

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
“ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б. И. СТЕПАНОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ”

УДК 535.87; 530.1:51-73

Галынский Владимир Михайлович

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ  
ВОЛНЫ В СЛОЖНЫХ БИАНИЗОТРОПНЫХ  
СТРУКТУРАХ**

01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Минск, 2006

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
Фурс Александр Николаевич, доцент  
кафедры теоретической физики  
Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Максименко С. А.  
НИИ ядерных проблем БГУ

доктор физико-математических наук  
Филлипов В. В.  
ИФ АН Беларуси

Оппонирующая организация: Белорусский национальный технический  
университет, г. Минск.

Защита диссертации состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2006 г. в \_\_\_ часов на  
заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики  
им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (220072, г. Минск, пр. Независимости,  
68, тел. (017) 284-04-41).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им.  
Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2006 года.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
кандидат физ.-мат. наук

Ю.П. Выблый

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Прогресс в современной оптике, лазерной физике, квантовой электронике в значительной мере связан с использованием сложных анизотропных, нелинейных, пространственно неоднородных структур. Одной из важных теоретических задач является разработка математических методов исследования таких структур. Одним из перспективных направлений является применение и развитие ковариантного метода Ф.И. Федорова, эффективность которого в области электродинамики сплошных сред, теоретической оптики и акустики неоднократно демонстрировалась его учениками и последователями. Важно подчеркнуть, что операторный ковариантный подход, позволяющий работать на всех этапах вычислений с полными векторами поля без их разложения на парциальные волны, применим не только для описания объемных однородных волн, но и неоднородных волн, возникающих вблизи границ раздела сложных анизотропных материалов.

Последнее десятилетие можно охарактеризовать появлением во многих областях физики интереса к исследованию свойств мезоскопических систем — искусственно созданных структурированных материалов, мета-материалов с характерными размерами структурных элементов от единиц до сотен нанометров, а также развитием нанотехнологий, с помощью которых исследуются и применяются на практике свойства наноразмерных объектов. Специфика таких систем с точки зрения их взаимодействия с электромагнитным излучением заключается в совпадении по порядку величины размера элементов системы и длины волны взаимодействующего с ней излучения. Это приводит к появлению уникальных оптических свойств у подобных систем, открытию новых эффектов, не наблюдаемых ранее в обычных средах, которые можно использовать для создания новых оптоэлектронных устройств, оптимизации характеристик и уменьшения размеров уже существующих. При теоретическом описании физических явлений, происходящих в новых материалах, необходимо учитывать не только распространение объемных электромагнитных волн, но и поверхностных мод, так как характер последних в таких материалах может значительно отличаться от характера поверхностных волн в изотропных материалах.

Уменьшение размеров оптических устройств осложнено двумя трудностями. Во-первых, дифракционный предел не позволяет создавать оптические устройства по размеру меньше, чем половина длины волны. Во-вторых, создаваемые системы, в том числе и на основе фотонных кристаллов, обычно одномерны или двумерны, а создание трехмерных систем сопряжено с технологическими трудностями. Альтернативный подход к уменьшению размеров оптических элементов и созданию интегральных планарных устройств

в обход указанных выше проблем заключается в переходе к оптике поверхностных поляритонов. На сегодняшний день разработаны и представлены экспериментальные прототипы таких двумерных оптических элементов, как зеркала, линзы, резонаторы, волноводы, фотонные кристаллы. Из-за того, что уменьшение размеров оптических элементов для оптики поверхностных поляритонов не ограничено дифракционным пределом, становится возможной реализация наноразмерных фотонных устройств. Практически все эти устройства сконструированы на поверхностях изотропных сред и металлов. Однако использование металлов приводит к сильному поглощению энергии поверхностных волн. В связи с этим перспективным выглядит использование анизотропных прозрачных сред при разработке двумерных оптических устройств на поверхностных поляритонах. Поверхностные поляритоны на границах раздела анизотропных магнитных, гиротропных и бианизотропных сред пока еще мало изучены. Дисперсионные соотношения для таких сред громоздки и плохо поддаются анализу. Поэтому исследование поверхностных электромагнитных волн на границах разделов бианизотропных сред и развитие новых ковариантных методов их исследования, несомненно, является перспективным направлением развития современной оптики.

Так как поверхностные электромагнитные волны локализованы вблизи границ раздела сред в слое, размеры которого, как правило, порядка длины волны, то их характеристики и закономерности поведения содержат богатую информацию о свойствах приповерхностных областей.

Поэтому исследование поверхностных электромагнитных волн на границах разделов бианизотропных сред и развитие новых ковариантных методов их исследования, несомненно, является актуальным направлением теоретических исследований, ориентированных на нужды современной оптики с учетом тенденций развития ее элементной базы.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Диссертационная работа выполнялась в рамках темы Ф04М-140 “Метод эволюционных операторов в теории объемных и поверхностных волн в регулярных волноведущих структурах” Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является теоретическое исследование поверхностных электромагнитных волн на плоских границах бианизотропных сред и в многослойных структурах. Для этого потребовалось решить следующие задачи:

1. Обобщить метод описания поверхностных электромагнитных волн, основанный на интегральном представлении тензоров поверхностных импедансов, на случай непоглощающих магнитных и бианизотропных сред.

2. Найти тензоры поверхностных импедансов, получить и исследовать дисперсионные уравнения для поверхностных поляритонов на границах раздела следующих сред: изотропных веществ и бианизотропных сред классов симметрии  $3m$ ,  $4mm$  и  $6mm$ ; изотропных сред с отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями и оптически одноосных кристаллов; немагнитных оптически одноосных кристаллов со скрещенными оптическими осями в плоскости границы.
3. Исследовать условия существования поверхностных поляритонов в трехслойных структурах, образованных из двух оптически одноосных кристаллов, разделенных тонким изотропным слоем. Изучить влияние толщины промежуточного слоя на угловые ширины и положения секторов разрешенных направлений распространения поверхностных электромагнитных волн.
4. Оценить длину пробега поверхностных поляритонов на границах раздела поглощающих анизотропных сред. Определить характер зависимости угловых ширин и положения секторов разрешенных направлений распространения поверхностных электромагнитных волн от величины поглощения в пограничных анизотропных средах.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются поверхностные электромагнитные волны на границах раздела бианизотропных и магнитных сред в многослойных структурах. Предметом исследования являются условия существования поверхностных электромагнитных волн на границах бианизотропных сред и поляризационные характеристики этих волн, обусловленные материальными параметрами пограничных структур.

**Методология и методы проведенного исследования.** Для исследования поверхностных электромагнитных волн на границах бианизотропных сред использовались ковариантные методы, разработанные Ф.И. Федоровым и его учениками. Для численных и некоторых аналитических расчетов применялись специально разработанные программы в системе компьютерной алгебры “Mathematica”. Для численного анализа дисперсионных уравнений использовался модифицированный метод дихотомии.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем. Обобщен интегральный формализм для описания распространения поверхностных электромагнитных волн вдоль границ раздела бианизотропных (гиротропных) кристаллов. Он позволяет рассчитывать все основные характеристики поверхностных электромагнитных волн и дополняет другие известные подходы. Впервые исследованы поверхностные электромагнитные волны на границах раздела бианизотропных сред, а также сред с одновременно отрицательной

диэлектрической и магнитной проницаемостью и одноосных кристаллов. Получены условия существования поверхностных волн. Проанализировано влияние поглощения в граничащих средах на условия существования поверхностных электромагнитных волн в анизотропных средах.

Научная значимость полученных результатов состоит в расширении представлений о поверхностных электромагнитных волнах и их свойствах на границах магнитных и бианизотропных сред.

**Практическая (экономическая, социальная) значимость полученных результатов.** Практическая значимость работы состоит в том, что предложенный в ней ковариантный метод расчета характеристик поверхностных поляритонов, основанный на интегральном представлении тензоров поверхностных импедансов, применим для произвольных срезов линейных бианизотропных сред любых классов симметрии, что в принципе открывает возможности для разработки сложных микро- и наноразмерных интегральных устройств, например, переключателей, модуляторов и других устройств оптики поверхностных поляритонов, а также для создания различных усовершенствованных биосенсоров, действие которых основано на нарушенном полном отражении.

Теоретико-аналитические результаты диссертационной работы могут быть использованы для вывода тензоров поверхностных импедансов на границах раздела бианизотропных материалов и эффективного расчета зависимости волновых векторов поверхностных поляритонов от частоты при различных конфигурациях двух граничащих бианизотропных (гиротропных) сред.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Метод расчета волновых, поляризационных и энергетических характеристик поверхностных поляритонов в линейных непоглощающих бианизотропных средах произвольной кристаллографической симметрии, основанный на интегральном представлении тензоров поверхностных импедансов.
2. Точные формулы для нахождения угловых ширин и положений секторов разрешенных направлений распространения поверхностных поляритонов в плоскостях раздела немагнитных оптически одноосных кристаллов со скрещенными оптическими осями.
3. Предсказание существования поверхностных электромагнитных волн, распространяющиеся вдоль одного и того же направления с разными фазовыми скоростями на плоских границах раздела изотропных сред с отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями и анизотропных кристаллов.

**Личный вклад соискателя.** Большинство опубликованных статей [2-4] выполнены совместно с научным руководителем, кандидатом физико-математических наук, доцентом А.Н. Фурсом и доктором физико-математических наук, профессором Л.М. Барковским, а работы [1, 8-10] — совместно с А.Н. Фурсом. А.Н. Фурсу и Л.М. Барковскому принадлежит постановка и формулировка основных задач. Интерпретация полученных результатов и аналитические исследования проводились соискателем совместно с научным руководителем, а численные исследования, постановка, проведение и обработка результатов вычислительных экспериментов, а также разработка программного обеспечения выполнены непосредственно соискателем. В работе [4] постановка задачи принадлежит соискателю. Работы [5-7] выполнены самостоятельно.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

- Десятая республиканская научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов по физике конденсированного состояния “ФКС-Х”, Гродно, 2002.
- Третья международная конференция молодых ученых и специалистов “Оптика-2003”, Санкт-Петербург, 2003.
- Одиннадцатая всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых “ВНКСФ-11”, Екатеринбург, 2005.
- Четвертая международная конференция молодых ученых и специалистов “Оптика-2005”, Санкт-Петербург, 2005.

**Опубликованность результатов.** Список основных работ по теме диссертации включает 10 наименований, в том числе 4 статьи в научных реферируемых изданиях [1-4], 2 статьи в сборниках трудов [5, 6] и 4 тезисов докладов на конференциях [7-10]. Объем опубликованных материалов в совокупности составляет 47 страниц.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает в себя введение, общую характеристику работы, четыре главы, заключение и приложения. Общий объем диссертации составляет 107 страниц, 6 из которых заняты 3 таблицами и 22 иллюстрациями, 11 — списком 139 использованных источников, и 4 — двумя приложениями.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**Глава 1** посвящена обзору литературы и состоянию разработки проблемы на момент начала исследования. Рассмотрены общие закономерности распространения поверхностных электромагнитных волн (поверхностных пларитонов) на границах раздела линейных изотропных сред. Отмечены работы,

в которых исследуются поверхностные поляритоны (ПП) на границах сред с одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей (так называемых “левых” сред).

В главе дан обзор имеющихся в литературе работ Дьяконова М.И., Аверкиева Н.С., Даринского Ф.Н., Альшица В.И., Любимова В.Н., Марчевского Ф.Н., Стрижевского В.Л. и др. по поверхностным поляритонам на границах анизотропных сред (сингулярных или бездисперсионных поверхностных поляритонов), обусловленных только анизотропией пограничных материалов. Перечислены характерные особенности сингулярных поверхностных поляритонов. А именно: существование таких волн возможно при выполнении определенных соотношений для материальных параметров граничащих сред. Распространение поверхностных поляритонов возможно только в определенных направлениях, образующих секторы в плоскости границы, а угловая ширина этих секторов тем больше, чем сильнее анизотропия граничащих сред. Отмечен разрозненный характер результатов исследований поверхностных электромагнитных волн на границах анизотропных сред, обусловленный в первую очередь тем, что в большинстве работ исследованы частные случаи срезов немагнитных и негиротропных кристаллов, и тем, что поверхностные электромагнитные волны на границах магнитных и гиротропных кристаллов и на границах левых сред ранее не исследовались теоретически. Рассмотрены основные методы возбуждения поверхностных электромагнитных волн и применения ПП в различных прикладных задачах.

**Глава 2** посвящена обобщению операторного метода исследования поверхностных электромагнитных волн на границах стратифицированных линейных бианизотропных структур. Ранее такой метод был предложен в работе Furs A.N., Barkovsky L.M. // *Microwave and Opt. Technol. Lett.* 1997, для немагнитных анизотропных сред. Из уравнений Максвелла для монохроматических электромагнитных волн и материальных соотношений для бианизотропных сред

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} + \alpha \mathbf{H}, \quad \mathbf{B} = \beta \mathbf{E} + \mu \mathbf{H}, \quad (1)$$

получены волновые уравнения в форме

$$\frac{dU(z)}{dz} = ikN(z)U(z), \quad U = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_\tau \\ [\mathbf{q}\mathcal{E}] \end{pmatrix}, \quad N = \begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где тензорные элементы блочной  $6 \times 6$ -матрицы  $N$

$$\begin{aligned} N_{11} &= -(\mathbf{q}\mathbf{q})^-(\mathbf{q}\mathbf{b}), & N_{12} &= -(\mathbf{q}\mathbf{q})^-, \\ N_{21} &= -[(\mathbf{b}\mathbf{q})(\mathbf{q}\mathbf{q})^-(\mathbf{q}\mathbf{b}) - (\mathbf{b}\mathbf{b})], & N_{22} &= -(\mathbf{b}\mathbf{q})(\mathbf{q}\mathbf{q})^-, \end{aligned} \quad (3)$$

находятся с помощью билинейных тензорных форм  $(\mathbf{u}\mathbf{v})$ , которые для произвольных векторных аргументов  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{v}$  имеют вид:

$$\begin{aligned} (\mathbf{u}\mathbf{v}) = & I\mathbf{u}^\times \varepsilon^{-1} \mathbf{v}^\times I + \nu I\mathbf{u}^\times \hat{\alpha} I \cdot \mathbf{b}\mathbf{v} - \nu \mathbf{b}\mathbf{u} \cdot I\hat{\beta} \mathbf{v}^\times I + \nu^2 \mathbf{b}\mathbf{u} \cdot \mathbf{b}\mathbf{v} \cdot I\hat{\mu} I - \\ & - \frac{1}{r} (I\mathbf{u}^\times \varepsilon^{-1} \mathbf{a} + \nu I\mathbf{u}^\times \hat{\alpha} \mathbf{q} - \nu \mathbf{b}\mathbf{u} \cdot I\hat{\beta} \mathbf{a} + \nu^2 \mathbf{b}\mathbf{u} \cdot I\hat{\mu} \mathbf{q}) \otimes (\mathbf{a}\varepsilon^{-1} \mathbf{v}^\times I + \\ & + \nu \mathbf{q}\hat{\beta} \mathbf{v}^\times I + \nu \mathbf{a}\hat{\alpha} I \cdot \mathbf{b}\mathbf{v} - \nu^2 \mathbf{q}\hat{\mu} I \cdot \mathbf{b}\mathbf{v}). \end{aligned} \quad (4)$$

где  $I$  — проектор на плоскость границы,  $\nu = \omega/(ck)$  — безразмерная частота волны,  $\mathbf{q}$  — нормаль к границе раздела сред,  $\mathbf{b}$  — единичный вектор, задающий направление распространения поверхностной волны,  $\mathbf{a} = [\mathbf{b}\mathbf{q}]$ ,  $\rho = \nu\hat{\mu} - \hat{\beta}\mathbf{b}^\times$ ,  $\tau = \varepsilon^{-1}\mathbf{b}^\times + \nu\hat{\alpha}$ ,  $\theta = \mathbf{b}^\times \varepsilon^{-1} - \nu\hat{\beta}$ ,  $r = \mathbf{a}\tau\mathbf{q} - \nu\mathbf{q}\rho\mathbf{q}$ ,  $\hat{\alpha} = \varepsilon^{-1}\alpha$ ,  $\hat{\beta} = \beta\varepsilon^{-1}$ ,  $\hat{\mu} = \mu - \beta\varepsilon^{-1}\alpha$ ,  $\mathbf{b}^\times$  — тензор, дуальный вектору  $\mathbf{b}$ ,  $(\mathbf{b}^\times)_{il} = \varepsilon_{ijl} b_j$ .

В разделе 2.2 изложен метод получения дисперсионных уравнений для поверхностных электромагнитных волн, который основан на использовании тензоров поверхностных импедансов. Плоскостные тензоры поверхностных импедансов граничащих сред  $\gamma$  и  $\gamma'$  связывают между собой тангенциальные составляющие электрического и магнитного полей на границе раздела  $[\mathbf{q}\mathbf{E}^0] = \gamma\mathbf{H}_\tau^0$ ,  $[\mathbf{q}\mathbf{E}'^0] = \gamma'\mathbf{H}'_\tau{}^0$ . Дисперсионное уравнение для поверхностных электромагнитных волн находится из граничных условий и имеет вид:

$$(\gamma - \gamma')\mathbf{H}_\tau^0 = 0, \quad \text{или} \quad (\overline{\gamma - \gamma'})_t = 0. \quad (5)$$

Одно из преимуществ данного метода исследования поверхностных электромагнитных волн состоит в том, что тензоры поверхностных импедансов  $\gamma$  и  $\gamma'$  вычисляются независимо друг от друга, а дисперсионное уравнение получается только при подстановке этих тензоров в выражение (5). Найдя  $n$  тензоров поверхностных импедансов для  $n$  бианизотропных сред, которые различаются классами симметрии и/(или) ориентацией среза плоскости границы, сразу получим  $n(n-1)/2$  дисперсионных уравнений для каждой пары сред.

В разделе 2.3 изложен вывод тензоров поверхностных импедансов  $\gamma$  и  $\gamma'$  на основе представления волновых уравнений в виде (2), (3) и свойств тензорной билинейной формы. Найдено, что тензоры  $\gamma$  и  $\gamma'$  имеют вид

$$\gamma = \frac{1}{\nu} Q^- (-iI - S), \quad \gamma' = \frac{1}{\nu} Q'^- (iI - S'), \quad (6)$$

где тензоры  $Q$  и  $S$  имеют следующее интегральное представление

$$Q = -\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (\mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2)^- d\phi, \quad S = -\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (\mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2)^- (\mathbf{e}_2 \mathbf{e}_1) d\phi. \quad (7)$$

В (7) векторы  $\mathbf{e}_1 = \mathbf{b} \cos \phi + \mathbf{q} \sin \phi$ ,  $\mathbf{e}_2 = -\mathbf{b} \sin \phi + \mathbf{q} \cos \phi$ .

В разделе 2.4 из условия положительной определенности плотности энергии магнитного поля получено необходимое условие существования поверхностных электромагнитных волн на границах магнитных анизотропных сред

$$\mathbf{a}(-i\nu\gamma)\mathbf{a} > \mathbf{a}(-i\nu\gamma')\mathbf{a}. \quad (8)$$

Доказана единственность решения дисперсионного уравнения для поверхностных поляритонов на границе анизотропных магнитных сред с положительно определенными тензорами  $\varepsilon$  и  $\mu$ . В разделе 2.5 рассчитаны тензоры поверхностных импедансов для магнитных одноосных кристаллов (два случая ориентации оптической оси) и для бианизотропных материалов, соответствующих классам симметрии кристаллов  $3m$ ,  $4mm$ ,  $6mm$ , для случая, когда оптическая ось перпендикулярна границе раздела.

В главе 3 с помощью разработанного в предыдущих разделах метода исследованы вопросы существования поверхностных электромагнитных волн на границах раздела различных бианизотропных и магнитных сред. Раздел 3.1 посвящен исследованию поверхностных поляритонов на границах раздела изотропных магнитных сред и одноосных магнитных кристаллов с оптической осью, лежащей в плоскости границы и заданной единичным вектором  $\mathbf{c} = \mathbf{b} \cos \alpha - \mathbf{a} \sin \alpha$ . Одноосный кристалл характеризуется материальными тензорами

$$\varepsilon^{-1} = a + (b - a)\mathbf{c} \otimes \mathbf{c}, \quad \mu = m + (n - m)\mathbf{c} \otimes \mathbf{c}, \quad \alpha = \beta = 0. \quad (9)$$

Получено дисперсионное уравнение, из которого впервые найдены формулы для граничных углов, определяющих положения секторов направлений, в которых возможно распространение поверхностных поляритонов. Показано, что предельный переход согласуется со случаем немагнитных сред, который ранее был исследован в работе Дьяконова.

В разделе 3.2 исследуются сингулярные поверхностные поляритоны на границах раздела изотропных немагнитных сред с  $\varepsilon' = a'^{-1}$  и бианизотропных сред, соответствующих классам симметрии кристаллов  $3m$ ,  $4mm$ ,  $6mm$ , для случая, когда оптическая ось перпендикулярна границе раздела

$$\varepsilon^{-1} = a + (b - a)\mathbf{q} \otimes \mathbf{q}, \quad \alpha = \beta = ig\mathbf{q}^\times. \quad (10)$$

Дисперсионное уравнение для этого случая представляется в виде произведения двух отдельных сомножителей, описывающих ТЕ и ТМ моды соответственно

$$\left( \frac{\mu}{a - \mu\nu^2} \left[ \sqrt{a(a - r\nu^2)} - ag\nu \right] + \sqrt{\frac{a'}{a' - \nu^2}} \right) \times \\ \times \left[ \sqrt{a(b - r\nu^2)} - ag\nu + \sqrt{a'(a' - \nu^2)} \right] = 0, \quad (11)$$

где  $r = \mu - ag^2$ ,  $\mu$  — скалярная магнитная проницаемость одноосного кристалла. Показано, что для границы рассматриваемых сред возможно распространение только ТМ поверхностной волны. В плоскости границы раздела рассматриваемых сред нет выделенных направлений, так как оптическая ось бианизотропной среды  $\mathbf{c}$  перпендикулярна этой плоскости. Было получено решение дисперсионного уравнения  $\nu = \omega/(ck)$ :

$$\nu^2 = \frac{(a'^2 - ab)(a' - a\mu) + 2a^2a'^2g + 2ag\sqrt{aa'}\sqrt{ag^2a'^3 - (a'^2 - ab)(a'\mu - b)}}{(a' - a\mu)^2 + 4a^2a'g^2}. \quad (12)$$

Из анализа дисперсионного уравнения (11) и его решения (12) следует, что в зависимости от значений параметров  $a$ ,  $b$ ,  $\mu$ ,  $g$  и  $a'$  поверхностные электромагнитные волны могут распространяться либо в любом направлении при выполнении дополнительных соотношений для материальных параметров, либо не могут распространяться вообще. Так, для существования ПП на границе оптически положительных кристаллов ( $a > b$ ) с заданными параметрами  $a$ ,  $b$ ,  $\mu$  и  $g$  значение  $a'$  должно удовлетворять условиям:

$$\frac{b}{\mu} < a' \leq \frac{b + \sqrt{b[b - 4a^2g^2(\mu - ag^2)]}}{2(\mu - ag^2)}. \quad (13)$$

Для оптически отрицательных кристаллов ( $a < b$ ) для  $a'$  должны выполняться неравенства:

$$\frac{b}{\mu} < a' \leq \frac{a + \sqrt{R_1}}{2(\mu - ag^2)}, \quad (14)$$

где  $R_1 = a^2 - 8a^2g\sqrt{b-a}(\mu - ag^2) + 4a(\mu - ag^2)[ag^2(2a - b) + \mu(b - a)]$ .

Обнаруженная возможность распространения сингулярных ПП в любом направлении нетипична, так как обычно такие поляритоны могут быть возбуждены только в определенных направлениях в плоскости границы.

В разделе 3.3 рассмотрены поверхностные поляритоны на границах кручения одноосных кристаллов — плоских границах раздела, образованных разными срезами одного и того же немагнитного одноосного кристалла с оптическими осями  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{c}'$ , лежащими по обе стороны границы, параллельными ей и образующими между собой угол  $\phi$  ( $0 \leq \phi \leq \pi/2$ , рис. 1). Получено дисперсионное уравнение для сингулярных поверхностных поляритонов на такой границе, впервые найдены точные выражения, определяющие положение границы секторов, в которых возможно существование ПП (см. рис. 2, 3). Для практически важных случаев слабо и сильно анизотропных кристаллов найдены приближенные выражения для границ областей существования.

Рис. 1. Ра-  
оп-  
ти-  
че-  
ских  
осей  
В  
плос-  
ко-  
сти  
раз-

Рис. 2. Расположение оптических осей и секторов существования поверхностных волн  $S_1, S_2, S_3$  и  $S_4$  в плоскости границы.

Рис. 3. Зависимость граничных углов  $\theta_1, \theta_2$  ( $\theta_2 > \theta_1$ ) от параметра анизотропии  $\eta$ : 1, 2 –  $\phi = \pi/4$ ; 3, 4 –  $\phi = \pi/2$ .

В разделе 3.4 исследованы ПП на границе двух одноосных кристал-

Рис. 4. Решения дисперсионного уравнения для ПП на границе двух одноосных кристаллов разделенных тонким изотропным слоем.

лов, разделенных тонким изотропным слоем. Для получения дисперсионного уравнения используется решение волнового уравнения (2), выраженное через характеристическую матрицу (пропагатор) слоя  $\mathbb{P}$ . Численно исследовано изменение угловых ширин и положений секторов направлений, в которых возможно распространение поверхностных поляритонов, от толщины промежуточного слоя (см. рис. 4).

В разделе 3.5 исследовалось влияние наличия поглощения в среде на условия существования поверхностных поляритонов. Рассматривался случай границы немагнитных одноосных кристаллов и изотропных сред. Поглощение в граничащих средах задается через комплексную диэлектрическую проницаемость  $\hat{\epsilon} = \epsilon - i\tau$ , где  $\tau$  – параметр поглощения. Для этого случая было получено дисперсионное уравнение для поверхностных поляритонов. С помощью численного решения дисперсионного уравнения обнаружено, что наличие поглощения изменяет угловую ширину и положения секторов разрешенных направлений распространения поверхностных поляритонов (см. рис. 5). Значения же фазовой скорости  $\nu$  для поглощающих и прозрачных сред отличаются друг от друга незначительно, на величину порядка  $\tau^2$ . Показано, что коэффициент поглощения поверхностной волны пропорционален параметру  $\tau$ .

В четвертой главе исследуются поверхностные поляритоны на границе раздела анизотропного немагнитного одноосного кристалла и изотропной среды с отрицательными скалярными проницаемостями  $\epsilon'^{-1} = a'$  и  $\mu'$  ( $a' < 0$ ,  $\mu' < 0$ ). С помощью тензоров поверхностных импедансов найдено дисперсионное уравнение для случая, когда оптическая ось кристалла параллельна границе раздела

$$F_{LHM}(\nu, \alpha) = 0, \quad (15)$$

Рис. 5. Зависимость угловых ширин секторов разрешенных направлений распространения поверхностных поляритонов в зависимости от параметра поглощения  $\tau$ .

где

$$\begin{aligned}
F_{LHM}(\nu, \alpha) = & \sqrt{ab} \sqrt{\frac{a - \nu^2}{d - \nu^2}} + a' \mu' - \frac{1}{\sqrt{a(d - \nu^2)} + \sqrt{b(a - \nu^2)}} \times \\
& \times \left\{ \left( d \sqrt{\frac{a - \nu^2}{d - \nu^2}} + \sqrt{ab} \right) \sqrt{\frac{a' - \mu' \nu^2}{a'}} |a'| + \right. \\
& \left. + \left[ (a - \nu^2) \sqrt{ab} + (ab - \nu^2 (a + b - d)) \sqrt{\frac{a - \nu^2}{d - \nu^2}} \right] |\mu'| \sqrt{\frac{a'}{a' - \mu' \nu^2}} \right\}, \quad (16)
\end{aligned}$$

$d = a \cos^2 \alpha + b \sin^2 \alpha$ ,  $a$  и  $b$  — собственные значения тензора обратной диэлектрической проницаемости одноосного кристалла  $\varepsilon^{-1} = a + (b - a) \mathbf{c} \otimes \mathbf{c}$ ,  $\alpha$  — угол между направлением распространения поверхностной волны и оптической осью кристалла. Как было выше сказано, во второй главе диссертации доказывалось, что если при заданном направлении распространения  $\mathbf{b}$  решение дисперсионного уравнения для поверхностных поляритонов на границах магнитных анизотропных сред с положительно определенными тензорами проницаемостей существует, то оно единственно. При этом использовался факт положительности плотности энергии магнитного поля

$$W_m = \frac{1}{16\pi} \mathbf{H} \mu \mathbf{H}. \quad (17)$$

Для сред с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями плотность энергии магнитного поля из за дисперсии рассчитывается по формуле  $W = \frac{\partial}{\partial \omega} [\mu(\omega) \omega] |\mathbf{H}|^2$ . Расчет величины  $W_m$  по формуле (17) в этом случае приводит к отрицательным значениям и не имеет физического смысла. Поэтому доказательство единственности решения дисперсионного уравнения с использованием (17) проведенное во второй главе, неприменимо для “левых” сред (когда  $\varepsilon < 0$ ,  $\mu < 0$ ).

При анализе дисперсионного уравнения (15) учитывалась возможность наличия нескольких корней при заданном направлении распространения  $\mathbf{b}$ , отвечающих несовпадающим фазовым скоростям изонормальных волн. Такие волны мы называем изонормальными поверхностными волнами, по аналогии с изонормальными объемными волнами в неограниченных анизотропных кристаллах. Был проведен анализ дисперсионного уравнения (15), исследованы условия существования его решений. В зависимости от соотношений для материальных параметров граничащих сред  $a$ ,  $b$ ,  $a'$  и  $\mu'$  можно выделить 24 различных случая, в 10 из которых возбуждение поверхностных поляритонов невозможно, в 4 случаях возможно во всех направлениях в плоскости раздела, еще в 4 возможно только в определенных секторах в плоскости гра-

ницы, а в оставшихся 6 случаях возможно существование изонормальных поверхностных волн (см. рис. 6).

-27 рад.

Рис. 6. Решения  $\nu = \nu(\alpha)$  дисперсионного уравнения (15) (случай (6)-(ii)):  $a = 0.50$ ,  $b = 0.90$ ,  $a' = -0.66$ ,  $\mu' = -1.20$ . Два решения при одинаковом значении  $\alpha$  соответствуют двум изонормальным поверхностным волнам, распространяющимся в заданном направлении с различной фазовой скоростью.

В разделе 4.3 рассмотрена возможность параметрического управления секторами разрешенных направлений существования поверхностных поляритонов. Для этого исследовано, как изменяются решения дисперсионного уравнения (15) при переходе от границы раздела слабо анизотропного кристалла и “левой” изотропной среды к границе двух изотропных сред. При этом полагалось, что переменным является параметр кристалла  $b$ , в то время как другие материальные параметры остаются фиксированными. Обнаружено, что при небольших (порядка 1%) изменениях параметра  $b$  можно значительно изменить области направлений, в которых разрешено существование поверхностных поляритонов (см рис. 7, 8, для случая  $a = b = 0.5$ ,  $a' = -0.62$ ,  $\mu = -1.22$ ).

Рис. 7. Зависимость безразмерной приведенной частоты  $\nu$  от направления распространения поверхностного поляритона. 1 –  $b = 0.5$ , 2 –  $b = 0.502$ , 3 –  $b = 0.506$ , 4 –  $b = 0.51$ , 5 –  $b = 0.49$ .

Рис. 8. Сектор углов разрешенных направлений существования поверхностных поляритонов при изменении параметра  $b$ .

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В **приложения** вынесен вспомогательный материал. В приложении 1 содержатся детали вычисления тензора поверхностных импедансов для бианизотропных сред характеризуемых тензорами (10), а в приложении 2 — для одноосных магнитных кристаллов (9).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие основные результаты:

1. Расширена область применения операторного интегрального подхода, разработанного ранее для описания поверхностных поляритонов на произвольных срезах анизотропных немагнитных сред, путем обобщения на линейные бианизотропные среды произвольной кристаллографической симметрии [2, 8].

2. С помощью разработанного интегрального подхода показано, что на границах изотропных сред и гиротропных кристаллов классов симметрии  $3m$ ,  $4mm$  и  $6mm$  поверхностные поляритоны могут распространяться в любом направлении вдоль границы раздела при определенных значениях материальных параметров [2].
3. В результате исследования поверхностных поляритонов на границах раздела одноосных кристаллов со скрещенными оптическими осями показано, что распространение поверхностных волн возможно только при выполнении ряда соотношений между материальными параметрами сред, представляемых системой алгебраических неравенств. В таком случае совокупность разрешенных направлений распространения поверхностных поляритонов образуют секторы в плоскости раздела. Угловая ширина секторов разрешенных направлений распространения находится из алгебраического уравнения четвертой степени, коэффициенты которого зависят от анизотропии и угла скрещивания оптических осей пограничных кристаллов. Положения секторов определяются направлениями биссектрис углов между оптическими осями кристаллов [3,7].
4. Установлены закономерности изменения угловых ширин и положений секторов разрешенных направлений распространения поверхностных поляритонов на границах раздела одноосных кристаллов, разделенных тонким изотропным слоем, от толщины этого слоя [3].
5. Обнаружено уменьшение ширин секторов разрешенных направлений распространения поверхностных поляритонов на границах раздела одноосного кристалла и изотропной среды при учете поглощения в граничащих средах [1].
6. Впервые установлен факт и указаны условия одновременного существования двух либо трех решений дисперсионного уравнения для заданного направления распространения вдоль границы раздела изотропной среды с отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями и одноосного кристалла. Эти решения отвечают изонормальным поверхностным волнам с несовпадающими фазовыми скоростями и поляризациями. Показано, что ширина и положение секторов разрешенных направлений распространения поверхностных поляритонов зависят от материальных параметров граничащих сред таким образом, что даже при небольшой модуляции (порядка 1%) одной из компонент тензора диэлектрической проницаемости одноосного кристалла можно изменить ширину секторов существования в несколько раз. [4, 9, 10].

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных журналах:

1. Галынский В.М., Фурс А.Н. Поверхностные электромагнитные волны в поглощающих анизотропных структурах // Вестник БГУ. Сер 1.— 2003.— № 3.— С. 3–8.
2. Galynsky V.M., Furs A.N., Barkovsky L.M. Integral formalism for surface electromagnetic waves in bianisotropic media // J. Phys. A: Math. Gen.— 2004.— Vol. 37, № 18.— P. 5083–5096.
3. Фурс А.Н., Галынский В.М., Барковский Л.М. Бездисперсионные поверхностные поляритоны на границах кручения кристаллов и в переходном слое между ними. // Оптика и спектроскопия.— 2005.— Т. 98, № 3.— С. 497–503.
4. Галынский В.М., Фурс А.Н., Барковский Л.М. Поверхностные поляритоны на границах раздела одноосных кристаллов и “левых” сред // Ковариантные методы в физике. Оптика и акустика. Глав. ред. А.М. Гончаренко.— Мн.: Ин-т физики НАН Беларуси, 2005.— С. 35–40.

### Статьи в сборниках трудов:

5. Галынский В.М. Объемные и поверхностные состояния электромагнитного поля в стратифицированных волноведущих структурах. Научные труды молодых ученых, аспирантов, студентов.— В 3 ч. Ч. 1.— Мн.: БГУ, 2001.— С. 264–269.
6. Галынский В.М. Поверхностные электромагнитные волны в тонких изотропных слоях с анизотропными подложками // Сборник работ 59-й научной конференции студентов и аспирантов Белгосуниверситета.— В 3 ч. Ч. 1.— Мн.: БГУ, 2002.— С. 187–188.

### Тезисы докладов на конференции:

7. Галынский В.М. Поверхностные электромагнитные волны в структурах одноосный кристалл — изотропный слой — одноосный кристалл // Тезисы докладов X Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов. — Гродно: Гродн. гос. ун-т., 2002.— С. 73–74.
8. Галынский В.М., Фурс А.Н. Поверхностные поляритоны на границах раздела линейных бианизотропных сред // Труды третьей международной конференции молодых ученых и специалистов “Оптика-2003”.— Санкт-Петербург, 2003.— стр. 203–204.

9. Галынский В.М., Фурс А.Н. Поверхностные поляритоны на границах раздела одноосных кристаллов и “левых” сред // Труды четвертой международной конференции молодых ученых и специалистов “Оптика-2005”.— Санкт-Петербург, 2005.— С. 253–254.
10. Галынский В.М., Фурс А.Н. Сингулярные поверхностные электромагнитные волны на границах анизотропных сред и “левых” метаматериалов // Сборник тезисов Одиннадцатой всероссийской конференции студентов-физиков и молодых ученых.— Екатеринбург, 2005.— С. 314–315.

## РЭЗЮМЭ

Галынскі Уладзімір Міхайлавіч

ПАВЕРХНЕВЫЯ ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫЯ ХВАЛІ Ў  
СКЛАДАНЫХ БІАІЗАТРОПНЫХ АСЯРОДДЗЯХ

**Ключавыя словы:** паверхневыя электрамагнітныя хвалі, паверхневыя палярытоны, сінгулярныя паверхневыя палярытоны, бездысперсійныя паверхневыя палярытоны, тензар паверхневых імпедансаў, умовы існавання, “левае” асяроддзе, біанізатропнае асяроддзе.

**Аб’ектам даследвання** з’яўляюцца паверхневыя электрамагнітныя хвалі на межах біанізатропных асяроддзяў (у тым ліку магнітных, анізатропных і “левых”). **Прадметам даследвання** з’яўляюцца ўмовы існавання паверхневых электрамагнітных хваляў на межах розных біанізатропных асяроддзяў і палярызацыйныя характарыстыкі гэтых хваляў. **Асноўная мэта работы** — тэарэтычнае вывучэнне паверхневых электрамагнітных хваляў у складаных біанізатропных асяроддзях. Асноўнымі метадамі даследвання з’яўляюцца каварыянтныя метады, распрацаваныя акадэмікам Ф.І. Федаравым.

Абагулен аператарны інтэгральны метады, які быў распрацаваны раней для апісання паверхневых палярытонаў на адвольных зрэзах анізатропных немагнітных асяроддзяў, на выпадак лінейных біанізатропных асяроддзяў адвольнай крышталаграфічнай сіметрыі. З дапамогай распрацаванага метады выяўлена магчымасць існавання паверхневых палярытонаў на межах ізатропных асяроддзяў і гіратропных крышталаў класаў сіметрыі  $3m$ ,  $4mm$  і  $6mm$ . Атрыманы дакладныя формулы для знаходжання вуглавых шырынь і месцаў знаходжання сектароў дазволеных напрамкаў распаўсюджвання паверхневых палярытонаў у плоскасцях раздзела немагнітных аптычна аднавосных крышталаў з перакрываваемымі аптычнымі восямі. Адшуканы закон амернасці змянення вуглавых шырынь і месцаў знаходжання сектароў дазволеных напрамкаў распаўсюджвання паверхневых палярытонаў на межах аднавосных крышталаў, падзеленых тонкім ізатропным слоём, ад таўшчыні гэтага слоя. Упершыню ўстаноўлен факт і ўказаны ўмовы адначасовага існавання двух або трох рашэнняў дысперсійнага ўраўнення для зададзенага напрамку распаўсюджвання ўздоўж мяжы ізатропнага асяроддзя з негатыўнымі дыялектрычнай і магнітнай праніцаемасцямі і аднавоснага крыштала.

Атрыманыя вынікі могуць быць прыменены для разліку характарыстык паверхневых электрамагнітных хваляў у складаных анізатропных магнітных і біанізатропных асяроддзях.

## РЕЗЮМЕ

Галынский Владимир Михайлович

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В  
СЛОЖНЫХ БИАНИЗОТРОПНЫХ СТРУКТУРАХ

**Ключевые слова:** поверхностные электромагнитные волны, поверхностные поляритоны, сингулярные поверхностные поляритоны, бездисперсионные поверхностные поляритоны, тензор поверхностных импедансов, условия существования, “левые” среды, бианизотропные среды.

**Объектом исследования** являются поверхностные электромагнитные волны на границах раздела бианизотропных сред (в том числе магнитных, анизотропных и “левых”). **Предметом исследования** являются условия существования поверхностных электромагнитных волн на границах различных бианизотропных сред и поляризационные характеристики этих волн. **Основная цель работы** — теоретическое исследование поверхностных электромагнитных волн в сложных бианизотропных средах. Основными **методами исследования** являются ковариантные методы, разработанные академиком Ф.И.Федоровым. Обобщен операторный интегральный подход, разработанный ранее для описания поверхностных поляритонов на произвольных срезах анизотропных немагнитных сред, на случай линейных бианизотропных сред произвольной кристаллографической симметрии. С помощью разработанного подхода показана возможность существования поверхностных поляритонов на границах изотропных сред и гиротропных кристаллов классов симметрии  $3m$ ,  $4mm$  и  $6mm$ . Найдены точные формулы для нахождения угловых ширин и положений секторов разрешенных направлений распространения поверхностных поляритонов в плоскостях раздела немагнитных оптически одноосных кристаллов со скрещенными оптическими осями. Найдены закономерности изменения угловых ширин и положений секторов разрешенных направлений распространения поверхностных поляритонов на границах раздела одноосных кристаллов, разделенных тонким изотропным слоем, от толщины этого слоя. Впервые установлен факт и указаны условия одновременного существования двух либо трех решений дисперсионного уравнения для заданного направления распространения вдоль границы раздела изотропной среды с отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями и одноосного кристалла.

Полученные результаты могут быть применены для расчетов характеристик поверхностных электромагнитных волн в сложных анизотропных магнитных и бианизотропных средах.

## SUMMARY

Galynsky Vladimir Mikhailovich

SURFACE ELECTROMAGNETIC WAVES IN THE COMPLEX  
BIANISOTROPIC STRUCTURES

**Keywords:** surface electromagnetic wave, surface polariton, singular surface polariton, dispersionless surface polariton, surface impedance tensor, existence condition, left-handed medium, bianisotropic medium.

The **object of research** are surface electromagnetic waves at the interface of bianisotropic structures, including magnetic, anisotropic and left-handed media. The **subject of research** are existence conditions of surface electromagnetic waves at the interface of bianisotropic structures and polarization properties of it. The **aim of research** is to investigate surface electromagnetic waves at the interface of bianisotropic media theoretically. The main **methods of research** are covariant methods developed by academic F.I. Fedorov.

Integral formalism before developed for describing surface polaritons at the arbitrary cut of anisotropic non-magnetic media has been generalized on the case of bianisotropic media of any symmetry classes. It is shown possibility of surface polaritons existence at the interface of isotropic media and gyrotropic crystal of  $3m$ ,  $4mm$  and  $6mm$  symmetry classes. Precise formulae for finding angular width and places of surface polariton existence sectors at the interface of non-magnetic uniaxial crystals with crossed optic axes. It is founded regularity of changing angular widths and places of surface polariton existence sectors at the interface of non-magnetic uniaxial crystals, divided by isotropic layer, from thickness of this layer. For the first time it is established fact and conditions of simultaneously existence of two or three solutions of surface polariton dispersion equation for the given propagating direction at the interface left-handed media and uniaxial crystal.

Obtained results can be applied to calculating surface polariton properties at the interfaces of magnetic and bianisotropic media.

Галынский Владимир Михайлович

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ  
ВОЛНЫ В СЛОЖНЫХ БИАНИЗОТРОПНЫХ  
СТРУКТУРАХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности  
01.04.02 — теоретическая физика

Подписано в печать 2006 г.

Формат 60 × 90 1/16. Бумага офисная.

Печать офсетная. Печ.л. \_\_\_\_\_. Учетн. изд. л. 2,1.

Тираж 60 экз. Заказ №

Институт  
фи-  
зи-  
ки  
им. Б. И. Сте-  
па-  
но-  
ва  
НАН  
Бе-  
ла-  
ру-  
си,  
220072  
г.  
Минск,  
пр.  
Неза-  
ви-  
си-  
мо-  
сти,  
68.  
От-  
пе-  
с  
ча-  
та-  
но  
на  
ри-  
зо-  
гра-  
фе  
Ин-  
сти-  
ту-  
та  
фи-  
зи-  
ки  
НАНБ.  
Ли-