

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики»

На правах рукописи

Осипов Олег Владимирович

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ОТРАЖАЮЩИХ И ВОЛНОВЕДУЩИХ
СТРУКТУР С КИРАЛЬНЫМИ СЛОЯМИ**

Специальность 01.04.03 — Радиофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Самара — 2006

Работа выполнена на кафедре основ конструирования и технологий радиотехнических систем Поволжской государственной академии телекоммуникаций и информатики

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, профессор *В.А. Неганов*

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор *В.В. Ивахник*;

заслуженный деятель науки РФ,

доктор физико-математических наук, профессор *В.Ф. Кравченко*;

доктор технических наук, профессор *В.В. Яцьишен*

Ведущая организация:

НИИ радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана

Защита состоится « ____ » _____ 2006 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д219.003.01 в Поволжской государственной академии телекоммуникаций и информатики по адресу:

443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПГАТИ.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2006 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

О.В. Горячкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Проблема соотношения между симметрией и асимметрией объектов живого или неживого мира играет важную роль в вопросах возникновения и развития вселенной и жизни на Земле. Частью этой общей проблемы выступает явление киральности как проявления асимметрии левого и правого (от греч. — «χειρ» — рука). Данное явление наблюдается в различных областях человеческого знания, таких как биология, химия и физика.

Киральность в оптическом диапазоне проявляется в оптически активных средах. В середине XIX в. известный биолог Луи Пастер объяснил природу возникновения оптической активности молекулярной асимметрией, при которой формы молекул право и левовращающихся изомеров относятся друг к другу как зеркальные отображения. Теория гиротропных сред развита в работах Фёдорова Ф.И. [Л1].

Аналогичные явления в диапазоне СВЧ начали активно изучаться лишь в 80-ые годы XX века. Особый интерес представляют исследования электромагнитных свойств искусственных композиционных сред (метаматериалов) в частотных диапазонах, где существенную роль играет пространственная дисперсия. К таким материалам относятся *киральные среды*, создаваемые путем равномерного размещения проводящих микроэлементов зеркально асимметричной формы в изотропной среде-контейнере [Л2]. Киральная среда СВЧ является своеобразным искусственным кристаллом.

Используемые при создании киральной среды зеркально асимметричные элементы обладают размером меньшим длины волны СВЧ и называются *киральными электромагнитными частицами*.

Можно выделить два типа киральной среды — *объемный* и *планарный* (квази-киральный). В объемной модели используются трехмерные проводящие элементы зеркально асимметричной формы (например, право и левовинтовые спирали и т.п.), которые периодически размещаются и хаотически ориентируются внутри изотропной среды. В планарной модели применяются плоские киральные элементы (КЭ), которые представляют собой проводящие полоски зеркально асимметричной формы (например, в виде буквы S и ее зеркального эквивалента) и периодически располагаются на поверхности диэлектрической подложки. С позиции технической реализации киральной среды планарная модель является более предпочтительной, но степень её киральности меньше, чем у объемной.

Основными электромагнитными свойствами киральной среды являются *бифуркация нормальных волн* и *кросс-поляризация поля*. Первое свойство заключается в невозможности распространения в киральной среде линейно-поляризованной волны. В ней всегда существуют две волны с право (ПКП) и левокруговыми поляризациями (ЛКП), обладающие различными фазовыми скоростями. Второе свойство — кросс-поляризация — заключается в измене-

нии поляризации отраженного и прошедшего полей при падении волны на киральную среду. Например, при падении волны с перпендикулярной поляризацией в структуре поля отраженной волны будут присутствовать составляющие, относящиеся к ортогональной (параллельной) поляризации. Кроме того, известно, что киральная среда по-разному реагирует на падающие волны ПКП и ЛКП и возможны их взаимные преобразования. Кросс-поляризация отраженного и прошедшего через киральную среду излучения объясняется своеобразной формой кирального элемента.

Значительный интерес к исследованию электромагнитных свойств киральных структур связан с возможностью их применения в СВЧ технике. Главные возможности применения киральных сред основываются на явлении кросс-поляризации поля в киральной среде. На основе киральных материалов возможно создание частотно- и поляризационно-селективных фильтров, преобразователей поляризации, частотно-селективных защитных экранов и т.п. С другой стороны, существуют упоминания в научной литературе об увеличении поглощающих свойств среды при наличии в ней киральных микроэлементов. Кроме того, киральность оболочек покрытий тел позволяет уменьшить уровни прямого и обратного рассеяния электромагнитной волны, по сравнению с диэлектрическим покрытием. Вышеупомянутые факты свидетельствуют о возможности использования киральных структур при конструировании мало отражающих и (или) маскирующих покрытий аппаратов. В научной литературе также указывается на возможность использования киральных включений в волноведущих структурах для получения новых функциональных свойств.

Исследования искусственных киральных сред интенсивно проводятся приблизительно лишь с 1987 года. Основоположниками электродинамической теории киральной среды можно считать Varadan V.V., Varadan V.K., Lakhtakia A., Engheta N.A., Lindell I.V., Sihvola A.H. и др. В России значительный вклад в разработку данного направления внесли Третьяков С.А., Шевченко В.В., Сивов А.Н., Шатров А.Д., Каценеленбаум Б.З. и ряд других учёных. На Украине теория композиционных сред нашла свое развитие в работах Просвирнина С.Л. Активные электродинамические исследования искусственных киральных сред проводятся в Белоруссии.

Весь спектр задач по исследованию электродинамических свойств киральных сред можно разделить на два больших класса.

Первый класс включает в себя моделирование среды с киральными свойствами путем выбора конкретного зеркально асимметричного элемента, изучения дифракции электромагнитной волны на нем и определения материальных параметров. На сегодняшний день в качестве моделей трехмерных киральных элементов используются цилиндры с проводимостью вдоль винтовых линий поверхности (модель тонкопроволочной спирали) [Л3]; разомкнутые кольца с прямолинейными выступающими концами, сферы со спиральной проводимостью [Л4]; в качестве двумерных — частицы в виде греческой буквы Ω (омега-среда) [Л5] и др.

В качестве плоских микроэлементов зеркально асимметричной формы чаще всего используются полосковые элементы в виде буквы S и её зеркального эквивалента. В научной литературе подробно рассмотрены задачи отражения электромагнитных волн от двумерной периодической решетки из S-элементов [Л6].

Интерес вызывает получение аналитических выражений для параметров ε , μ и χ киральной среды через геометрические размеры кирального элемента, физические параметры среды-контейнера и пространственный период структуры. Подобные соотношения получены для моделей на основе сферических частиц со спиральной проводимостью [Л4] и цилиндров с проводимостью вдоль винтовых линий поверхности [Л3].

Второй класс задач связан с изучением свойств киральной среды без уточнения ее физической модели при использовании *a priori* записанных материальных уравнений. Здесь имеется в виду решение всех классических электродинамических задач, которые ранее рассматривались для некиральных сред. Именно к этому классу относится представленная диссертационная работа.

Основной интерес представляет решение задач отражения электромагнитных волн (ЭМВ) от киральных структур, изучение дифракции волн на двумерных и трехмерных киральных телах, исследование собственных волн кироволноводов, анализ излучения волн в киральной среде и антеннами зеркально асимметричной формы.

Коснемся вопроса материальных уравнений для киральной среды, который, вообще говоря, до сих пор является открытым. Отличие киральной среды от магнитодиэлектрической с математической точки зрения выражается в более сложной форме материальных уравнений, которая вытекает из условия пространственной дисперсии: векторы электрической \vec{D} и магнитной \vec{B} индукций одновременно связаны с векторами напряженностей электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей. Наиболее часто используемыми являются три формы материальных уравнений для гармонических полей:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \mp i \chi \vec{H}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \pm i \chi \vec{E}; \quad (1)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_c \vec{E} \mp i \xi \mu \vec{H}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \pm i \xi \mu \vec{E}; \quad (2)$$

$$\vec{D} = \varepsilon (\vec{E} + \beta \operatorname{rot} \vec{E}), \quad \vec{B} = \mu (\vec{H} + \beta \operatorname{rot} \vec{H}), \quad (3)$$

где $\varepsilon_c = \varepsilon + \mu \xi^2$; ε и μ — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости; χ и β — параметры киральности; ξ — киральный адмитанс. В соотношениях (1)-(3) верхние знаки соответствуют киральной среде на основе правых форм КЭ, а нижние знаки — киральной среде на основе левых форм КЭ. Выражения (3) получили название *уравнений состояния Друде-Борна-Фёдорова*. Уравнения (1)-(3) записаны в Гауссовой системе единиц.

Материальные уравнения (1) (*Линделл-Сивола*) используются в научной литературе наиболее часто [Л2], но в них не учитывается изменение диэлектрической проницаемости среды при внедрении киральных микроэлементов. В форме (2) (*Пост-Джаггард*) указанное изменение учтено, однако, автору диссертационной работы не удалось найти в литературе доказательств того, что изменение в киральной среде пропорционально *квадрату параметра киральности*. Форма (3) (*Друде-Борн-Фёдоров*) справедлива и для негармонических полей и непосредственно вытекает из факта существования пространственной дисперсии в среде и используется в работах Шевченко В.В. [Л4]. В диссертационной работе исследуется влияние формы материальных уравнений на результаты решения классических задач электродинамики и указаны условия использования форм (1) и (2). На настоящий момент времени можно утверждать, что решения большинства классических задач электродинамики обобщены на случай киральной среды в *рамках материальных уравнений (1)*. Так, рассмотрены задачи об отражении плоских электромагнитных волн (ПЭМВ) от границы раздела «диэлектрик-киральная среда» и кирального слоя, расположенного на идеально проводящей плоскости. Основной упор при исследовании электромагнитных свойств киральных структур делался на изучение дифракции волн на таких рассеивателях. Первыми работами в этом направлении, по видимому, являются задачи рассеяния электромагнитных волн на киральных круговом цилиндре, сфере и сферическом слое, решённые классическим методом разделения переменных. В работах Фисанова В.В., Дмитренко А.Г. и др. для численного решения задач рассеяния используются методы поверхностных интегральных уравнений и дискретных источников, при помощи которых рассмотрены задачи электромагнитного рассеяния на двумерных и трёхмерных киральных телах.

Значительное развитие получила теория волноведущих структур с киральным заполнением (кироволноводов). Начало исследованиям в этом направлении положила научная статья Varadan V.K. и др., посвящённая анализу собственных волн плоского однородно заполненного кирального волновода с металлическими стенками [Л7]. С тех пор подробно изучены собственные волны открытых и закрытых круглых однородно заполненных волноводов, плоских однородно и частично заполненных линий передачи. Заполнение волновода киральной средой приводит к новым свойствам собственных волн (например, бифуркации мод).

До сих пор в научной литературе отсутствует адекватная приближенная электромагнитная теория киральных сред, справедливая в случае малой, по сравнению с длиной волны, толщины слоя. Известны только приближенные граничные условия для тонкого плоского кирального слоя, расположенного на идеально проводящей плоскости, не учитывающие явление кросс-поляризации поля [Л8]. В [Л12] рассмотрены различные импедансные граничные условия для сверхпроводящих структур.

Кроме того, из рассмотрения выпадают исследования распространения ЭМВ в периодически неоднородных киральных средах и в экранированных полосково-щелевых волноведущих структурах с киральными слоями. Недос-

таточное внимание уделяется электродинамическому моделированию распространения ЭМВ в периодически неоднородных киральных структурах [Л11].

Настоящая диссертационная работа в известной мере затрагивает указанные направления, что даёт возможность сделать вывод об актуальности разработанной темы.

Цель работы заключается в разработке электродинамической теории отражающих и волнораспространяющих структур с плоскими и цилиндрическими киральными слоями (тонкими и толстыми по отношению к длине волны), ориентированной на создание малоотражающих поверхностей и волнораспространяющих структур с новыми функциональными свойствами.

Основные задачи работы:

✧ сравнение существующих материальных уравнений для киральной среды на основе анализа свойств отражающих и волнораспространяющих структур с киральными слоями путём описания их различными формами уравнений;

✧ электродинамическое моделирование отражающих и волнораспространяющих структур с киральными слоями, описываемыми обоснованно выбранными материальными уравнениями для киральной среды;

✧ получение граничных условий для тонких киральных слоев, описывающих более адекватное поведение электромагнитных волн в киральных слоях с плоской и цилиндрической формой поверхности;

✧ обобщение метода частичного обращения оператора на основе теории СИУ для решения задач о собственных волнах полосково-щелевых структур с киральными слоями;

✧ построение электродинамической теории распространения электромагнитных волн в периодически неоднородных киральных средах;

✧ разработка новых функциональных устройств, принципы работы которых основаны на электромагнитных свойствах структур с киральными слоями.

Научная новизна работы состоит в разработке теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в электродинамической теории искусственных киральных сред и структур, а именно:

1. Проведен электродинамический анализ ряда отражающих и волнораспространяющих структур с киральными слоями и на его основе предложены варианты частотно и поляризационно-селективных устройств СВЧ-диапазона.

2. Обоснованно выявлены границы применимости двух основных форм материальных уравнений для киральной среды.

3. Получены двухсторонние и односторонние приближенные граничные условия (ПГУ) для тонких плоских и цилиндрических киральных слоёв, учитывающие явление кросс-поляризации. Преимущество использования ПГУ заключается в отсутствии необходимости определения электромагнитного поля в киральном слое.

4. Построена электродинамическая теория распространения электромагнитных волн в периодически неоднородных киральных структурах и на ее основе предложена модель частотно-селективного поляризационного устройства СВЧ.

5. Впервые на основе метода частичного обращения сингулярного оператора с ядром Коши получено дисперсионное уравнение и проведен анализ распространения собственных волн в экранированной секториально-щелевой линии передачи с киральным слоем.

6. Обнаружено явление полной кросс-поляризации при отражении линейно-поляризованной волны от плоской многослойной киральной структуры, которое может быть использовано при создании ТЕ-ТМ-преобразователей СВЧ.

7. Обнаружены непересекающиеся «окна непрозрачности» волн ПКП и ЛКВ в периодически неоднородной структуре из чередующихся киральных и диэлектрических слоев, что может быть использовано при создании частотно-селективных поляризационных устройств СВЧ.

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается:

- ✧ использованием обоснованных физических моделей и строгих (или с известными оценками сходимости) математических методов решения поставленных задач;
- ✧ сравнением отдельных полученных результатов с расчетными данными, приведенными в научной литературе;
- ✧ предельными переходами полученных результатов в известные соотношения для диэлектрических структур;
- ✧ внутренней сходимостью некоторых полученных результатов.

Практическая ценность работы состоит:

- ✧ в построении приближенной электромагнитной теории слоистых структур с тонкими киральными слоями, основанной на использовании полученных ПГУ, позволяющих значительно упростить решение широкого класса задач об отражении электромагнитных волн от многослойных (плоских и цилиндрических) киральных структур;
- ✧ в разработке частотно-селективного экранирующего покрытия для защиты от электромагнитного излучения, подтвержденного патентом;
- ✧ в обобщении численно-аналитического метода частичного обращения сингулярного интегрального оператора с ядром Коши на случай решения задач о собственных волнах регулярных экранированных полосково-щелевых структур с киральными слоями. Такие структуры обладают новыми функциональными свойствами;
- ✧ в подтверждении возможности создания малоотражающих поверхностей на основе многослойных киральных покрытий;

✧ в возможности использования результатов работы при включении в объемные интегральные схемы киральных слоев для расширения их функциональных возможностей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Двухсторонние приближенные граничные условия для тонких плоских и цилиндрических киральных слоев, учитывающие кросс-поляризацию поля.

2. Односторонние приближенные граничные условия для тонких плоских и цилиндрических киральных слоев, конформно расположенных на идеально-проводящих поверхностях, учитывающие кросс-поляризацию поля.

3. Приближенная электромагнитная теория отражающих и волноведущих структур с киральными слоями, основанная на использовании односторонних и двухсторонних приближенных граничных условий.

3. Устройство частотно-селективного экранирующего покрытия для защиты от электромагнитного излучения, подтвержденное патентом №2003109213/09 (009761). (Селективное экранирующее покрытие для защиты от электромагнитного излучения / Долбичкин А.А., Неганов В.А., Осипов О.В. Приоритет от 01.04.2003).

4. Принцип создания частотно- и поляризационно-селективного фильтров СВЧ на основе периодически неоднородной структур из киральных и диэлектрических слоев.

5. Алгоритм решения задачи о собственных волнах экранированной секториально-щелевой линии передачи с киральным слоем, основанный на получении векторных сингулярных интегральных уравнений относительно тангенциального электрического поля в области щели и его решении методом частичного обращения сингулярного оператора, содержащего особенность Коши.

6. Дисперсионное уравнение для собственных волн плоского кирально-ферритового волновода.

7. Физическая и математическая модели периодически неоднородной киральной среды.

8. Аналитические выражения и анализ полей дифракции ПЭМВ E- и H-поляризаций на плоском и цилиндрическом киральных слоях, конформно расположенных на идеально-проводящих поверхностях, справедливые в рамках общепринятых форм материальных уравнений для киральной среды.

10. Формулы Френеля для наклонного падения ПЭМВ E- и H-поляризаций на границу раздела «диэлектрик-киральная среда», записанные в унифицированном виде, справедливые для общепринятых форм материальных уравнений.

11. Новые физические закономерности, установленные в процессе математического моделирования исследуемых отражающих и волноведущих структур с киральными слоями:

✧ эффект полной кросс-поляризации при отражении линейно-поляризованной волны от плоских многослойных кирально-диэлектрических структур;

✧ явление возникновения непересекающихся «окон непрозрачности» волн ПКП и ЛКП в периодически неоднородной структуре из киральных и диэлектрических слоев;

✧ явление существования участков нормальной и аномальной дисперсии у волн право- (ПЭП) и левоэллиптической поляризации (ЛЭП) в экранированной секториальной щелевой кирально-диэлектрической линии передачи.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы апробировались на IX Международной школе-семинаре «Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ» (г. Самара, 1997 г.), VI Международной научно-технической конференции «Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ» (г. Самара, 1999 г.), I Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Техника и технология связи» (г. Минск, 1999 г.), I Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» (г. Самара, 2001 г.), II Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» (г. Самара, 2003 г.), III Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» (г. Волгоград, 2004 г.), IV Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» (г. Нижний Новгород, 2005 г.), V Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов» (г. Самара, 2006 г.), а также на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского и инженерно-технического состава ПГАТИ (г. Самара, 1998-2006 гг.). Участие в семинаре-совещании «Теоретические и экспериментальные аспекты взаимодействия электромагнитного излучения с искусственными киральными средами СВЧ» (г. Москва, Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта, 20 июня 2006 года).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 76 работ, в том числе 19 статей в журналах ВАК и монография «Отражающие, излучающие и волноведущие структуры с киральными элементами». Получен патент на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 118 наименований. Объем диссертации составляет 300 страниц текста, в том числе 126 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, показана новизна и практическая ценность работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «Распространение и излучение электромагнитных волн в безграничной однородной киральной среде» начинается с описания наиболее известных фи-

зических моделей киральной среды. В ней кратко рассмотрены модели на основе цилиндров с электрической и магнитной проводимостью вдоль винтовых линий поверхности и сферических спирально проводящих частиц. Указаны основные электродинамические свойства этих моделей. Также рассмотрена планарная модель квази-киральной среды на основе двумерной периодической решетки из полосковых элементов S-образной формы.

Значительное внимание уделено вопросу материальных уравнений для киральной среды. Подробно рассмотрены формы записи соотношений (1)-(3) и указаны их недостатки.

В п.1.3 автором работы доказано, что киральная среда, описываемая материальными уравнениями (1), в случае гармонической зависимости векторов поля от одной из координат является частным случаем бигиротропной среды:

$$\vec{D} = \vec{\varepsilon}^{(\pm)} \vec{E}, \quad \vec{B} = \vec{\mu}^{(\pm)} \vec{H};$$

$$\vec{\varepsilon}^{(\pm)} = \begin{bmatrix} \varepsilon & \pm i\chi_E & 0 \\ \mp i\chi_E & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon \end{bmatrix}, \quad \vec{\mu}^{(\pm)} = \begin{bmatrix} \mu & \mp i\chi_H & 0 \\ \pm i\chi_H & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\vec{\varepsilon}^{(\pm)}$ и $\vec{\mu}^{(\pm)}$ — тензоры диэлектрической и магнитной проницаемостей бигиротропной среды; $\chi_E = \chi/\eta$, $\chi_H = \chi\eta$, $\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$. Верхние знаки соответствуют киральной среде на основе спиралей с правой закруткой, а нижние знаки — киральной среде на основе левовинтовых спиралей. Параметр киральности χ входит в недиагональные элементы тензоров бигиротропной среды. Ось гиротропии направлена вдоль оси Oz . Здесь наблюдается некоторая аналогия с ферритовой средой.

В диссертационной работе приводятся эквивалентные тензоры $\vec{\varepsilon}^{(\pm)}$ и $\vec{\mu}^{(\pm)}$ для киральной среды, описываемой различными формами материальных уравнений.

В п.1.5 рассмотрены основные уравнения электродинамики для электромагнитных полей в киральной среде. Показано, что нормальными волнами безграничной киральной среды являются ПКП и ЛКП-волны, обладающие различными постоянными распространения $k_{R,L}$, выражения для которых определяются формой материальных уравнений.

В п.1.6 решена задача об излучении элементарного электрического диполя (ЭЭД) в киральной среде. В результате решения неоднородных уравнений Гельмгольца относительно полей ПКП и ЛКП были получены аналитические выражения для векторов $\vec{E}_{R,L}$ и $\vec{H}_{R,L}$ волн, излучаемых ЭЭД в киральной среде. Показано, что ЭЭД возбуждает две кругополяризованные волны, обладающие различными фазовыми скоростями. Фазовые фронты этих волн ПКП и ЛКП на любом расстоянии от диполя не совпадают между

собой. В отличие от диэлектрической среды, ЭЭД в киральной среде создает гибридные волны, у которых одновременно $E_r \neq 0, H_r \neq 0$ (r — радиальная координата сферической системы координат). Диаграммы направленности (ДН) всех составляющих векторов $\vec{E}_{R,L}$ представляют собой «восьмёрки», однако ДН φ - и θ -составляющих повернуты на угол $\pi/2$ относительно ДН радиальных составляющих.

В п.1.7 рассмотрена задача об излучении электромагнитных волн тонкопроволочным излучателем квази-киральной формы в виде «змейки», находящимся в безграничной диэлектрической среде с материальными параметрами ε и μ . Правая и левая формы излучателя показаны на рис. 1. Задача решалась в приближении тонкого линейного тока, амплитуда которого считалась постоянной по всей длине проводника. Составляющие векторного потенциала в дальней зоне определялись по формуле:

$$A_{\infty p}^e(\vec{r}) = \frac{e^{-ikr}}{r} \int_{V'} j_p^{e,\vec{n}\hat{0}}(\vec{r}') e^{ik(x'\sin\theta\cos\varphi + y'\sin\theta\sin\varphi + z'\cos\theta)} dx' dy' dz',$$

где $p = x, y, z$; $\vec{r}' = (x', y', z')$ — радиус-вектор точки, в которой расположен источник; $k = k_0 \sqrt{\varepsilon\mu}$ — волновое число для плоской однородной волны в диэлектрической среде с параметрами ε и μ ; k_0 — волновое число для плоской однородной волны в вакууме; $\vec{j}^{e,\vec{n}\hat{0}}$ — объёмная плотность электрического тока на проводнике.

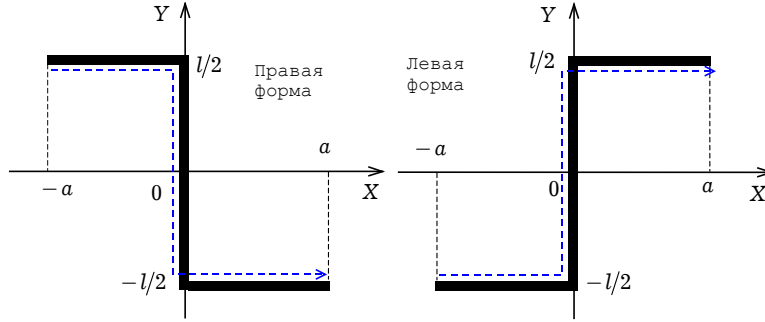


Рис. 1. Тонкопроволочный излучатель в виде «змейки»

На втором этапе был совершен переход от составляющих вектора \vec{A}_{∞}^e в декартовой системе к компонентам в сферической системе координат. Векторы \vec{E} и \vec{H} определялись затем по общеизвестным формулам:

$$\vec{E} = -ik_0\mu\vec{A}_{\infty}^e + \frac{1}{ik_0\varepsilon}\text{grad div}\vec{A}_{\infty}^e, \quad \vec{H} = \text{rot}\vec{A}_{\infty}^e. \quad (6)$$

На рис. 2 приведены нормированные ДН F_θ , F_φ и $F = \sqrt{F_\varphi^2 + F_\theta^2}$ в меридиональной ($\varphi = 0$) (а) и азимутальной ($\theta = \pi/2$) (б) плоскостях в случае излучателя правой формы при $l/\lambda = 1/10$, $a/\lambda = 1/5$, $\varepsilon = 1$, $\mu = 1$. Заметим, что электромагнитное поле излучения в дальней зоне носит чисто поперечный характер ($E_r = H_r = 0$).

Как видно из графиков, приведенных на рис. 2а ДН в меридиональной плоскости являются симметричными относительно $\theta = 0$. Более того, они в точности совпадают с аналогичными ДН для излучателя левой формы. ДН в азимутальной плоскости (рис. 2б) несимметричны, причем ДН полей излучателей правой и левой форм относятся друг к другу как зеркальные отражения относительно $\varphi = 0$. Такой вид ДН в азимутальной плоскости позволяет считать тонкопроволочный элемент в виде «змейки» квази-киральным.

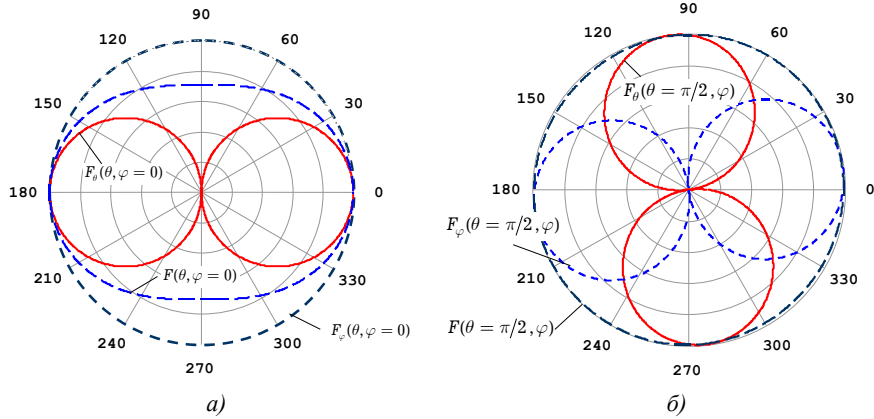


Рис. 2. Нормированные ДН поля излучения квази-кирального элемента

В главе 2 «Строгий подход к исследованию отражающих структур с киральными слоями» рассматриваются классические задачи отражения ПЭМВ от плоских киральных структур и дифракции волн на однородном киральном и кирально-металлическом цилиндрах. Решение этих задач проводится в рамках двух различных форм материальных уравнений (1) и (2) с целью выявления условий их использования.

В п.2.1 рассматривается задача о падении ПЭМВ линейной поляризации на границу раздела «диэлектрик-киральная среда». Для случаев падения волн Н и Е-поляризации в *явном виде* получены формулы Френеля, обобщенные на случай киральной среды, которые остаются справедливыми в рамках материальных уравнений (1) и (2). Численный анализ показал, что при падении ПЭМВ Е-поляризации существует угол, при котором происходит полная

кросс-поляризация (от границы раздела отражается волна Н-поляризации). Было выявлено, что при использовании форм (1) и (2) при нормальном падении отсутствует кросс-поляризация.

На рис. 3 представлены графики зависимостей модулей коэффициентов отражения основных компонент $|r_{ee}|$ и $|r_{hh}|$ от параметра киральности при падении ПЭМВ Н- и Е-поляризаций под углом $\theta = \pi/4$ из вакуума на киральную среду. Сплошными кривыми показаны данные зависимости от параметра киральности χ , рассчитанные с использованием (1); штриховые линии соответствуют зависимостям от кирального адмитанса ξ , рассчитанные с использованием (2). Как видно из приведенных характеристик, при $\chi > 0.3$ наблюдается расхождение результатов расчета. Можно отметить, что при увеличении параметра киральности происходит значительное изменение диэлектрической проницаемости, что не учитывается в соотношениях (1), поэтому при $\chi > 0.3$ целесообразнее использовать форму (2). При малых значениях χ материальные уравнения (1) и (2) в целом адекватно описывают киральную среду.

Таким образом, известная из научной литературе, например [Л9] эквивалентность различных электродинамических моделей киральной среды наблюдается только при малых значениях параметра киральности.

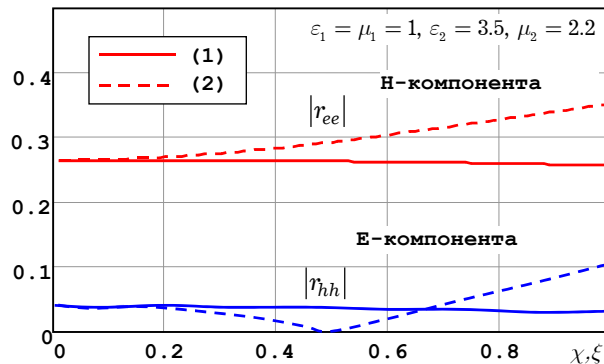


Рис. 3. Зависимости модулей коэффициентов отражения основных компонент от параметра киральности при использовании материальных уравнений (1) и (2)

В п.2.2 рассмотрено строгое решение задачи об отражении ПЭМВ линейной поляризации от кирального слоя толщиной d , расположенного на идеально проводящей плоскости. Задача решалась классическим методом частичных областей с учетом кросс-поляризации во внешней области. Выра-

жения для поля во внешней области 1 состоят из основных и кросс-поляризованных компонент и в них присутствуют неизвестные коэффициенты отражения r_{ee}, r_{eh} . В киральном слое (область 2) электромагнитное поле представляется в виде суперпозиции четырех волн с круговыми поляризациями — двух прошедших в киральный слой из диэлектрической области с коэффициентами прохождения $T_R^{(-)}$ и $T_L^{(-)}$ и двух отраженных от металлической плоскости обратно в киральный слой с коэффициентами $T_R^{(+)}$ и $T_L^{(+)}$.

$$E_z^{(2)} = E_R + E_L, \quad H_z^{(2)} = \frac{i}{\eta^{(2)}}(E_R - E_L), \quad (7)$$

где $E_{R,L} = T_{R,L}^{(+)} e^{ik_{R,L}(\vec{s}_{R,L}, \vec{r})} + T_{R,L}^{(-)} e^{-ik_{R,L}(\vec{s}_{R,L}, \vec{r})}$, $k_{R,L}$ — постоянные распространения волн ПКП и ЛКП; $\vec{s}_{R,L} = \{\sin \theta_{R,L}, -\cos \theta_{R,L}\}$ — единичные векторы, вдоль которых распространяются преломленные волны; $\theta_{R,L}$ — углы, которые векторы \vec{s}_R и \vec{s}_L образуют с положительным направлением оси Oy , направленной поперёк слоя; $\eta^{(2)}$ — характеристическое сопротивление киральной среды. Явный вид $k_{R,L}$ и $\eta^{(2)}$ определяется формой материальных уравнений для киральной среды. Индекс 2 соответствует киральному слою.

С использованием граничных условий при $y=0, d$ получаются аналитические выражения для коэффициентов отражения основных и кросс-поляризованных компонент поля и коэффициентов прохождения волн ПКП и ЛКП при падении волн Н и Е-поляризации, справедливые в рамках материальных уравнений (1) и (2).

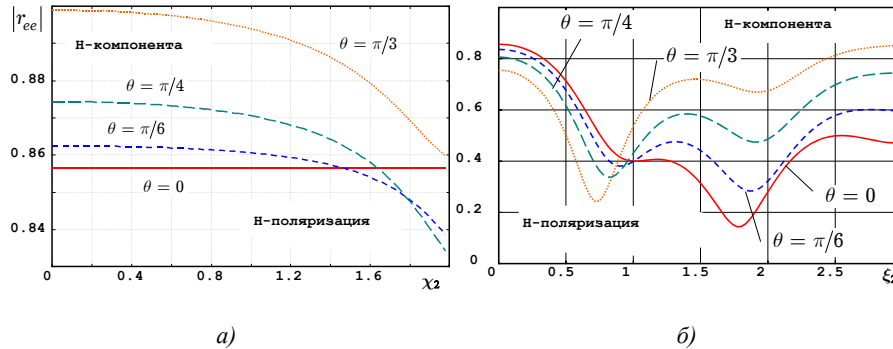


Рис. 4. Зависимости модуля коэффициента отражения основной компоненты от параметра киральности при падении волны Н-поляризации

При численном расчете интерес представляло сравнение зависимостей коэффициентов отражения основных и кросс-поляризованных компонент от нормированной толщины $k_0 d$ и параметра киральности при использовании материальных уравнений (1) и (2). На рисунке 4 приведены зависимости модуля коэффициента отражения основной компоненты $|r_{ee}|$ от параметра киральности при падении волны Н-поляризации для различных углов падения θ . Рис. 4а соответствует расчету зависимости от параметра киральности χ_2 с использованием (1); рис. 4б — расчету зависимости от кирального адмитанса ξ_2 с использованием (2). При расчетах были выбраны следующие параметры: $\varepsilon_1 = \mu_1 = 1; \varepsilon_2 = 1; \mu_2 = 5 - i; k_0 d = 0.5$. Из представленных графиков видно, что при использовании материальных уравнений (1) коэффициент отражения основной компоненты при нормальном падении не зависит от параметра киральности, то есть среда перестает быть киральной. При использовании материальных уравнений (2) зависимость коэффициента отражения от кирального адмитанса имеет место даже при нормальном падении волны.

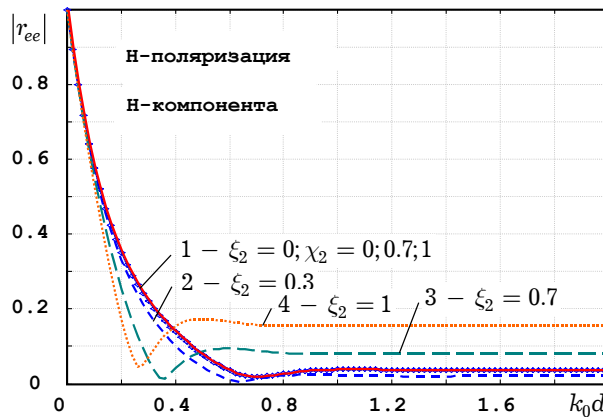


Рис. 5. Зависимости модуля коэффициента отражения основной компоненты от нормированной толщины при использовании материальных уравнений (1) и (2)

Кроме того, в результате анализа численных результатов были выявлены следующие закономерности:

— при нормальном падении волн Е- и Н-поляризаций кросс-поляризованная компонента не возникает (при использовании (1) и (2)).

— наклонное падение Н-поляризованной волны приводит к более сильной кросс-поляризации поля (при использовании (1) и (2)).

— при нормальном падении волн Е- и Н-поляризаций характер их отражения киральным слоем одинаковый (только при использовании (1)).

Рис. 5 иллюстрирует возможность использования односторонне металлизированного кирального слоя в качестве малоотражающего покрытия. На

рисунке приведены частотные зависимости модуля коэффициента отражения основной (Н) компоненты при нормальном падении волны Н-поляризации. Параметры структуры: $\varepsilon_1 = \mu_1 = 1$; $\varepsilon_2 = 3.5 - 2.8i$; $\mu_2 = 4.2 - 2.8i$. Расчет производился с использованием уравнений (1) (кривая 1) и (2) (кривые 2,3,4). Как видно из представленных зависимостей, в большом диапазоне частот удается получить достаточно малое отражение, но это, скорее всего, объясняется значительными диэлектрическими и магнитными потерями.

В п.2.3 и 2.4 рассмотрено решение задач дифракции ПЭМВ Е и Н-поляризации на однородном киральном и кирально-металлическом цилиндрах в рамках материальных уравнений (1) и (2). При их решении использовался метод частичных областей и были получены аналитические выражения для основных и кросс-поляризованных компонент полей во внутренней и внешней областях. Интерес представлял численный расчет двухпозиционных диаграмм эффективной поверхности рассеяния $\sigma_\varphi^{e,h}$ основных компонент, нормированной на длину волны λ :

$$\frac{\sigma_\varphi^{e,h}}{\lambda} = 10 \lg \left(\sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n^{e,h} e^{in(\varphi+\pi/2)} \right)^2,$$

где $C_n^{e,h}$ — амплитуды составляющих E_z и H_z во внешней области при рассеянии волн Н и Е-поляризации, соответственно.

Как показал анализ численных результатов, при дифракции ПЭМВ Е- и Н-поляризации на круговом идеально проводящем стержне радиуса a_0 в цилиндрической киральной оболочке радиуса a при некоторых отношениях a/a_0 происходит уменьшение уровней прямого и обратного рассеяния по сравнению с диэлектрической оболочкой. Наибольшей эффект уменьшения обратного рассеяния достигается при падении ПЭМВ Н-поляризации, у которой вектор \vec{E} направлен вдоль оси цилиндра. Кроме того, была исследована сходимость рядов, определяющих составляющие поля рассеяния в дальней зоне и показано, что при вычислениях можно ограничиваться 6 членами.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности использования киральных оболочек с целью уменьшения радиолокационной видимости объектов.

В главе 3 «Строгий подход к исследованию волноведущих структур с киральными слоями» рассматривается распространение электромагнитных волн в плоских волноведущих структурах с киральными слоями. В п.3.1 на примере задачи о собственных волнах плоского однородно заполненного кирального волновода показан алгоритм вывода дисперсионного уравнения. В отличие от работ, автором диссертации ставятся краевые задачи на дифференциальных уравнениях четвертого порядка, решения которых находятся при помощи характеристического уравнения. Неизвестные постоянные определяются из граничных условий на идеально проводящих плоскостях и связанных дифференциальных уравнений 2-го порядка относительно продоль-

ных составляющих векторов \vec{E} и \vec{H} . Было показано влияние формы материальных уравнений на результаты решения задачи. В частности, частоты отсечек собственных волн плоского однородно заполненного волновода при использовании уравнений (1) совпадают с частотами отсечек аналогичного волновода с диэлектрическим заполнением. При использовании формы (2) частоты отсечек кирального волновода зависят от кирального адмитанса.

Показано, что в кироволноводах снимается вырождение собственных волн, присущее однородно заполненным диэлектрическим линиям передачи. Все собственные волны являются гибридными (HE и EH) и имеют несовпадающие дисперсионные характеристики (бифуркация). Волны из дуплетов обладают право- и левоэллиптическими поляризациями.

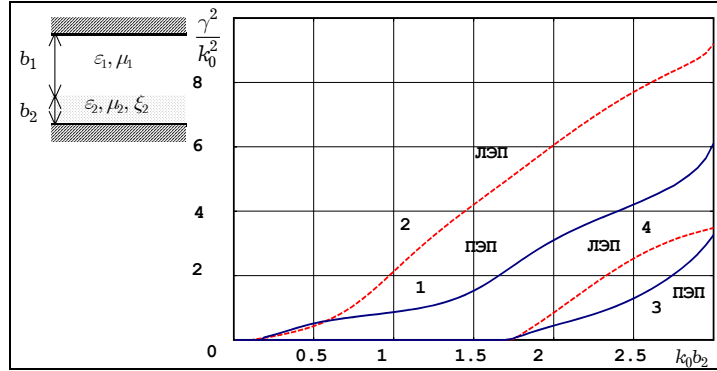


Рис. 6. Дисперсионные характеристики собственных волн плоского кирально-диэлектрического волновода

В п.3.2 в рамках материальных уравнений (2) решена задача о собственных волнах плоского металлизированного кирально-диэлектрического волновода (в отличие от [Л10], где использовались соотношения (1)). При помощи метода частичных областей в аналитическом виде получено дисперсионное уравнение для собственных волн, которое при $\chi_2 = 0$ распадается на два, описывающих LE и LM-волны плоского двухслойного диэлектрического волновода. Поперечное сечение волноведущей структуры и зависимости квадратов нормированных постоянных распространения $(\gamma/k_0)^2$ собственных волн от нормированной толщины кирального слоя $k_0 b_2$ показаны на рис. 6. Расчет производился при следующих значениях параметров: $\epsilon_1 = 1, \mu_1 = 1, \epsilon_2 = 3.5, \mu_2 = 2.2, \xi_1 = 0.3, k_0 b_1 = 3$. Как и в однородно заполненном плоском киральном волноводе здесь было выявлено явление бифуркации, однако дисперсионные характеристики дуплетных волн пересекаются. Это означает, что на некоторых частотах ПЭП волна из дуплета распространяется с большей фазовой скоростью, чем ЛЭП-волна; на других частотах —

ситуация обратная. Таким образом, в кирально-диэлектрическом волноводе на основе правовинтовых элементов, в отличие от безграничной киральной среды, существуют частоты, на которых волна ПЭП распространяется с большей фазовой скоростью, чем ЛЭП.

В п.3.3 в рамках материальных уравнений (2) решена задача о собственных волнах плоского металлизированного кирально-ферритового волновода, подмагничиваемого постоянным полем напряженности \vec{H}_0 вдоль оси Ox . При помощи метода частичных областей в аналитическом виде получено дисперсионное уравнение для собственных волн. Поперечное сечение волноведущей структуры и зависимости квадратов нормированных постоянных распространения $(\gamma/k_0)^2$ собственных волн от нормированной толщины кирального слоя $k_0 b_2$ показаны на рис. 7. Расчет был выполнен при следующих параметрах: $\varepsilon_1 = 11$, $\varepsilon_2 = 3.5$, $\mu_2 = 2.2$, $\xi_2 = 0.3$, $k_0 b_1 = 2$, $k_m b_1 = 0.25$, $k_o b_1 = 0.5$ (параметры k_o и k_m зависят от резонансных частот ферритовой среды). Как видно из рис. 7 спектр собственных волн плоского кирально-ферритового волновода достаточно богатый. Здесь можно отметить существование волн, обозначенных цифрами 7 и 8, дисперсионные характеристики которых аналогичны зависимостям собственных волн однородного ферритового волновода. Кривые 5,6 и 9 относятся к магнитостатическим волнам (ПКП и ЛКП). Кривые 1 и 2 — ПКП и ЛКП волны, распространяющиеся без дисперсии (дуплетный аналог ТЕМ-волны в диэлектрическом волноводе). Дуплет 3-4 относится к ПЭП и ЛЭП волнам и имеет дисперсионные характеристики, аналогичные зависимостям собственных волн плоского однородно заполненного кирального волновода. На сравнительно низких частотах плоский кирально-ферритовый волновод проявляет ферритовые свойства; на более высоких — киральные. При $1 < k_0 b_1 < 1.5$ существует область, в которой происходит одновременное распространение волн право- и левовращающихся поляризацій, имеющих различную физическую природу — магнитостатическую и киральную. Исследование распространения собственных волн плоского кирально-ферритового волновода позволило сделать вывод о возможности совместного использования киральной и ферритовой сред при создании фазовращателей, преобразователей поляризации и т.п.

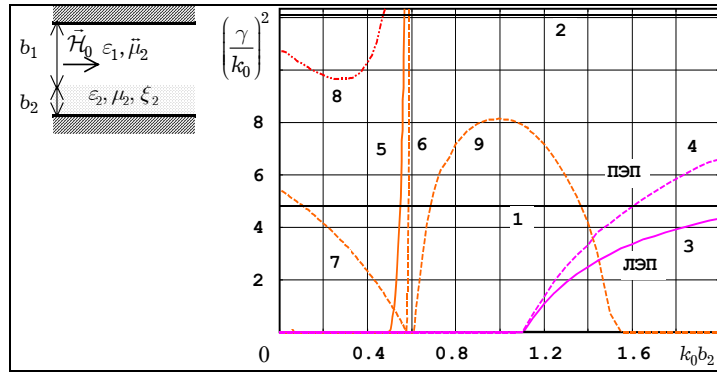


Рис. 7. Дисперсионные характеристики собственных волн плоского кирально-ферритового волновода

В главе 4 «Приближенные граничные условия для тонких киральных слоев» построена приближенная электродинамическая теория киральной среды, базирующаяся на использовании приближенных граничных условий для тонких киральных слоев с плоской и цилиндрической поверхностями. В диссертационной работе рассмотрены два класса ПГУ.

1. *Двухсторонние приближенные граничные условия (ДПГУ)* для тонкого кирального слоя, расположенного на границе раздела между двумя произвольными (но не идеально проводящими) средами. ДПГУ связывают между собой тангенциальные составляющие векторов электромагнитного поля в областях окружающих киральный слой через физические и геометрические параметры слоя. 2. *Односторонние приближенные граничные условия (ОПГУ)* импедансного типа для тонкого кирального слоя, расположенного на идеально проводящей плоскости. ОПГУ связывают тангенциальные составляющие векторов электромагнитного поля во внешней области через физические и геометрические параметры слоя. Удобство использования ДПГУ и ОПГУ при решении электродинамических задач заключается в том, что в этом случае отпадает необходимость в вычислении электромагнитного поля в киральном слое, что является весьма трудоёмкой задачей. В диссертационной работе ДПГУ и ОПГУ получены для тонких по сравнению с длиной волны киральных слоёв с плоской и цилиндрической формой поверхности.

Алгоритм вывода ПГУ основан на аппроксимации тангенциальных составляющих векторов \vec{E} и \vec{H} в киральном слое через их известные значения по обе стороны границы раздела. На первом этапе из уравнений Максвелла в интегральной форме определяются циркуляции векторов \vec{E} и \vec{H} вдоль двух контуров, выбираемых в продольной и поперечной плоскостях кирального слоя. Затем на границах раздела кирального слоя со внешней областью используются граничные условия для тангенциальных составляющих векторов поля. На втором этапе нормальные составляющие векторов поля в киральном

слое выражаются через тангенциальные с использованием уравнений Максвелла для электромагнитного поля в киральной среде. На третьем этапе тангенциальные составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} в киральном слое интерполируются по двум известным значениям на границах с областями 1 и 2:

$$\vec{E}_\tau = \frac{\vec{E}_\tau^{(1)} + \vec{E}_\tau^{(2)}}{2}, \quad \vec{H}_\tau = \frac{\vec{H}_\tau^{(1)} + \vec{H}_\tau^{(2)}}{2}. \quad (8)$$

При выводе ОПГУ необходимо в выражении (8) положить $\vec{E}_\tau^{(2)} = 0$ (область 2 — идеально проводящая). Заметим, что ПГУ в общем виде могут быть получены для случая, когда киральный слой толщины h является ограниченным вдоль всех трех координат декартовой (или цилиндрической) систем координат.

ДПГУ для тонкого плоского кирального слоя, расположенного на границе раздела между двумя произвольными средами, в явном виде получены в п. 4.1 диссертационной работы. Приведем в явном виде ОПГУ для тонкого плоского кирального слоя, расположенного на идеально проводящей плоскости в случае $\partial/\partial z = 0$, полученные в п. 4.2:

$$E_x^{(1)} = ik_0 h \mu \left[H_z^{(1)} + \frac{1}{k_0^2 n_c^2} \frac{\partial^2 H_z^{(1)}}{\partial x^2} \right] \pm \frac{\chi h}{k_0 n_c^2} \frac{\partial^2 E_z^{(1)}}{\partial x^2}, \quad (9)$$

$$E_z^{(1)} = -ik_0 h \mu H_x^{(1)} \pm \frac{k_0 h \chi}{2} E_x^{(1)},$$

где ε, μ, χ и h — материальные параметры и толщина кирального слоя; $n_c^2 = k_0(\varepsilon\mu - \chi^2)$. Верхние знаки в (9) соответствуют киральной среде на основе правых форм киральных элементов, а нижние знаки — киральной среде на основе левых форм микрочастиц.

Заметим, что в ОПГУ (9) вторые слагаемые в правых частях пропорциональны параметру киральности χ и учитывают явление кросс-поляризации поля. В ОПГУ, полученных С.А. Третьяковым [Л8] эти слагаемые отсутствуют и киральность слоя учитывается лишь в параметре n_c^2 в виде квадратичной добавки.

В диссертационной работе ОПГУ были использованы для приближенного решения ряда задач, которые имеют строгие решения. При помощи ОПГУ были решены задача об отражении ПЭМВ линейной поляризации от тонкого кирального слоя толщины h , расположенного на идеально-проводящей плоскости (п.4.3) и проведен приближенный электродинамический анализ собственных волн плоского двухслойного кирально-диэлектрического волновода (п.4.4). Доказано, что ОПГУ адекватно описывают электродинамические свойства кирального слоя вплоть до его нормированной толщины порядка $k_0 h < 0.2$.

На рис. 8 приведено сравнение частотных зависимостей модулей коэффициентов основной (а) и кросс-поляризованной (б) компонент поля при отражении ПЭМВ Н-поляризации от кирального слоя, расположенного на идеально проводящей плоскости с использованием ОПГУ (сплошные линии) и при строгом расчете (штриховые линии). Расчет был выполнен при следующих параметрах: $\varepsilon = 3.5 - 0.3i$, $\mu = 2.2 - 0.3i$, $\chi = 0.3$. Как видно из графиков, использование ОПГУ приемлемо для достаточно тонких киральных слоев: при $k_0 h \leq 0.25$.

В п.4.5 с использованием ОПГУ был проведен приближенный электродинамический анализ распространения собственных волн плоских металлизированных трехслойных кироволноводов с двумя киральными слоями. При наличии в волноводе двух киральных слоев с различными по знаку параметрами киральности возникает ситуация, при которой бифуркация (дуплетное расщепление) пропадает и волны ПКП и ЛКП обладают одинаковыми дисперсионными характеристиками. Было показано, что для этого достаточно, чтобы у киральных слоев были одинаковые толщины и магнитные проницаемости.

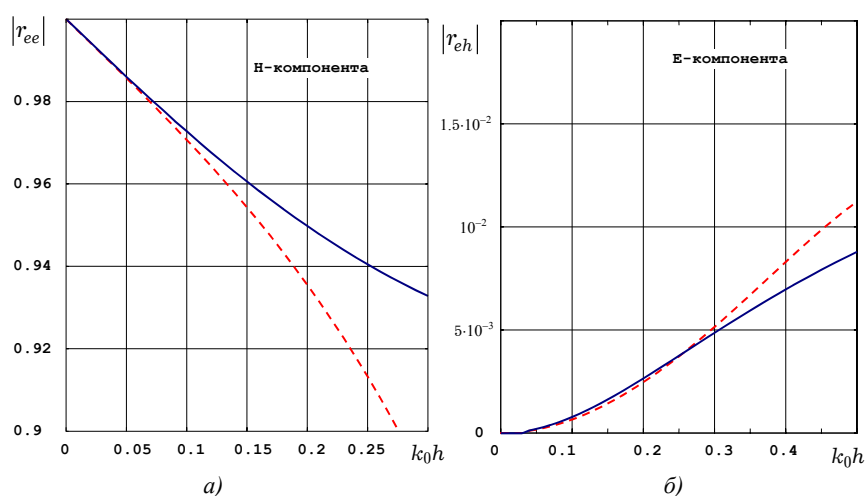


Рис. 8. Зависимости модулей коэффициентов отражения основной и кросс-поляризованной компонент от нормированной толщины при падении волны Н-поляризации

В п.4.6 ДПГУ были использованы для решения задачи о прохождении ПЭМВ линейной поляризации через тонкий киральный слой, расположенный в вакууме. Были получены явные выражения для элементов приближенной матрицы передачи $\overline{\overline{S}}$ тонкого кирального слоя в случае Е- и Н-поляризованных волн.

Использование матрицы передачи \overline{S} целесообразно при решении задач об отражении ПЭВМ от многослойных киральных структур.

В п.4.7 и 4.8 были решены задачи об отражении ПЭМВ от трехслойной структуры «киральные слой-диэлектрический слой-киральные слой» (КС-ДС-КС) и от аналогичной структуры, расположенной на идеально-проводящей плоскости. При анализе численных результатов зависимостей модулей коэффициентов отражения от указанных структур было обнаружено явление *полной кросс-поляризации*, когда при падении волны с параллельной поляризацией от структуры отражалась волна с перпендикулярной поляризацией. Это явление наблюдалось при различных углах падения волны на разных частотах.

Полная кросс-поляризация может использоваться при создании и разработке селективных преобразователей поляризации СВЧ. Такое устройство может состоять из трехслойной пластины КС-ДС-КС (например, подложка из диэлектрика с обеих сторон металлизирована периодически расположенными киральными элементами), которая может быть поворачивается на различные углы относительно направления падения волны. В зависимости от частоты падающей волны пластина поворачивается на определенный угол и обратно отражается волна с ортогональной поляризацией.

Кроме того, были подобраны параметры структуры КС-ДС-КС, при которых от нее отражается около 2% падающего излучения. Однако это имеет место только вблизи резонансных частот и при значениях угла падения, близких к углу полной кросс-поляризации. Можно сделать вывод о том, что использование многослойных отражающих киральных структур вблизи резонансных частот позволяет значительно уменьшить величину коэффициента отражения по сравнению с однослойными. Резонансные частоты отражающей структуры определяются расстоянием между элементами, их размерами и параметрами диэлектрического слоя.

В п.4.9 получены двухсторонние приближенные граничные условия для тонкого цилиндрического кирального слоя, которые учитывают явление кросс-поляризации. В п.4.10 показан вывод односторонних приближенных граничных условий импедансного типа для тонкого цилиндрического кирального слоя, конформно расположенного вокруг идеально проводящего круглого стержня. ОПГУ связывают тангенциальные составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} электромагнитного поля в области вокруг кирального цилиндрического слоя через его физические и геометрические параметры и учитывают явление кросс-поляризации. В случае неограниченно протяженного вдоль продольной оси кирального цилиндра ОПГУ записываются в виде:

$$\begin{aligned}
E_\varphi^{(1)} &= i\mu \frac{k_0(R_2^2 - R_1^2)}{2R_2} \left[H_z^{(1)} - \frac{2}{k_0^2 n_c^2 (R_2 + R_1)} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 H_z^{(1)}}{\partial \varphi^2} \right] - \\
&- \chi \frac{(R_2 - R_1)}{k_0 R_2 n_c^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 E_z^{(1)}}{\partial \varphi^2}; \\
E_z^{(1)} &= i\mu \frac{k_0}{2R_1} (R_2^2 - R_1^2) H_\varphi^{(1)} - \chi \frac{k_0(R_2 - R_1)}{2} E_\varphi^{(1)}.
\end{aligned} \tag{10}$$

где $n_c^2 = k_0(\varepsilon\mu - \chi^2)$; ОПГУ (10) получены в первом приближении по малому параметру $k_0(R_2 - R_1)$ ($R_{1,2}$ — внутренний и внешний радиусы кирального цилиндрического слоя).

В п.4.11 с использованием ОПГУ для тонкого цилиндрического кирального слоя, конформно расположенного вокруг идеально проводящего круглого стержня решена задача дифракции ПЭМВ Е- и Н-поляризации на кирально-металлическом цилиндре. Показано, что предложенные в работе ОПГУ справедливы для тонких цилиндрических киральных слоев, нормированная толщина которых $k_0(R_2 - R_1) < 0.2$.

Несложно заметить, что ОПГУ для круглого идеально-проводящего стержня в тонкой цилиндрической киральной оболочке (10) и ОПГУ для плоского тонкого кирального слоя, расположенного на идеально проводящей плоскости (9), совпадают по форме.

Рассмотренный алгоритм вывода ПГУ позволяет получить аналогичные приближенные условия для киральных тел сферической, эллипсоидальной и других форм.

В главе 5 «Электромагнитные волны в неоднородных киральных средах» последовательно излагается теория распространения электромагнитных волн в среде с изменяющимся параметром киральности.

В п.5.1 решена задача о распространении волн в периодически неоднородной структуре из чередующихся киральных и диэлектрических слоев. Толщины кирального и диэлектрических слоёв равны, соответственно, l_1 и l_2 . Киральные слои описываются параметром киральности χ_1 . При условии $|\chi_1| \ll n_1 = \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}$ (ε_1, μ_1 и χ_1 — материальные параметры киральных слоёв) относительно напряженностей электрических полей ПКП и ЛКП-волн получены уравнения Хилла:

$$\frac{d^2 E_{R,L}}{dz^2} + k_1^2 (1 \pm \alpha_1 \chi_1) E_{R,L} = 0, \tag{11}$$

где $\alpha_1 = 2/n_1 \ll 1$ — малый параметр; $k_1 = k_0 \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}$.

Для вывода дисперсионных уравнений волн ПКП и ЛКП необходимо решить уравнения (11), воспользоваться теоремой Флоке и условиями на границах раздела между соседними киральным и диэлектрическим слоями. Отметим, что используемый алгоритм может быть применен и при исследовании распространения волн в периодически неоднородной структуре из чередующихся киральных слоев с различными χ .

На рис. 9 приведены результаты численных расчётов зависимостей нормированных постоянных распространения волн ПКП и ЛКП γd от параметра $k_0 l_1$ ($d = l_1 + l_2$). Как видно из рисунка, существуют частотные диапазоны, в которых возможно распространение либо волны ПКП, либо волны ЛКП. Можно утверждать, что рассматриваемая структура проявляет поляризационно-избирательные свойства и может выполнять функции частотно-поляризационного фильтра.

В п.5.2 и 5.3 рассмотрено решение задач о распространении электромагнитных волн в полубесконечной киральной среде и киральной слое, параметры киральности которых зависят от координаты z по закону:

$$\chi(z) = \chi_0 \cos(2\delta z), \quad (12)$$

где $\chi_0 = \chi(0)$; $\delta = \pi/\Omega \ll 1$; Ω — период пространственной неоднородности.

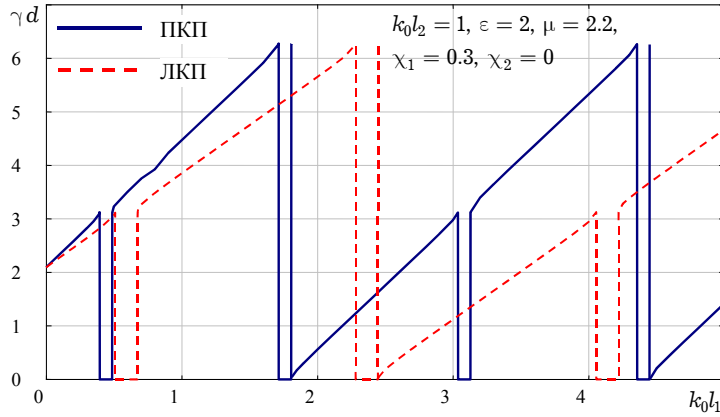


Рис. 9. Дисперсионные характеристики волн ПКП и ЛКП в периодически неоднородной кирально-диэлектрической структуре

При решении этих задач относительно напряженностей электрических полей ПКП и ЛКП-волн получены уравнения Матье:

$$\frac{d^2 E_{R,L}}{dz^2} + k^2 [1 \pm \alpha \cos(2\delta z)] E_{R,L} = 0, \quad (13)$$

где $\alpha = 2\chi_0/n \ll 1$; $k = k_0 \sqrt{\epsilon\mu}$; ϵ, μ — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; которые затем были решены методом медленно-

меняющихся амплитуд. Было показано, что в указанных структурах возникают прямые и обратные (отраженные от киральных неоднородностей) волны ПКП и ЛКП, для которых были получены дисперсионные уравнения. В периодически неоднородной киральной среде с (12) собственные волны ПКП и ЛКП обладают частотой отсечки: $\omega^* = 2c\Delta/\chi_0$ (c — скорость света). На частотах, ниже критической, волны ПКП и ЛКП являются затухающими.

В п.5.4 предложена модель неоднородной киральной среды с параметром киральности, зависящим от продольной координаты по закону:

$$\chi(z) = \pm \chi_0 |\cos(2\delta z)|, \quad (14)$$

где $\chi_0 = \chi(0)$; $\delta = \pi/\Omega \ll 1$; Ω — период пространственной неоднородности; верхние и нижние знаки соответствуют киральной среде на основе правых и левых форм киральных элементов, соответственно.

Заметим, что неоднородная модель (14) предполагает, что киральность максимальна на зеркально асимметричных элементах и минимальна между двумя соседними микрочастицами.

В основу электродинамической теории неоднородной киральной среды могут быть положены дифференциальные уравнения 2-го порядка относительно полей Бельтрами:

$$\frac{d^2 E_{R,L}}{dz^2} - \frac{k_0}{k_{L,R}} \frac{d\chi}{dz} \frac{dE_{R,L}}{dz} + k_{R,L}^2 E_{R,L} = 0, \quad (15)$$

где $k_{R,L} = k_0 (n \pm \chi)$.

В диссертационной работе было проведено сравнение распределений полей $E_{R,L}$ вдоль координаты z в однородной и неоднородной киральных средах. Показано, что распределения полей волн ПКП и ЛКП вдоль продольной координаты в однородной и неоднородной средах начинают значительно отличаться только на расстояниях порядка 8 периодов неоднородности. Для достаточно протяженных киральных сред учет второго слагаемого в (12) становится необходимым.

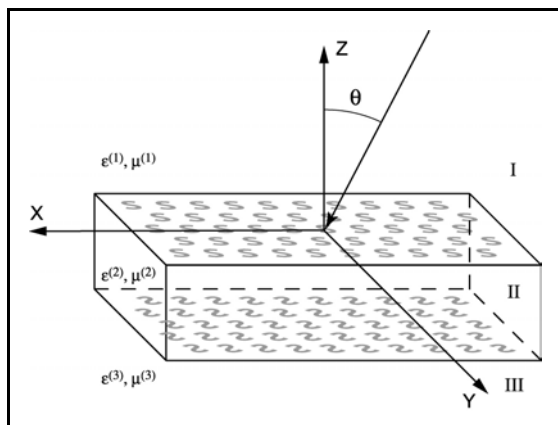


Рис. 10. Селективное экранирующее покрытие для защиты от ЭМИ

П.5.5 посвящен практическому применению киральных сред в СВЧ-технике. Рассматривается применение киральной среды в качестве селективного экранирующего покрытия для защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ). Возможной областью применения этого покрытия может быть защита человека от электромагнитного излучения сотовых телефонов и других устройств общего и специального назначения. Заметим, что предлагаемое покрытие является экранирующим только для определенного диапазона частот (который определяется размерами элементов и расстоянием между ними), ЭМИ других диапазонов оно пропускает. В качестве экранирующего покрытия предлагается использовать киральную среду на основе S-образных полосковых элементов, которые наносятся на противоположные стороны диэлектрического слоя. Причем, элементы, размещенные на верхней и нижней поверхностях слоя повернуты друг относительно друга на некоторый угол (рис. 10). Расстояние между S-образными элементами должно соотноситься с длиной волны падающего ЭМИ. Металлизация поверхностей диэлектрика в виде «решеток» из проводящих зеркально асимметричных элементов может быть выполнена при помощи метода литографии.

На резонансной частоте при падении ПЭМВ произвольной поляризации на «решетку» из полосковых киральных элементов, расположенную на верхней поверхности слоя, во внешнюю область I отразится волна либо перпендикулярной, либо параллельной поляризации (это зависит от угла поворота киральных элементов), в диэлектрический слой пройдет волна ортогональной поляризации. «Решетка» из киральных элементов, расположенная на нижней поверхности диэлектрического слоя, повернута относительно верхней «решетки» на такой угол, чтобы коэффициент отражения для ПЭМВ с поляризацией как у прошедшей волны был близок к единице. В этом случае в область III ЭМИ проходить не будет.

Предложенное в работе селективное экранирующее покрытие для защиты от ЭМИ подтверждено патентом.

Глава 6 «Сингулярные интегральные уравнения в теории полосково-щелевых линий передачи с киральными слоями» посвящена обобщению метода частичного обращения сингулярного оператора на основе теории СИУ, развитого в работах В.А. Неганова, на случай волноведущих структур с киральными слоями. В качестве примера рассмотрена экранированная секториально-щелевая линия передачи с киральным и диэлектрическим слоем, поперечное сечение которой показано на рис. 11.

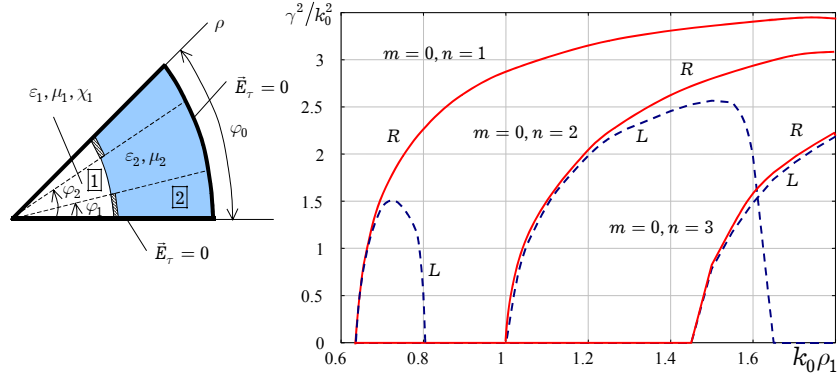


Рис. 11. Поперечное сечение экранированной секториально-щелевой линии передачи с киральным слоем и дисперсионные характеристики её собственных волн

Задача сводится к решению интегрального уравнения первого рода

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \vec{G}(\varphi, \varphi') \vec{E}_r(\varphi') d\varphi' = 0, \quad \varphi \in [\varphi_1, \varphi_2] \quad (16)$$

относительно тангенциального электрического поля \vec{E}_r в щели линии передачи. Здесь элементы функции Грина имеют следующий вид:

$$G_{ij}(\varphi, \varphi') = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{Y_{m,ij}}{1 + \delta_{m0}} \Phi_{m,i}(\varphi) \Phi_{m,j}(\varphi'), \quad (17)$$

где $\Phi_{m,1} = \sin(\beta_m \varphi)$; $\Phi_{m,2} = \cos(\beta_m \varphi)$; δ_{m0} — символ Кронекера Алгоритм определения элементов тензора адмитансов \vec{Y} , обобщенный на случай киральной среды приведен в п.6.1 диссертационной работы. Элементы $Y_{m,ij}$ при $m \rightarrow \infty$ имеют следующие асимптотики:

$$\begin{aligned} t_1 &= \lim_{m \rightarrow \infty} m^{-1} Y_{m,11}(\rho_1), \\ t_2 &= \lim_{m \rightarrow \infty} Y_{m,12}(\rho_1) = \lim_{m \rightarrow \infty} Y_{m,21}(\rho_1), \\ t_3 &= \lim_{m \rightarrow \infty} m Y_{m,22}(\rho_1). \end{aligned} \quad (18)$$

Аналитические выражения для t_j ($j = \overline{1,3}$) приведены в п.6.2.

При ограничении суммирования в рядах (17) соотношение (16) переходит к интегральному уравнению Фредгольма 1-го рода, решение которого является некорректной математической задачей.

При помощи частичного обращения оператора переходим от (16) к СИУ, нахождение решений которого корректно. После выделения особенностей и устранения расходимости в ядре интегрального оператора задача сводится к решению сингулярного интегрального уравнения типа:

$$\int_{-1}^1 \frac{\bar{\mathcal{P}}(v)}{v-u} dv + s \int_{-1}^1 \bar{T}(v,u) \bar{\mathcal{P}}(v) dv = 0, \quad (19)$$

где $\bar{\mathcal{P}}(v) = \left\{ \beta_1^{-1} E_z'(\varphi') \frac{d\varphi'}{dv}, E_\varphi(\varphi') \frac{d\varphi'}{dv} \right\}$; $\beta_1 = \pi/\varphi_0$; явный вид \bar{T} приведен в п. 6.2.

В диссертационной работе получены дисперсионные уравнения в нулевом, первом и втором приближениях для собственных волн экранированной секториальной щелевой линии передачи с киральным и диэлектрическим слоями. В нулевом приближении для симметричной щели уравнение имеет следующий вид:

$$Y_{0,22} - t_3 \ln|s| = 0, \quad (20)$$

где $s = \sin[\beta_1(\varphi_1 + \varphi_2)/2] \sin[\beta_1(\varphi_2 - \varphi_1)/2]$; φ_1 и φ_2 — углы разворота щели.

На рис. 11 приведены зависимости квадратов нормированных постоянных распространения собственных волн $(\gamma/k_0)^2$ от нормированного на радиус кирального слоя волнового числа $k_0\rho_1$. При численных расчетах параметры линии передачи были выбраны следующими: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 6.5$; $\mu_1 = \mu_2 = 2.2$; $\chi_2 = 0.3$; $k_0\rho_2 = 2$. Геометрические параметры секториальной линии передачи: $\varphi_0 = \pi/2$; $\varphi_1 = \pi/3$; $\varphi_2 = \pi/6$. Киральный слой содержит правые формы зеркально асимметричных элементов.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 11, характер поведения дисперсионных зависимостей собственных волн секториально-щелевого кироволновода сильно отличается от аналогичных характеристик волн плоских киральных волноводов. Показано, что собственные волны обладают право- и левоэллиптическими поляризациями: $E_{R,L\varphi}^{(q)} / E_{R,L\rho}^{(q)} = a_{R,L} \pm ib_{R,L}$ (q — номер дуплета; $a_{R,L}$ и $b_{R,L}$ — вещественные коэффициенты, зависящие от параметров слоев). Видно, что также существует бифуркация, но имеются частоты, на которых перестают распространяться ЛЭП волны. На дисперсионных характеристиках волн ЛЭП можно выделить два участка. На первом, от частоты отсечки до частоты, соответствующей минимуму фазовой скорости волны,

дисперсия является нормальной; на втором — аномальной. Вблизи частоты, на которой прекращается распространение волны ЛЭП: $E_{L\phi}^{(q)}/E_{L\rho}^{(q)} \rightarrow a_L$, т.е. поляризация поля стремится к линейной, а такие волны в кироволноводе распространяться не могут.

Если киральный слой создан на основе левых форм микроэлементов, указанным свойством обладает волна ПЭП.

Таким образом, для каждого дуплета существует некоторый интервал частот, в котором волна ПЭП обладает нормальной дисперсией; волна ЛЭП — аномальной. Одной из возможной причин появления таких свойств является отсутствие частотной зависимости параметров кирального слоя.

В заключении перечислены основные результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Электродинамический анализ отражающих и волноведущих структур с киральными слоями позволил сделать вывод о необходимости использования материальных уравнений, учитывающих изменение диэлектрической проницаемости в киральной среде при $\chi > 0.3$.

2. Построены математические модели плоских металлизированных двухслойных кирально-диэлектрического и кирально-ферритового волноводов, основанные на адекватных материальных уравнениях.

3. Предложена приближенная электромагнитная теория тонких киральных слоев с плоскими и цилиндрическими поверхностями, основанная на приближенных одно- и двухсторонних граничных условиях, учитывающих кросс-поляризацию поля.

4. Построены приближенные математические модели многослойных отражающих плоских киральных структур, основанные на приближенных граничных условиях для тонких киральных слоев. Получены приближенные выражения для матриц передачи плоского тонкого кирального слоя при падении E и H-поляризованных волн.

5. Предложено частотно-селективное экранирующее покрытие для защиты от электромагнитного излучения на основе двухсторонне-металлизированного полосковыми киральными элементами диэлектрического слоя.

6. Построена теория распространения электромагнитных волн в периодически неоднородных киральных средах. Показано, что структура на основе периодически чередующихся киральных и диэлектрических слоев может выполнять роль частотно-селективного поляризационного фильтра волн ПКП и ЛКП.

7. Проведено обобщение на случай киральной среды метода частичного обращения сингулярного оператора в задачах о распространении электромагнитных волн в экранированных полосково-щелевых линиях передачи. По-

строена математическая модель экранированной секториально-щелевой линии передачи с киральным и диэлектрическим слоями.

8. Показана возможность создания малоотражающих поверхностей на основе многослойных киральных покрытий.

9. Выявлен ряд физических закономерностей:

✧ эффект полной кросс-поляризации при отражении линейно-поляризованной волны от плоских многослойных кирально-диэлектрических структур;

✧ явление возникновения непересекающихся «окон непрозрачности» волн ПКП и ЛКП в периодически неоднородной структуре из киральных и диэлектрических слоев;

✧ явление существования участков нормальной и аномальной дисперсии у волн ПЭП и ЛЭП в экранированной секториально-щелевой кирально-диэлектрической линии передачи.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

По тематике диссертационной работы опубликовано 76 работ, в том числе:

1. *Неганов В.А., Осипов О.В.* Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами — М.: Радио и связь, 2006. — 280с.

2. *Неганов В.А., Осипов О.В., Сидорова М.А., Яровой Г.П.* Отражение плоской электромагнитной волны от киральной полуплоскости // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 1998. — Т.1. — №1. — С.10-14.

3. *Неганов В.А., Осипов О.В.* Отражение электромагнитных волн от металла, покрытого киральным слоем // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 1998. — Т.1. — №2-3. — С.13-17.

4. *Неганов В.А., Осипов О.В.* Особенности отражения электромагнитных волн от плоских киральных структур // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 1999. — Т.2. — №1. — С.5-11.

5. *Неганов В.А., Осипов О.В.* Отражение электромагнитных волн от плоских киральных структур // Изв. ВУЗов Радиофизика, 1999. — Т.42. — №9. — С.870-878.

Перевод: *Neganov V.A., Osipov O.V.* Scattering of electromagnetic waves from planar chiral structures // Radiophysics and Quantum Electronics, 1999. — V.42. — №9. — P.764-773.

6. *Неганов В.А., Осипов О.В.* Рассеяние плоских электромагнитных волн на кирально-металлическом цилиндре // Письма в ЖТФ, 2000. — Т.26. — Вып.1. — С.77-83.

7. *Неганов В.А., Осипов О.В.* Собственные волны плоского двухслойного кирально-диэлектрического волновода // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2000. — Т.3. — №2. — С.8-14.

8. *Неганов В.А., Осипов О.В.* Собственные волны плоского двухслойного кирально-ферритового волновода // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2000. — Т.3. — №3-4. — С.21-26.

9. Неганов В.А., Осипов О.В. Собственные волны плоского двухслойного кирально-ферритового волновода // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2001. — Т.44. — №8. — С.632-636.

Перевод: *Neganov V.A., Osipov O.V. Eigen waves of a planar two layer chiral-ferrite waveguide // Radiophysics and Quantum Electronics, 2001. — V.44. — №8. — P.764-773.*

10. Долбичкин А.А., Неганов В.А., Осипов О.В. Дисперсия собственных волн экранированной секториальной щелевой линии передачи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2001. — Т.4. — №3. — С.23-28.

11. Неганов В.А., Осипов О.В. Собственные волны плоского двухслойного кирально-диэлектрического волновода // Радиотехника, 2003. — №5. — С.21-25.

12. Неганов В.А., Осипов О.В. Собственные волны экранированной секториально-щелевой линии передачи // Радиотехника и электроника, 2003. — Т.48. — №5. — С.942-947.

13. Долбичкин А.А., Неганов В.А., Осипов О.В. Приближенный подход к описанию свойств тонких киральных слоев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2003. — Т.6. — №3. — С.14-19.

14. Пат. №2003109213/09 (009761). Селективное экранирующее покрытие для защиты от электромагнитного излучения / Долбичкин А.А., Неганов В.А., Осипов О.В. Приоритет от 01.04.2003.

15. Долбичкин А.А., Неганов В.А., Осипов О.В. Приближенный метод решения задачи дифракции плоской электромагнитной волны на тонком киральном слое, расположенном на идеально-проводящей плоскости // Журнал технической физики, 2005. — Т.75 — Вып. 1. — С.127-130.

16. Неганов В.А., Осипов О.В. Приближенные граничные условия для тонкого кирального слоя, расположенного на идеально-проводящей плоскости // Радиотехника и электроника, 2005. — Т.50. — №3. — С.292-297.

Перевод: *Neganov V.A., Osipov O.V. Approximate boundary conditions for a thin chiral layer located on a perfectly conducting plane // Journal of communications technology and electronics, 2005. — V.30. — №3. — P.270-275.*

17. Неганов В.А., Осипов О.В. Современное состояние электродинамики искусственных киральных сред (обзор) // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2005. — Т.8. — №1. — С.7-33.

18. Неганов В.А., Осипов О.В. Электродинамика отражающих и волноведущих структур с искусственными киральными слоями // Успехи современной радиоэлектроники, 2005. — №8. — С.20-45.

19. Осипов О.В. Распространение плоской электромагнитной волны в периодически неоднородной системе из киральных и магнитодиэлектрических слоев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2006. — Т.9. — №4. — С.61-65.

20. Осипов О.В. Излучение элементарного электрического диполя в киральной среде // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2006. — Т.9. — №4. — С.66-71.

21. Осипов О.В. Отражающие и волноведущие структуры с киральными элементами // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2006. — Т.9. — №3. — С.74-81.

22. Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б., Яровой Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн. / Учеб. пособие для вузов. Под ред. Неганова В.А. и Раевского С.Б. — М.: Радио и связь, 2005. — 648 с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Л1. Федоров Ф.И. Теория гиротропии. — Минск: Наука и техника, 1976. — 254 с.
- Л2. Lindell I.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A., Viitanen A.J. Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media. London: Artech House, 1994. — 291 p.
- Л3. Каценеленбаум Б.З., Кориунова Е.Н., Сивов А.Н., Шатров А.Д. Киральные электродинамические объекты // Успехи физических наук, 1997. — Т.167. — №11. — С.1201-1212.
- Л4. Шевченко В.В., Костин М.В. К теории киральной среды на основе сферических спирально проводящих частиц // Радиотехника и электроника. — 1998. — Т.43. — №8. — С.921-926.
- Л5. Sochava A.A., Simovski C.R., Tretyakov S.A. Chiral effects and eigenwaves in bi-anisotropic omega structures // In Advances in Complex Electromagnetic Materials (ed. by A. Priou, A. Sihvola, S. Tretyakov, A. Vinogradov), Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers. — 1997. — V.28. — P.85-102.
- Л6. Просвирнин С.Л. Преобразование поляризации при отражении волн микрополосковой решеткой из элементов сложной формы // Радиотехника и электроника, 1999. — Т.44. — №6. — С.681-686.
- Л7. Varadan V.K., Varadan V.V., Lakhtakia A. Propagation in parallel-plate waveguide wholly filled with a chiral medium // Journal Wave-Material Interaction, 1988. — V.3. — №3. — P.267-272.
- Л8. Третьяков С.А. Приближенные граничные условия для тонкого биизотропного слоя // Радиотехника и электроника, 1994. — Т.39. — №2. — С.184-192.
- Л9. Lakhtakia A., Varadan V.K., Varadan V.V. Time-harmonic electromagnetic fields in chiral media. Lecture Notes in Physics. Berlin: Heidelberg and Boston: Springer-Verlag, 1989. — 121 p.
- Л10. Cory H., Waxman S. Wave propagation along a fully or a partially loaded parallel plate chirowaveguide // IEE Proc.-Microw. Antennas Propag., 1994. — V.141. — №4. — P.299-306.
- Л11. Stepanyan G.Y., Gurevich A.V., Maksimenko S.A. Floquet-Bloch waves in periodic chiral media // Phys. Rev. E., 1995. — V.51. — №3. — Part B. — P. 2543-2549.
- Л12. Кравченко В.Ф. Электродинамика сверхпроводящих структур. М.: Физматлит, 2006. — 280 с.