (18):

$$\gamma = \frac{1}{\mathbf{b}^2} \left[\frac{k\mu_1}{\beta_1 - ik\chi} \mathbf{b} \otimes \mathbf{b} + \frac{\beta_2 + ik\chi}{k\varepsilon_1} (\mathbf{e}_z \times \mathbf{b}) \otimes (\mathbf{e}_z \times \mathbf{b}) \right]. \quad (21)$$

Как уже упоминалось, к таким бесселевым пучкам можно применять операторы отражения и пропускания (19). Это обусловлено тем, что компоненты напряженностей для падающего, отраженного и преломленного пучков выражаются через одни и те же векторы \mathbf{b} и $\mathbf{e}_z \times \mathbf{b}$.

В подразделе 3.3.2 исследованы бесселевы пучки дробного порядка в среде, анизотропной как в продольном, так и в поперечном направлениях, и характеризуемой тензорами

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_r + b\varepsilon_1 \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi + \varepsilon_2 \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z, \quad \mu = \mu_1 \mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_r + b\mu_1 \mathbf{e}_\varphi \otimes \mathbf{e}_\varphi + \mu_2 \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z,$$

где b – параметр анизотропии среды, одинаковый для ε и μ . Векторы поляризации таких бесселевых пучков не являются ортогональными, а соотношением в распределении их интенсивностей можно управлять, варьируя параметр b .

В подразделе 3.3.3 изучены свойства цилиндрических пучков в анизотропной среде, характеризуемой тензорами

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_1 I_z + \varepsilon_2 \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z + b_1 \varepsilon_1 (\mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_z + \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_r) \\ \mu &= \mu_1 I_z + \mu_2 \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_z + b_1 \mu_1 (\mathbf{e}_r \otimes \mathbf{e}_z + \mathbf{e}_z \otimes \mathbf{e}_r),\end{aligned}\quad (22)$$

где b_1 – скалярный параметр. Поперечным составляющим напряженностей электрического и магнитного полей пучка поставлены в соответствие планальные тензоры τ и σ , которые имеют вид

$$\begin{aligned}\tau &= e^{i\beta_1(z-b_1 r)} \frac{\beta_1 a_1}{q} \mathbf{d}_1 \otimes \mathbf{e}_r + e^{i\beta_2(z-b_1 r)} \frac{k\varepsilon_1 a_2}{q} (\mathbf{e}_z \times \mathbf{b}) \otimes \mathbf{e}_\varphi, \\ \sigma &= e^{i\beta_1(z-b_1 r)} \frac{k\mu_1 a_1}{q} \mathbf{b} \otimes \mathbf{e}_r + e^{i\beta_2(z-b_1 r)} \frac{\beta_2 a_2}{q} (\mathbf{e}_z \times \mathbf{d}_2) \otimes \mathbf{e}_\varphi,\end{aligned}\quad (23)$$

где $a_1 = \mu_2/\mu_1 - b_1^2$, $a_2 = \varepsilon_2/\varepsilon_1 - b_1^2$,

$$\mathbf{d}_m = \mathbf{b} - b_1 q / (\beta_m a_m) J_\nu(qr) \mathbf{e}_r, \quad \beta_m^2 = k^2 \varepsilon_1 \mu_1 - q^2 / a_m, \quad m = 1, 2.$$

В отличие от фазы обычного бесселева пучка, фаза цилиндрического

пучка (23) содержит дополнительное слагаемое $-ib_1\beta r$. Этим слагаемым обусловлено формирование новой поверхности равных фаз. При $\nu = 0$ волновой фронт представляет собой расходящийся (сходящийся) конус. Наличие азимутальной компоненты фазы является причиной закручивания этого конуса. При увеличении топологического заряда конус разрывается и превращается в расширяющуюся спираль. Средний поток энергии каждой из независимых волн состоит из двух компонент: продольной и азимутальной. Это обусловлено бездифракционным характером распространения рассматриваемых пучков. При изменении знака параметров a_1 и a_2 направление азимутального потока энергии изменяется на противоположное, то есть оно зависит от параметра анизотропии среды b_1 . Неоднородные волны в рассматриваемых средах возможны лишь при $|b_1| < \mu_2/\mu_1$, $|b_1| < \varepsilon_2/\varepsilon_1$. При этом интенсивность пучка может экспоненциально увеличиваться (при $b_1 > 0$) либо уменьшаться (при $b_1 < 0$).

В **четвертой главе** рассмотрены моды волноводов круглого сечения, выполненных из материала с отрицательным показателем преломления, имеющих одновременно отрицательные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей (искусственные материалы такого рода называются метаматериалами). В разделе 4.1 исследованы моды двуслойных волокон, сердцевина которых характеризуется одновременно отрицательными ε и μ .

Рассмотрим волокно с радиусом сердцевины a , диэлектрические и магнитные проницаемости сердцевины которого ε_{co} , μ_{co} , а оболочки — ε_{cl} , μ_{cl} . Напряженности полей направляемых мод, распространяющихся в оболочке волокна, выражены через модифицированную функцию Бесселя $K_\nu(ur/a)$, чем обеспечено убывание поля при действительных $w = \sqrt{\beta^2 - k^2\varepsilon_{cl}\mu_{cl}}$. Через функцию Бесселя $J_\nu(ur/a)$ выражены продольные компоненты полей в сердцевине. Будем различать два типа мод: быстрые и медленные. Быстрыми называются моды, которые распространяются с фазовой скоростью, большей скорости распространения волн в однородной среде, характеризуемой скалярами ε_{co} , μ_{co} , то есть такие, для которых выполняется условие $u^2 = k^2a^2(\varepsilon_{co}\mu_{co} - \beta^2/k^2) > 0$. В обычном волноводе с положительными ε , μ поддерживаются только быстрые моды, и условием существования мод является выполнение неравенства $\varepsilon_{co}\mu_{co} > \varepsilon_{cl}\mu_{cl}$. В волокне из материала с $\varepsilon_{co} < 0$, $\mu_{co} < 0$ могут распространяться как быстрые, так и медленные моды. Фазовая скорость медленных мод меньше скорости распространения волн в однородной изотропной среде, которой соответствуют ε_{co} , μ_{co} , и параметр u становится мнимым числом: $u = iu_1$, $u_1^2 > 0$. При этом медленные моды существуют как при значении модуля показателя преломления сердцевины, большем значения показателя преломления оболочки, так и при $\varepsilon_{co}\mu_{co} \leq \varepsilon_{cl}\mu_{cl}$. Дисперсионное уравнение для медленных мод выражает-

ся через модифицированную функцию Бесселя $I_\nu(u_1)$, при действительных аргументах u_1 которой обеспечивается локализация энергии вблизи цилиндрической границы раздела сердцевины и оболочки.

В среде с отрицательным показателем преломления всегда имеет место дисперсия волн. Зависимость диэлектрической и магнитной проницаемости сердцевины от частоты в отсутствие поглощения может быть записана в виде

$$\varepsilon_{co}(\omega) = 1 - \omega_p^2/\omega^2, \quad \mu_{co}(\omega) = 1 - F\omega^2/(\omega^2 - \omega_0^2). \quad (24)$$

Для численных расчетов в диссертации использованы параметры $\omega_p/2\pi = 10$ ГГц, $\omega_0/2\pi = 4$ ГГц, $F = 0.56$. Диэлектрическая и магнитная проницаемости становятся отрицательными одновременно в области частот от 4 ГГц до 6 ГГц.

На рис. 1(а) представлены дисперсионные кривые мод, возможных в круглом волноводе с дисперсией. В области I выполняются условия $u^2 > 0$, $\varepsilon_{co}\mu_{co} > \varepsilon_{cl}\mu_{cl}$, соответствующее возникновению быстрых мод. Для быстрых мод характерны дисперсионные кривые двух типов. Кривая первого типа (кривая АВ) полностью находится в области I. Кривая второго типа (CF) расположена в областях I и II. Точка D отделяет область существования быстрых мод от области существования медленных мод. При этом выполняется условие $u = 0$. В круглом волноводе, сердцевина которого характеризуется отрицательным показателем преломления, возможны фундаментальные быстрые моды. Они реализуются при $\nu = 0$, и им соответствуют дисперсионные кривые типа CD. Таких фундаментальных мод две: одна из них ТЕ-, а другая — ТМ-поляризована (см. рис. 1(б)). Для мод, дисперсионные кривые которых расположены в области II (рис. 1(а)), выполнены условия $u^2 < 0$, $\varepsilon_{co}\mu_{co} > \varepsilon_{cl}\mu_{cl}$ и, следовательно, в этой области локализованы дисперсионные кривые медленных мод. Дисперсионная кривая DF при $\nu > 0$ соответствует волнам HE поляризации, а кривая PL всегда соответствует медленным модам. При этом она может располагаться в областях II и III ($u^2 < 0$, $\varepsilon_{co}\mu_{co} < \varepsilon_{cl}\mu_{cl}$). Кривой GK в области II соответствует волна EH поляризации. Дисперсионная кривая PL располагается в области III для волн HE поляризации. Точки G и K относятся к моде, имеющей ТМ поляризацию. Отметим еще одну интересную особенность мод волокна с отрицательными ε_{co} и μ_{co} — пересечение дисперсионных кривых ТЕ- и ТМ-поляризованных мод, соответствующее так называемому идеальному фазовому согласованию, которое реализуется как для быстрых, так и для медленных мод.

Исследованы поляризационные и энергетические свойства мод в круглых волноводах без дисперсии. Проведена классификация волн по полному потоку энергии. Обнаружены слабо локализованные (поток энергии в серд-

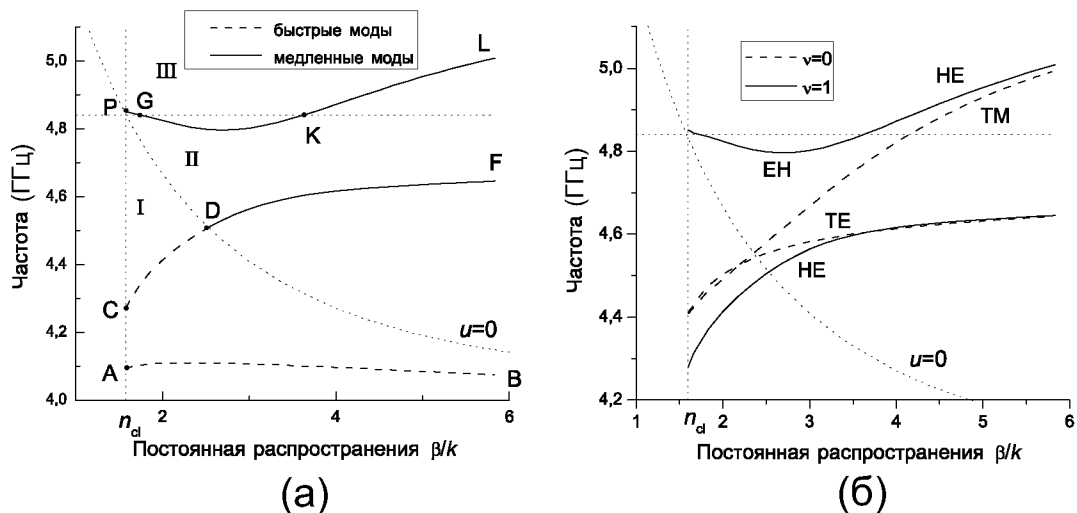


Рис. 1: (а) Дисперсионные кривые, соответствующие быстрым (кривая АВ), быстрым-медленным (CF) и медленным (PL) модам волокна с дисперсией. (б) Быстрые и медленные моды волокна с дисперсией (24) при $\nu = 0, 1$. Параметры оболочки: $\varepsilon_{cl} = 2.5$, $\mu_{cl} = 1$, $n_{cl} = \sqrt{\varepsilon_{cl}\mu_{cl}}$, $a = 1$ см. Кривые, нарисованные точками, отделяют три области существования мод

цевине волокна меньше потока в оболочке), сильно локализованные моды и моды с нулевым потоком энергии. Как известно, полный поток энергии пропорционален групповой скорости моды, поэтому нулевому потоку энергии соответствует равная нулю групповая скорость. Если выполнено условие $\varepsilon_{co}\mu_{co} \leq \varepsilon_{cl}\mu_{cl}$, то в волноводе могут существовать только медленные моды.

В волокне, для которого $\varepsilon_{co} = -\varepsilon_{cl}$, $\mu_{co} = -\mu_{cl}$, также поддерживаются моды определенного типа. Эта ситуация подробно рассмотрена в разделе 4.2, где показано, что в таком волокне распространяются только ТЕМ волны. При этом не существует мод, соответствующих азимутальному числу $\nu = 0$, что объясняется отсутствием в волокне направляемых волн, отвечающих меридиональному лучу. Напряженности полей ТЕМ мод выражаются через степенные функции радиальной координаты r и имеют круговую поляризацию. При этом в сердцевине свет является правоциркулярно, а в оболочке — левоциркулярно поляризованным (или наоборот при изменении знака азимутального числа). Усредненный по времени вектор Пойнтинга ТЕМ моды направлен вдоль образующей волокна, а полный поток энергии равен нулю.

В разделе 4.3 изучены свойства направляемых мод, распространяющихся в трехслойных волноводах с отрицательным показателем преломления. Трехслойное волокно состоит из сердцевины и двух оболочек — первой (внутренней) и второй (внешней). Отрицательным может быть показатель преломления сердцевины волокна или его первой оболочки. Для расчета напряженностей полей собственных мод таких волокон применялся оператор-

ный метод, разработанный в главе 2. В разделе 4.3 показано, что энергетические и поляризационные свойства мод в трехслойных волокнах качественно совпадают со свойствами мод, соответствующих рассмотренным ранее двухслойным волокнам. Имеющиеся отличия обусловлены наличием первой оболочки. В частности, в волокне с отрицательным показателем преломления поддерживаются направляемые моды почти при любом соотношении между показателями преломления сердцевины и обеих оболочек. При этом в большинстве волокон могут распространяться только медленные моды. В диссертации рассмотрены некоторые типичные примеры трехслойных волокон и отмечена трансформация дисперсионных кривых при возрастании толщины первой оболочки. Обнаружено, что от толщины первой оболочки существенно зависят частота идеального фазового согласования и частота отсечки мод, а также поляризационные и энергетические характеристики волокон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации проведено теоретическое изучение распространения электромагнитных волн в сложных структурах цилиндрической симметрии. Полученные операторным методом решения уравнений Максвелла для электромагнитных волн, распространяющихся в таких средах, применены для описания собственных мод волокон круглого сечения (на основе бианизотропных сред и материалов с отрицательным показателем преломления) и векторных цилиндрических пучков (например, бесселевых пучков). Основные результаты работы перечислены ниже.

1. Обобщение операторного метода описания распространения электромагнитных волн в сложных волноводных структурах цилиндрической симметрии. Показано, что система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, к которой сведены уравнения Максвелла, имеет фундаментальное решение в виде эволюционного оператора. Построена ковариантная форма дисперсионных уравнений, на основе которых выполнен анализ состояний поляризации мод многослойных бианизотропных круглых волноводов [1, 3, 5, 6].

2. На основе развитого подхода получен ряд частных решений, соответствующих собственным модам сред со слоистой структурой. Для цилиндрически симметричных бианизотропных сред получены новые аналитические решения уравнений Максвелла. Предложен эффективный алгоритм численного решения волноводной задачи на основе операторного метода, который апробирован при определении собственных мод волноводов на основе изотропных, анизотропных, биизотропных и бианизотропных волокон [1, 3].

3. Предложен метод тензорного описания векторных цилиндрических

пучков (в том числе бесселевых пучков), которые соответствуют точным решениям уравнений Максвелла для электромагнитных волн, распространяющихся в бианизотропных средах. Вычислены операторы отражения и пропускания, определяющие распределение электромагнитного поля векторных бесселевых пучков при их распространении в слоистых бианизотропных средах [4].

4. Построены бесселевы пучки дробного порядка с целочисленным значением топологического заряда как решения уравнений Максвелла в анизотропной среде. Дробный порядок пучка обусловлен поперечной по отношению к направлению распространения анизотропией среды. В работе получены соотношения для напряженности электрического и магнитного поля цилиндрических волн с зависимостью от радиальной координаты в виде произведения функции Бесселя и экспоненты. Показано, что направление азимутального потока энергии и форма поверхности фазового фронта таких пучков, имеющая вид расширяющейся (сужающейся) спирали, определяются параметрами анизотропии среды [1, 4].

5. Теоретически описаны свойства электромагнитных волн, распространяющихся в двуслойных и трехслойных круглых волокнах на основе сред с отрицательным показателем преломления. Предсказано существование медленных мод при превышении значением показателя преломления сердцевины значения показателя преломления оболочки (как в обычном волокне с положительным показателем преломления) и в противном случае; возможность и условия реализации идеального фазового согласования медленных ТЕ и ТМ мод; условия существования слабо и сильно локализованных мод, а также ТЕМ мод и быстрых фундаментальных мод [2, 7].

6. Установлены основные свойства направляемых ТЕМ мод в волокнах круглого сечения, характеризующихся отрицательным показателем преломления и равными по модулю диэлектрическими и магнитными проницаемостями сердцевины и оболочки: круговая поляризация (правоциркулярная в сердцевине и левоциркулярная в оболочке или наоборот); равенство нулю полного потока энергии и дисперсии групповой скорости; отсутствие моды, соответствующей равному нулю значению азимутального числа [2].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах:

1. Novitsky A. V., Barkovsky L. M. Operator matrices for describing guiding propagation in circular bianisotropic fibres // *J. Phys. A: Math. Gen.*— 2005.— Vol. 38.— P. 391–404.
2. Novitsky A. V., Barkovsky L. M. Guided modes in negative-refractive-index fibres // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*— 2005.— Vol. 7.— P. S51–S56.
3. Новицкий А. В., Барковский Л. М. Ковариантные дисперсионные уравнения и тензорные эволюционные операторы для оптических волноводов // *ЖТФ.*— 2005.— Т. 75, вып. 5.— С. 101–106.
4. Novitsky A. V., Barkovsky L. M. Vector Bessel beams in bianisotropic media // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*— 2005.— Vol. 7.— P. 550–557.

Статьи в сборниках трудов:

5. The development of new operator methods for describing body and surface electromagnetic waves in complex media / Barkovsky L. M., Borzdov G. N., Furs A. N., Novitsky A. V., Galynsky V. M. // *Etudes on Theoretical Physics* / Eds. L. M. Barkovsky, I. D. Feranchuk, Ya. M. Shnir.— Singapore: World Scientific, 2004.— P. 283–304.

Тезисы докладов на конференциях:

6. Новицкий А. В. Ковариантное описание электромагнитных волн в круглых бианизотропных волноводах // *Фундаментальные проблемы оптики: Труды третьей международной конференции.*— СПб, 2004.— С. 270–271.
7. Новицкий А. В. Распространение волн в волокнах с отрицательным показателем преломления // *Сборник тезисов одиннадцатой всероссийской конференции студентов–физиков и молодых ученых.*— Екатеринбург, 2005.— С. 324–325.

РЕЗЮМЕ

Новицкий Андрей Викторович

ОПЕРАТОРЫ ЭВОЛЮЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ В БИАНИЗОТРОПНЫХ ВОЛОКНАХ

Ключевые слова: эволюционный оператор, тензор импеданса, операторы отражения и пропускания, бианизотропная среда, моды оптического волокна, векторные цилиндрические пучки, бесселевы пучки, среда с отрицательным показателем преломления.

Объектом исследования являются пучки электромагнитных волн, распространяющихся в бианизотропных средах и волокнах. Предметом исследования являются операторы пространственной эволюции электромагнитных волн.

Целью диссертационной работы является разработка операторного метода нахождения решений уравнений Максвелла для электромагнитных волн в цилиндрических структурах; в ковариантном виде определение основных характеристик мод; описание распределения поля и состояния поляризации цилиндрических пучков в плоскостойких бианизотропных средах; исследование свойств собственных мод двуслойных и многослойных волокон, характеризующихся отрицательным показателем преломления.

Операторный метод распространен на описание электромагнитных волн в многослойных бианизотропных волокнах. В рамках данного метода получены дисперсионные уравнения, и изучены поляризационные и энергетические характеристики мод волокна. Предложен и применен тензорный подход для описания пространственной эволюции векторных цилиндрических пучков в сложных средах (анизотропных, биизотропных, бианизотропных). Найдены новые, выраженные посредством функций Бесселя дробного порядка, решения уравнений Максвелла для пучков в анизотропных средах. Получены операторы отражения и пропускания векторных бесселевых пучков границами плоскостойких бианизотропных сред. Впервые исследовано распространение направляемых мод в двуслойных и многослойных волокнах с отрицательным показателем преломления. Обнаружено существование медленных мод, установлены условия идеального фазового согласования медленных ТЕ и ТМ мод, условия существования ТЕМ волн и мод с положительным, отрицательным и нулевым потоком энергии.

Разработанный операторный подход применим для прикладных расчетов, касающихся распространения электромагнитных волн в сложных цилиндрических структурах. Результаты работы представляют интерес для специалистов в области теории волноводов, интегральной оптики, волоконно-оптических систем связи.

РЭЗЮМЭ

Навіцкі Андрэй Віктаравіч

АПЕРАТАРЫ ЭВАЛЮЦЫІ ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫХ ХВАЛЯВЫХ ПУЧКОЎ У БІАΝІЗАТРОПНЫХ ВАЛОКНАХ

Ключавыя словы: эвалюцыйны аператар, тэнзар імпеданса, аператары адлюстравання і прапускання, біанізатропнае асяроддзе, моды аптычнага валакна, вектарныя цыліндрычныя пучкі, бесселевы пучкі, асяроддзе з адмоўным паказчыкам праламлення.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца пучкі электрамагнітных хваляў, якія распаўсюджваюцца ў біанізатропных асяроддзях і валакнах. Прадметам даследавання з'яўляюцца аператары прасторавай эвалюцыі электрамагнітных хваляў.

Мэтаю дысертацыйнай працы з'яўляецца распрацоўка аператарнага метада для вызначэння рашэнняў ураўненняў Максвела для электрамагнітных хваляў у цыліндрычных структурах; атрыманне ў каварыянтнай форме асноўных характарыстык модаў; апісанне размеркавання поля і стану палярызацыі цыліндрычных пучкоў у плоскаслойных біанізатропных асяроддзях; даследаванне ўласцівасцей модаў двухслойных і шматслойных валакнаў, якія характарызуюцца адмоўным паказчыкам праламлення.

Аператарны метады распаўсюджаны на апісанне электрамагнітных хваляў у шматслойных біанізатропных валакнах. У межах гэтага метада атрыманы дысперсійныя ўраўненні, вывучаны палярызацыйныя і энергетычныя характарыстыкі модаў валакна. Прапанаваны і скарыстаны тэнзарны падыход дзеля апісання прасторавай эвалюцыі вектарных цыліндрычных пучкоў у складаных асяроддзях (анізатропных, біізатропных, біанізатропных). Вызначаны новыя, якія выражаны праз функцыі Бесея дробнага парадку, рашэнні для пучкоў у анізатропных асяроддзях. Атрыманы аператары адлюстравання і прапускання вектарных бесселевых пучкоў межамі падзелу плоскаслойных біанізатропных асяроддзяў. Упершыню даследавана распаўсюджванне кіруемых модаў у двухслойных і шматслойных валакнах з адмоўным паказчыкам праламлення. Прадказана існаванне павольных модаў, выяўлены ўмовы ідэальнага фазавога сагласавання павольных TE і TM модаў, ўмовы існавання TEM хваляў і модаў з дадатным, адмоўным і нулявым патокам энергіі.

Распрацаваны аператарны падыход можна выкарыстоўваць для прыкладных разлікаў, якія тычацца распаўсюджвання электрамагнітных хваляў у складаных цыліндрычных структурах. Вынікі працы ўяўляюць каштоўнасць для спецыялістаў у вобласці тэорыі хваляводаў, інтэгральнай оптыкі, валаконна-аптычных сістэм сувязі.

SUMMARY

Novitsky Andrey Viktorovich

EVOLUTION OPERATORS OF ELECTROMAGNETIC WAVE BEAMS IN BIANISOTROPIC FIBERS

Key words: evolution operator, impedance tensor, reflection and transmission operators, bianisotropic medium, modes of optical fiber, vector cylindrical beams, Bessel beams, negative-refractive-index medium.

The object of research are electromagnetic wave beams in bianisotropic media and fibers. The subject of research are spatial evolution operators of electromagnetic waves.

The aims of research are to work out the operator method for electromagnetic waves in cylindrical structures, to obtain the main mode characteristics in covariant form, to describe cylindrical beams in layered bianisotropic media, to investigate the properties of two-layer and multi-layer negative-refractive-index fibers.

Operator method is extended to the describing of electromagnetic waves in multi-layer bianisotropic fibers. In the framework of the method the dispersion equations, polarization and energy mode characteristics has been obtained. The tensor approach for describing spatial evolution of vector cylindrical beams in complex media (anisotropic, biisotropic, bianisotropic) is proposed. It has been found new solutions for beams in anisotropic media, which are expressed in terms of Bessel functions of the fractional order. Reflection and transmission operators of the vector Bessel beams in layered bianisotropic media are obtained. For the first time the guided mode propagation in two-layer and multi-layer negative-refractive-index fibers has been investigated. It has been shown the existence of slow guided modes, perfect phase matching of slow TE and TM modes, existence of modes with positive, negative and zero energy flux. The properties of guided TEM modes in negative-refractive-index planar and circular waveguides has been predicted, the polarization and energy characteristics of such modes has been determined.

Developed operator approach can be used for applied calculations of electromagnetic wave propagation in complex cylindrical structures. The results of the work is of interest of specialists in the field of waveguide theory, integrated optics, fiber-optic transmission systems.

НОВИЦКИЙ АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**ОПЕРАТОРЫ ЭВОЛЮЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ В БИАНИЗОТРОПНЫХ ВОЛОКНАХ**

Подписано в печать апреля 2006 г. Формат 60 × 90 1/16.
Бумага офисная. Печать офсетная. Печ. л. 1.4
Учетн. изд. л. 1.2. Тираж 60 экз. Заказ № .

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68.
Отпечатано на ризографе Института физики НАНБ
Лицензия ЛП № 20 от 27.05.2003 г.