

На правах рукописи



СТЕФЮК Юлия Валентиновна

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ФОТОННО-
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР:
МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ
И ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2012

Работа выполнена кафедре радиотехники и электродинамики ФГБОУ ВПО
“Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского”

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Давидович Михаил Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
доцент
Комаров Вячеслав Вячеславович

доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ,
лауреат Государственной премии РФ,
Мещанов Валерий Петрович

Ведущая организация: ЗАО “Научно-производственный центр
“Алмаз-Фазотрон”, г. Саратов

Защита состоится 09 ноября 2012 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 при ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского” по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, корп. 3, ауд. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

Автореферат разослан

2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.243.01

доктор физико-математических наук, профессор



В.М. Аникин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Диссертационная работа посвящена исследованию актуальных вопросов современной радиофизики и прикладной электродинамики. В ней теоретически исследованы важные аспекты физики диэлектрических структур: диэлектрических волноводов (ДВ), диэлектрических резонаторов (ДР), включая структуры с линейными и нелинейными полупроводниковыми слоями, а также и свойства фотонных кристаллов (ФК), фотонно-кристаллических волноводов (ФКВ) и ФК структур (ФКС). ФК (или электромагнитные кристаллы) – периодические и квазипериодические структуры с диэлектрическими, магнитными, металлическими, полостными и полупроводниковыми включениями в основу – являются объектами передового направления исследований. Они составляют наиболее обширно используемый класс искусственных сред – метаматериалов, применяемых от микроволнового до оптического диапазонов. Достоинство метаматериалов в том, что их синтез и создание имеет цель получения веществ и устройств на их основе с новыми требуемыми электрофизическими и электродинамическими свойствами. Это выводит моделирование таких свойств на первое место по сравнению со сложным и дорогим экспериментом. Большинство работ и математических моделей для ФК использует различные приближенные методы теоретического исследования (квазистатические, оптические и т.п.), а также коммерческие пакеты программ, поэтому большое значение имеет развитие строгих электродинамических подходов к их анализу. Актуальным является синтез электрофизических (электродинамических) свойств метаматериалов, в частности, ФК, заключающийся в проведении гомогенизации. Она является обратной задачей, решение которой требует построения моделей для прямой задачи – получения полей для большого разнообразия микроструктурированных или наноструктурированных ФК. В работе в качестве инструмента исследования использован метод интегральных уравнений (ИУ) и метод интегродифференциальных уравнений (ИДУ) с итерационными методами их решения. Важным является исследование свойств ФК и ФКВ при наличии потерь, нелинейности, учете материальной дисперсии реальных включений (металлов, полупроводников и т.п.), для квазипериодических структур. Для всех задач ИУ и ИДУ являются весьма общими и удобными подходами к моделированию.

Различного рода диэлектрические, магнитодиэлектрические, полупроводниковые и металлодиэлектрические структуры активно используются в широком частотном диапазоне. Их применение и теоретическое исследование началось еще с 40-х годов прошлого века. ДВ и ДР начали широко исследоваться еще с 60-х годов. Большой вклад здесь был сделан рядом отечественных и зарубежных ученых (Л.А. Вайнштейн, В.Ф. Взятыхшев, Б.З. Каценеленбаум, М.Е. Ильченко, А.Г. Свешников, А.С. Ильинский, В.В. Шевченко, Н.А. Хижняк, В.Н. Дмитриев, Е.В. Захаров, Е.Н. Васильев, Г.И. Веселов С.Б. Раевский, Д.А. Усанов, В.А. Неганов, Е.И. Нефедов, А.Т. Фиалковский, А.М. Лерер, В.Н. Мелехин, А.Б. Маненков,

В.Е. Любченко, А.Б. Самохин, Ф.Г. Басс, Ю. Швингер, Л. Левин, М. Адамс, Д. Маркузе, Дж. Мидвинтер и др.). Рядом научных школ для их моделирования были разработаны методы ИУ. Тем не менее, ряд вопросов здесь до конца не исследован. К ним, в частности, относятся: радиационные потери в ДР и ДВ; ДР и ДВ с неоднородными, анизотропными, бианизотропными средами; учет диссипации и материальной дисперсии в средах, включая и металлические структуры; влияние нелинейных свойств сред; вытекающие волны ДВ ниже отсечки, вытекающие волны ДВ при наличии потерь, активных или нелинейных слоев, ДВ со сложной структурой поперечного сечения. Развиваемые в работе подходы пригодны для исследования перечисленных вопросов, а ряд таких задач является объектом исследования в диссертации.

Метаматериалы (искусственные диэлектрики) изучались еще в 40-х годах прошлого века (Л. Левин). Однако широкое распространение их исследования приобрели с начала 90-х годов после ряда работ (Э. Яблонович и др.). Периодические метаматериалы (ФК) в общем случае бианизотропные. К настоящему времени имеется большое число публикаций по данной тематике (Джон Д. Джоаннопоулос, Джон Пендри, К. Сакода, В. Линделл, С.А. Третьяков, И.С. Нефедов, А.М. Желтиков, С.А. Никитов, Е.А. Виноградов и др.). Здесь актуальной является гомогенизация – задача определения эффективных материальных параметров метаматериалов электродинамическими методами.

Итерационные методы решения операторных уравнений являются мощным инструментом в численных методах и весьма разработаны. В диссертации они используются и развиваются для ИУ и ИДУ, т.е. для интегродифференциальных операторов электродинамики, включая и нелинейный случай.

Первой задачей, решаемой в диссертации, является выбор и развитие метода ИУ и ИДУ для исследуемых задач, в том числе для ФК, ФКВ, ДР и ДВ, а также развитие итерационных методов их исследования. ИУ для численного исследования ДР и ФК используются сравнительно редко, что определяется достаточной трудоемкостью построения алгоритмов при сложной конфигурации. В основном используются либо коммерческие пакеты на основе методов сеток и методов конечных элементов, либо указанные методы развиваются для конкретных структур. ИУ позволяют рассчитывать структуры весьма точно и быстро, при этом основное их преимущество – корректный учет условия излучения – проявляется для открытых структур. Для диэлектрических ФК используют метод плоских волн, а развитие быстрых и точных алгоритмов является актуальной задачей.

Второй из решаемых задач является исследование затухающих колебаний с учетом излучения в цилиндрическом ДР (ЦДР) и прямоугольном ДР (ПДР), а также квазисобственных волн в многослойных ДВ и ДВ с прямоугольной конфигурацией во всем частотном диапазоне (в том числе ниже частоты отсечки), при наличии потерь, активных и нелинейных слоев. Следует отметить, что ЦДР исследовались приближенно (М.Е. Ильченко, В.Ф. Взятыхшев, Л.Г. Гассанов) и на основе

ИУ методом возмущений (Л.Б. Гольдберг), ПДР – чаще всего приближенно или без учета радиационного излучения (A.W. Glisson, D. Kajfez, S.J. James, P. Guillon, Y. Garault, R.K. Mongia, S.Y. Ke, Y.T. Cheng). Моды ДВ исследованы выше частот отсечек. Было их исследование при приближении к частоте отсечки сверху (А.Г. Рожнев, А.Б. Маненков). Примененный в диссертации итерационный метод решения дисперсионного уравнения (ДУ) позволил получить дисперсию во всем частотном диапазоне.

Третьей решаемой в работе задачей является исследование ФКВ, включая получение потерь для вытекающих мод, на основе нового полученного в работе ИУ. Следует заметить, что ФК и ФКВ анализировались в основном с использованием медленно сходящегося метода плоских волн и приближенно: методами изочастот и сверхрешетки.

Четвертой решаемой в диссертации задачей является гомогенизация и исследование электрофизических (электродинамических) свойств ФК. Развиваются три метода гомогенизации: на основе усреднения полей с решением ИУ и вычислением дипольных моментов ячейки периодичности; на основе усреднения дисперсионных зависимостей по углам распространения волн при решении задач дифракции падения плоской волны на конечную пластину ФК или полубесконечную ФК структуру (при различных углах падения, т.е. путем усреднения по ним). В последнем случае ФК имеет квазипериодическую структуру, поэтому указанный подход является более строгим при использовании полученных гомогенных параметров в задачах дифракции. Частотный диапазон здесь в принципе не ограничен, как и частотный диапазон при гомогенизации на основе строгих дисперсионных зависимостей, тогда как введение усредненных по ячейке дипольных моментов и усредненных полей предполагает, что использованные длины волн много больших максимального периода ячейки. К этой же задаче примыкает исследование свойств квазипериодических структур, включая и структуры с потерями и нелинейностями. Численные результаты в диссертации получены для одноосных металлических и диэлектрических ФК, а гомогенизация проведена на основе вычисления замедления n с использованием соотношения $\varepsilon_{zz}(k_0, \mathbf{k}) = n^2 = k^2 / k_0^2$, при этом в полосе запираания (bandgap) волновой вектор \mathbf{k} мнимый.

Цели работы:

1. Теоретическое исследование свойств (излучаемых мод) ДР цилиндрической и прямоугольной конфигураций и разработка методов итерационного решения соответствующих ИУ и ИДУ.

2. Теоретическое исследование собственных и квазисобственных (комплексных) мод планарных ДВ и ДВ с прямоугольной конфигурацией, включая вытекание ниже частот отсечки, а также разработка методов итерационного решения соответствующих ИУ и ИДУ.

3. Теоретическое исследование волн в ДВ с нелинейными и полупроводниковыми слоями итерационными методами с целью управления их свойствами.

4. Исследование волн и определение их затухания в фотонно-кристаллическом волноводе методом интегрального уравнения.

5. Гомогенизация и исследование свойств металлических фотонных кристаллов с различной конфигурацией и построение моделей для диэлектрических фотонных кристаллов.

Методы исследования. Методами исследования в работе являются построение математических моделей и математическое моделирование на основе интегральных и интегродифференциальных уравнений электродинамики с итерационными алгоритмами их решения.

Научная новизна работы:

1. Для краевых задач электродинамики предложена новая модификация метода минимальных невязок с замораживанием на предыдущем шаге, заключающаяся в том, что линеаризация нелинейного операторного уравнения или функционала осуществлена с использованием значения нелинейного члена в невязке на предыдущем шаге итерации.

2. На основе интегрирования методом рядов предложено новое решение задачи дифракции и туннелирования плоской электромагнитной волны через слой с сильно нелинейными свойствами, включая случаи наличия отрицательной действительной части диэлектрической проницаемости (ДП), насыщения и потерь, демонстрирующее возможность ограничения мощности волны.

3. Впервые итерационным алгоритмом на основе метода ИУ решены задачи для излучаемых мод ЦДР и ПДР, причем последняя структура строго исследована впервые. Предложена новая классификация мод ЦДР и ПДР, основанная на симметрии и введении комплексных индексов.

4. Впервые итерационным алгоритмом с использованием аналитического ДУ и метода ИУ исследованы вытекающие (квазисобственные) моды ДВ и металлодиэлектрических волноводов ниже частот отсечки. Впервые строго в электродинамическом подходе произведено исследование волн ДВ с нелинейными слоями, включая низкочастотную область.

5. Впервые исследованы вытекающие моды и потери в ФКВ на основе предложенного нового ИУ для соответствующей квазипериодической структуры.

6. Впервые исследованы одномерные квазипериодические активные и диссипативные ФК на основе метода матриц передачи и одномерного ИУ.

7. Предложены новые методы гомогенизации ФК на основе решения обратной задачи методом наименьших квадратов для дисперсии волн в кристалле и в гомогенной модельной среде, а также на основе определения замедления по дисперсии и через эффективные материальные параметры гомогенной среды.

8. Впервые получены электрофизические параметры – тензоры эффективной диэлектрической проницаемости ряда штыревых проволочных конфигураций металлических ФК строгим электродинамическим методом.

Научно-практическая значимость работы. Результаты, полученные в настоящей работе, представляют существенный практический интерес

для проектирования и расчета устройств на основе ДР, ДВ, ФК, включая управляемые структуры с диссипативными, активными и нелинейными свойствами, а также при создании метаматериалов с заданными свойствами. Они, в частности, могут быть использованы при анализе распространения и туннелирования импульсов в фильтрующих конечных ФК структурах и ДВ, в отрезках волноводов с нелинейными свойствами, при решении задач о возбуждении открытых структур (ДВ, ДР и ФКВ), фотонно-кристаллических резонаторов.

Отдельный практический интерес представляют следующие результаты:

1. Разработанная в работе модификация метода минимальных невязок с замораживанием на предыдущем шаге позволяет анализировать методом ИУ сильно нелинейные структуры при хорошей сходимости.

2. Разработанные методы решения задач дифракции и туннелирования электромагнитных волн на основе решения нелинейного волнового уравнения прямыми методами высокого порядка при итерационном подходе к минимизации невязок дают возможность исследовать сильно нелинейные структуры при высокой сходимости алгоритма.

3. Проведенное исследование спектра комплексных излучаемых волн в ДР и комплексных мод ДВ позволяет решать задачи о возбуждении открытых структур на основе ДР и ДВ, а также о распространении импульсов через конечные и бесконечные структуры ДВ, в металлодиэлектрических волноводах и в ФКВ.

4. Развитые в работе подходы к гомогенизации ФК и методы их анализа дают возможность моделировать структуры с заданными электрофизическими (электродинамическими) свойствами.

Достоверность результатов. Достоверность результатов работы основана на использовании строгих электродинамических моделей анализа, основанных на уравнениях Максвелла, и сходящихся алгоритмов их решения. Достоверность части численных результатов подтверждена их совпадением и сравнением с аналогичными как теоретическими, так и экспериментальными результатами других авторов.

Защищаемые положения и результаты (положения и результаты, выносимые на защиту):

1. Модификация метода минимальных невязок с замораживанием на предыдущем шаге в сочетании с начальным применением метода спуска приводит к увеличению скорости сходимости решения нелинейных операторных уравнений и к уменьшению числа итераций.

2. При туннелировании плоской электромагнитной волны через диссипативный слой с нелинейными свойствами диэлектрической проницаемости, определяемыми насыщением ее отрицательной реальной части имеет место эффект ограничения мощности прошедшей волны.

3. Среди нескольких низших мод открытых цилиндрических и прямоугольных ДР есть моды как с высокой, так и с низкой радиационными добротностями, при этом индексы мод комплексные в том смысле, что вычисляемые по формулам экранированных резонаторов

с их использованием частоты должны быть комплексными, а вдоль осей координат в объеме резонаторов не укладываются целые числа полуволновых вариаций полей.

4. Моды открытых ДВ без потерь, моды ФКВ и волноводов типа канал в диэлектрике с многослойной и импедансной оболочками демонстрируют следующие особенности: выше частоты осечки волна медленная при импедансе канала меньше импеданса оболочки (среды) и быстрая в противном случае; при переходе частоты через отсечку и дальнейшем ее уменьшении замедление сначала резко уменьшается, а затем начинает возрастать, волна становится медленной с близким к 90° углом вытекания и растущими обратно пропорционально частоте потерями; быстрые моды волноводов типа полый канал в диэлектрике и полых ФКВ с уменьшением частоты переходят в медленные волны, практически полностью вытекающие в оболочку.

5. Результаты решения дисперсионного уравнения для вытекающих волн ФКВ на основе интегрального уравнения, демонстрирующие резонансный характер затухания основной моды с чередованием минимумов и максимумов и уменьшение средних потерь с ростом частоты.

6. Гомогенизация на основе определения дисперсии для одноосных идеально проводящих проволочных штыревых металлических ФК дает положительные компоненты тензора диэлектрической проницаемости в зоне пропускания, которые для ряда компонент становятся отрицательными в зоне непропускания, причем при переходе через эту зону волна из медленной превращается в быструю, а затем опять становится медленной.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на следующих международных школах, конференциях и семинарах: 10-я, 11-я, 12-я и 13-я международные школы-конференции по оптике, лазерной физике и биофизике “Saratov Fall Meeting”, Саратов, 2007-2010; Международная конференция “Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2009”, Дивноморск, 2009; 13-я международная конференция “Mathematical Methods in Electromagnetic Theory”, 2010, Киев (Украина), 12-я международная конференция “Mathematical Methods in Electromagnetic Theory”, Одесса (Украина), 2008; Международная конференция “Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2008”, 2008, Саратов; Международный семинар “Metamaterials, Meta08”, 2008, Нанджин (Китай).

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 26 печатных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых российских журналах, рекомендованных ВАК, 18 статей в сборниках международных конференций, периодических международных и российских изданиях, реферируемых сборниках научных работ.

Личный вклад автора: Лично автором произведена основная часть расчетов и интерпретирована значительная часть полученных в работе результатов. Постановка задач и разработка алгоритмов проводилась совместно с научным руководителем.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованных источников и приложения –

списка обозначений и аббревиатур. Работа изложена на 229 страницах машинописного текста и содержит 52 рисунка и 4 таблицы. Список использованных источников содержит 209 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору методов интегральных и интегродифференциальных уравнений электродинамики для металло-диэлектрических структур, а также формулировке ряда новых форм таких уравнений. В **п. 1.1** дано краткое введение в проблему и сформулированы гиперсингулярные объемные и объемно-поверхностные интегральные уравнения

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + \int_S \hat{L}^e(G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')\mathbf{J}(\mathbf{r}'))d^2r' + \int_V [j\omega\varepsilon_0 \hat{L}^e(G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')(\varepsilon(\mathbf{r}') - 1)\mathbf{E}(\mathbf{r}')) - j\omega\mu_0 \nabla \times G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')(\mu(\mathbf{r}') - 1)\mathbf{H}(\mathbf{r}')]d^3r', \quad (1)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}_0(\mathbf{r}) + \int_S \nabla \times (G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')\mathbf{J}(\mathbf{r}'))d^2r' + \int_V [j\omega\mu_0 \hat{L}^m(G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')(\mu(\mathbf{r}') - 1)\mathbf{H}(\mathbf{r}')) + j\omega\varepsilon_0 \nabla \times G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')(\varepsilon(\mathbf{r}') - 1)\mathbf{E}(\mathbf{r}')]d^3r', \quad (2)$$

а также основные модели структур на их основе. В этих ИУ обозначены дифференциальные операторы, определенные соотношениями

$$\frac{\text{grad}(\text{div}) + k_0^2}{j\omega\varepsilon_0} \mathbf{A}^e(\mathbf{r}) - \text{rot} \mathbf{A}^m(\mathbf{r}) = \hat{L}^e \mathbf{A}^e(\mathbf{r}) - \nabla \times \mathbf{A}^m(\mathbf{r}),$$

$$\frac{\text{grad}(\text{div}) + k_0^2}{j\omega\mu_0} \mathbf{A}^m(\mathbf{r}) + \text{rot} \mathbf{A}^e(\mathbf{r}) = \hat{L}^m \mathbf{A}^m(\mathbf{r}) + \nabla \times \mathbf{A}^e(\mathbf{r})$$

и используются в общем случае (для структур с границами) тензорные функции Грина (ФГ) структур, интегрально связывающие токи $\mathbf{J}^{(e,m)}$ (источники) и вектор-потенциалы $\mathbf{A}^{(e,m)}$. Для свободного пространства ФГ скалярная: $G(\mathbf{r}) = (4\pi|\mathbf{r}|)^{-1} \exp(-jk_0|\mathbf{r}|)$. Для описания магнитодиэлектрических структур введены токи поляризации: $\mathbf{J}_p^e(\omega) = j\omega\varepsilon_0(\varepsilon(\omega) - 1)\mathbf{E}(\omega)$ и $\mathbf{J}_p^m(\omega) = j\omega\mu_0(\mu(\omega) - 1)\mathbf{H}(\omega)$.

В **п. 1.2** получены ИУ и ИДУ с понижением особенности на основе векторных интегральных теорем. Приведены результаты для связанных ИУ и ИДУ относительно обоих полей, а также и для электрического и магнитного поля, полученные переносом операторов дифференцирования с координат точки наблюдения истока на координаты точки истока. Используются теоремы о дивергенции (Гаусса), о роторе и о градиенте. Предложен метод преобразования уравнений на основе теоремы Гельмгольца и представления искомым векторов с помощью векторных и скалярных потенциалов. Ряд полученных ИДУ нагружен поверхностными интегралами, возникающими в результате преобразований. В **п. 1.3** рассмотрены сингулярные интегральные уравнения на основе выделения особенности, не нагруженные поверхностными интегралами. **П. 1.4** посвящен ИУ и ИДУ для ДР. В **п. 1.4.1** изложено введение в проблему.

П. 1.4.2 посвящен анализу мод и резонансных частот ЦДР. Рассмотрены уравнения для основной азимутально симметричной моды $H_{01\delta}$ и произвольных мод. Сформулированы итерационные подходы для одновременного определения резонансных частот и распределения полей. Общие ИУ относительно электрического поля ЦДР имеют вид

$$\begin{aligned}
E_\rho(\rho, \varphi, z) &= k^2 \int_V G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') [\varepsilon(\mathbf{r}') - 1] \{E_\rho(\mathbf{r}') \cos(\varphi - \varphi') + E_\varphi(\mathbf{r}') \sin(\varphi - \varphi')\} dV' - \\
&- \int_V \left\{ \varepsilon^{-1}(\mathbf{r}') [\mathbf{E}(\mathbf{r}') \nabla' \varepsilon(\bar{\mathbf{r}}')] \frac{\partial G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{\partial \rho'} \right\} dV' + \oint_S [\varepsilon(\mathbf{r}') - 1] (\mathbf{v}(\mathbf{r}') \bar{\mathbf{E}}(\bar{\mathbf{r}}')) \frac{\partial G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{\partial \rho'} dS', \\
E_\varphi(\rho, \varphi, z) &= k^2 \int_V G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') [\varepsilon(\mathbf{r}') - 1] \{E_\varphi(\mathbf{r}') \cos(\varphi - \varphi') - E_\rho(\mathbf{r}') \sin(\varphi - \varphi')\} dV' - \\
&- \int_V \left\{ \varepsilon^{-1}(\mathbf{r}') [\bar{\mathbf{E}}(\mathbf{r}') \nabla' \varepsilon(\bar{\mathbf{r}}')] \frac{\partial G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{\rho' \partial \varphi'} \right\} dV' + \oint_S [\varepsilon(\mathbf{r}') - 1] (\mathbf{v}(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}')) \frac{\partial G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{\rho' \partial \varphi'} dS', \\
E_z(\rho, \varphi, z) &= k^2 \int_V G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') [\varepsilon(\mathbf{r}') - 1] E_z(\mathbf{r}') dV' - \\
&- \int_V \left\{ \varepsilon^{-1}(\mathbf{r}') [\bar{\mathbf{E}}(\mathbf{r}') \nabla' \varepsilon(\bar{\mathbf{r}}')] \frac{\partial G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{\partial z'} \right\} dV' + \oint_S [\varepsilon(\mathbf{r}') - 1] (\mathbf{v}(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}')) \frac{\partial G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{\partial z'} dS'.
\end{aligned}$$

В **п. 1.4.3** предложен метод понижения порядка сингулярности (особенности ядра) интегрального уравнения ДР путем интегрирования по точке наблюдения. Метод удобен для резонаторов с координатными границами, в частности для прямоугольного диэлектрического резонатора. В **п. 1.4.4** рассмотрены поля в дальней зоне и диаграмма направленности (излучения) произвольного диэлектрического резонатора. **П. 1.5** посвящен ИУ и ИДУ для диэлектрических волноводных структур. Путем введения экспоненциальной зависимости от продольной координаты объемное трехмерное ИУ преобразовано в двумерное ИУ в плоскости поперечного сечения волновода

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}_\perp) = \frac{-j}{4} [(\nabla_\perp - j\gamma \mathbf{z}_0) \otimes (\nabla_\perp - j\gamma \mathbf{z}_0) + k_0^2] \int_S H_0^{(2)}(\chi_0 |\mathbf{r}_\perp - \mathbf{r}'_\perp|) \kappa(\mathbf{r}'_\perp) \mathbf{E}(\mathbf{r}'_\perp) dx' dy'. \quad (3)$$

Далее это ИУ изложенными выше методами преобразуется к ИУ и ИДУ, которые могут быть нагружены контурными интегралами. Параграф **1.6** посвящен ИУ и ИДУ для ФК. В **п. 1.6.1** дано введение в проблему. В **п. 1.6.2** рассмотрены скалярные и векторные ФГ периодически расположенных и сфазированных источников (периодические ФГ) для ФК и ФКС. Скалярная трехмерно-периодическая ФГ имеет вид:

$$\tilde{G}(k_0 \sqrt{\varepsilon \mu}, \mathbf{k}, \mathbf{r} - \mathbf{r}') = \frac{1}{\Omega_0} \sum_{\mathbf{n}} \frac{\exp(\pm j(\mathbf{k} + \hat{\mathbf{g}}\mathbf{n})(\mathbf{r} - \mathbf{r}'))}{(\mathbf{k} + \hat{\mathbf{g}}\mathbf{n})^2 - k_0^2 \varepsilon \mu} = \sum_{\bar{\mathbf{n}}} G(k_0 \sqrt{\varepsilon \mu}, \mathbf{r} - \mathbf{r}' - \mathbf{p}) \exp(-j\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\varphi}). \quad (4)$$

Здесь имеет место трехмерное суммирование в импульсном пространстве по векторному мультииндексу \mathbf{n} , $\hat{\mathbf{g}}$ - тензор обратной решетки. ФГ (4) упрощается при совпадении направлений трансляций с осями координат. Приведены соответствующие ИУ и ИДУ для различного рода периодических и квазипериодических включений (диэлектрических, магнитодиэлектрических, металлических, полостей) в диэлектрическую основу. В **п. 1.7** содержатся краткие выводы по главе 1.

Во **второй главе** дан обзор итерационных методов и изложены итерационные методы и алгоритмы для решения задач электродинамики. **П. 2.1** является обзорным и излагает итерационные решения для действительной функции действительного аргумента. В **п. 2.1.1** изложен метод простой итерации. В **п. 2.1.2** излагается метод минимальных невязок и дается его модификация для решения нелинейных задач. Суть метода заключается в линеаризации путем замораживания значений на предыдущем шаге итерации, что позволяет получить явный вид параметра итерации, в частности для метода минимальных невязок (ММН).

В **п. 2.1.3** изложены многопараметрические и многошаговые ММН. В **п. 2.1.4** рассмотрены итерационные методы спуска. **П. 2.1.5** посвящен исследованию сходимости. Исследование выполнено для случая выполнения условия сжимающих отображений, т.е. при достижении условия сходимости итераций. **П. 2.2.** посвящен итерациям для комплексной функции комплексного аргумента. Результаты предыдущих разделов здесь обобщены для комплексного случая. В **п. 2.3** рассмотрены общие системы нелинейных уравнений, решаемые итерационными методами. Для указанных систем обобщены результаты предыдущих разделов. **Параграф 2.4** посвящен операторным уравнениям в банаховых пространствах и связанным с ними функционалам. Рассмотрены пространства со скалярным произведением (пространства Гильберта) и итерационные методы решения операторных уравнений в них. В **п. 2.4.1** формулируется решение задачи на собственные значения $\hat{A}x = \lambda x$ линейного оператора в виде одновременных итераций для однородного операторного уравнения и соответствующего функционала. Невязка уравнения есть $\Delta(x) = x - \lambda^{-1} \hat{A}x$. Вводятся функционалы $\Lambda(x, \lambda) = (x, \hat{A}(\lambda)x) \|x\|^{-2}$, $\Phi(x, \lambda) = \lambda - \Lambda(x, \lambda)$, второй из которых определяет невязку $\Delta\lambda$ собственного значения. Если оператор от λ не зависит, то в силу линейности получаем явные параметры одновременной итерации операторного уравнения и функционала на шаге n :

$$\tau_n = (\Delta_{n-1}, x_{n-1}) / (\Delta_{n-1}, \Delta_{n-1}) = \lambda_{n-1}^{-1} (\Delta_{n-1}, \hat{A}x_{n-1}) / \|\Delta_{n-1}\|^2, \quad \varsigma_n = \lambda_{n-1} / \Delta\lambda_{n-1} = \Lambda(x_{n-1}, \lambda_{n-1}) / \Delta\lambda_{n-1}. \quad (5)$$

В задачах электродинамики ФГ нелинейно зависит от волнового числа k_0 и возможны нелинейные ИУ, поэтому соотношения (5) обобщены (линеаризованы) путем “замораживания”, т.е. использования при вычислении нелинейных частей значений, полученных на предыдущем шаге. В **п. 2.4.2** рассмотрены итерационные решения неоднородной задачи для линейного и нелинейного оператора. В **п. 2.5** приведены краткие выводы по главе 2.

Третья глава содержит результаты определения электродинамических параметров диэлектрических резонаторов и волноводов на основе итерационного решения интегральных и интегродифференциальных уравнений. Схематически на рис.1 представлены основные исследуемые структуры: ЦДР - 1, ПДР - 2, многослойный сферический концентрический резонатор (СКР) - 3, ДВ с плоскостойким покрытием - 4, волновод типа полый канал с плоскостойкой оболочкой - 5. **П. 3.1** содержит результаты

моделирования цилиндрического диэлектрического резонатора путем итерационного решение интегрального уравнения. Рассмотрены основная $H_{01\delta}$ и первые высшие моды. Показано, что индексы мод не целые и, вообще говоря, комплексные. Предложена классификация мод.

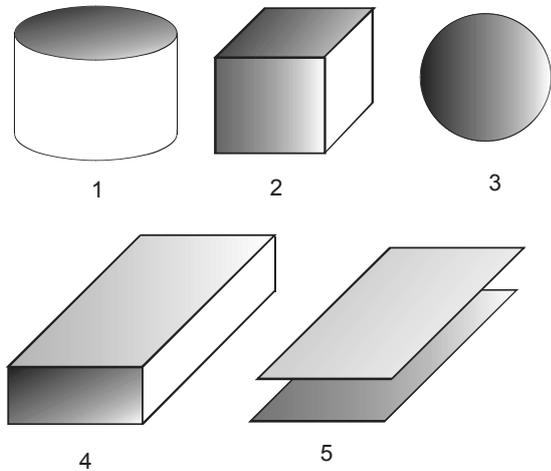


Рис.1. Схематическое изображение структур

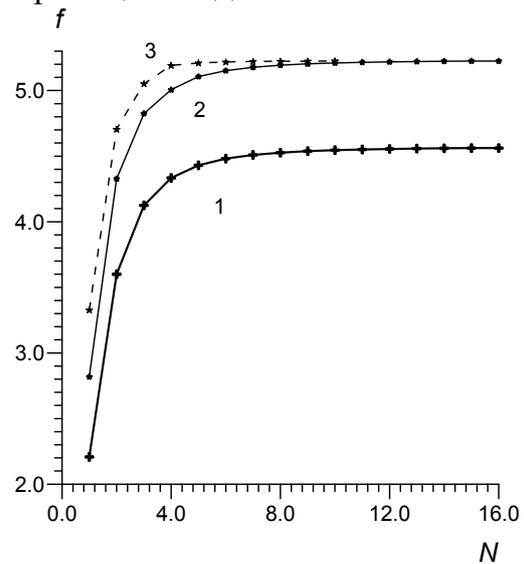


Рис. 2. Исследование сходимости для ЦДР

На рис. 2 представлены результаты исследования сходимости для резонансной частоты основной моды $H_{01\delta}$ от числа базисных функций N при кусочно-постоянной (1,2) и полиномиальной квадратичной (3) аппроксимациях для $\epsilon = 38$, радиусе $r_0 = 5$ мм и высотах: $h = 7$ мм (1) и $h = 4$ мм (2,3). На рис. 3, 4 даны зависимости резонансных частот и добротностей.

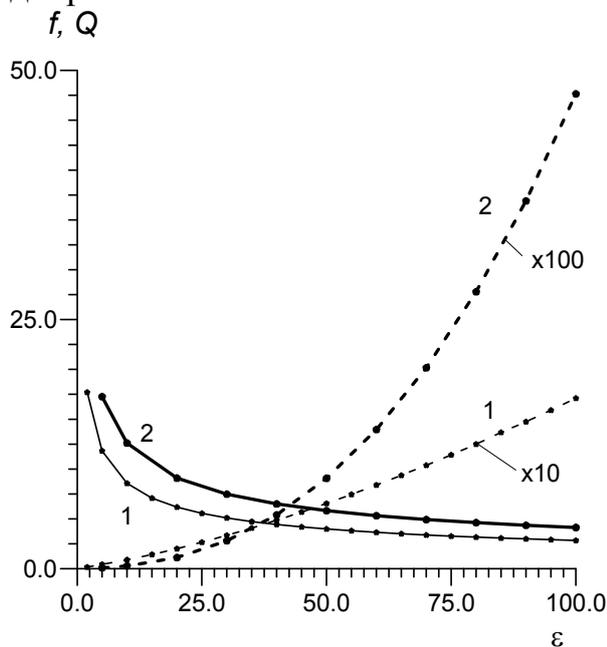


Рис. 3. Зависимость резонансной частоты и добротности от проницаемости для ЦДР

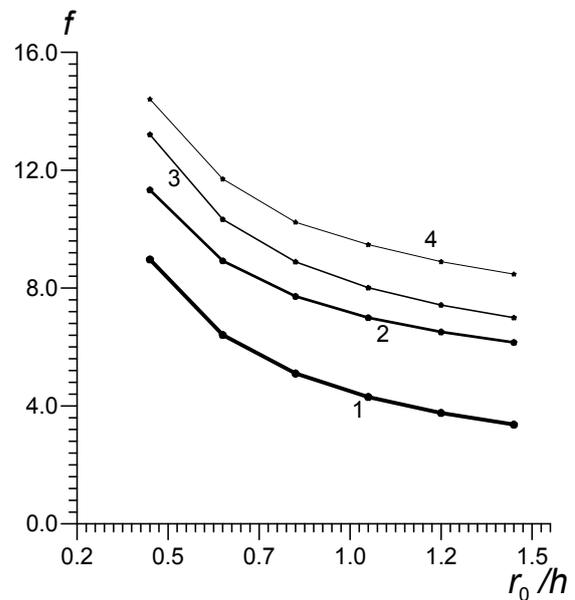


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты от отношения радиуса к высоте для ЦДР

На рис. 5 и 6 приведено распределение компоненты электрического поля E_φ . В силу радиационных потерь частоты колебаний и поля комплексные, а в диэлектрике по каждой из координат не укладывается целое число полуволн.

Для использования обычной связи резонансной частоты с индексами моды следует характеризовать моды комплексными индексами. **П. 3.2** посвящен анализу мод прямоугольного диэлектрического резонатора. В п. **3.2.1** рассмотрено введение в проблему.

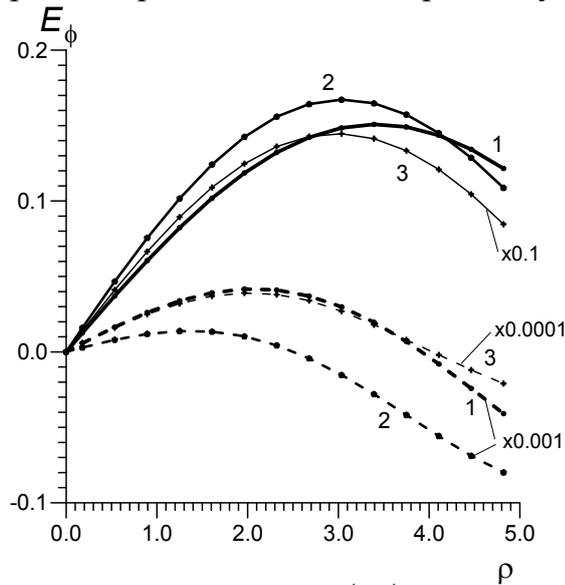


Рис. 5. Зависимость $\text{Re}(E_\varphi)$ (сплошные кривые) и $\text{Im}(E_\varphi)$ (штриховые кривые) от координаты ρ (см) для ЦДР $\varepsilon = 100$, $r_0 = h = 5$ мм: 1 – мода $H_{01\delta}$ при $z = 0.09$; 2 – мода H_{011} при $z = 2.41$; 3 – мода H_{011} при $z = 0.09$

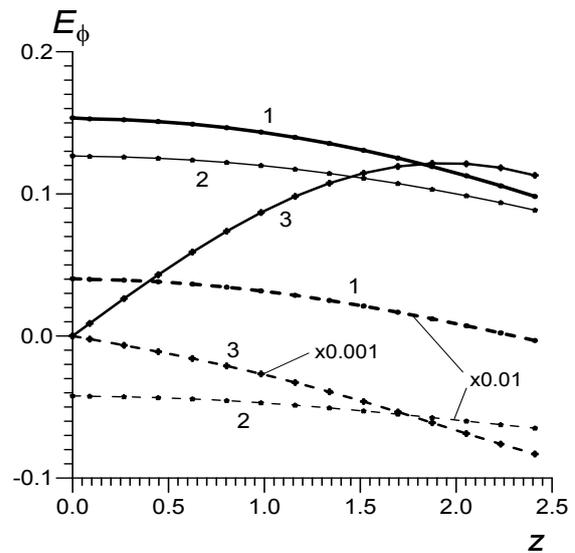


Рис. 6. Зависимость $\text{Re}(E_\varphi)$ (сплошные кривые) и $\text{Im}(E_\varphi)$ (штриховые кривые) от координаты z (мм) для ЦДР с $\varepsilon = 100$, $r_0 = h = 5$ мм: 1,2 – мода $H_{01\delta}$ при $\rho = 3.4$ и $\rho = 1.66$ мм; 2 – мода H_{011} при $\rho = 4.46$ мм

В **п. 3.2.2** приведены объемные и объемно-поверхностные ИУ и ИДУ. В **п. 3.2.3** получено уравнение для прямоугольного диэлектрического резонатора, основанное на тригонометрическом представлении объемных распределений поля. Указанное уравнение позволяет существенно уменьшить порядок задачи по сравнению с методом конечных элементов для объемного интегрального уравнения. В **п. 3.2.4** приведены численные результаты для прямоугольного диэлектрического резонатора, дана классификация его мод на основе симметрии. Показано, что наряду с высокочастотными модами существуют моды низкого порядка с малыми добротностями. Предложена классификация мод ПДР на основе симметрии (четности-нечетности по трем координатам) и введении комплексных индексов. В пределе $\varepsilon \rightarrow \infty$ (отсутствие вытекания энергии) предложенная классификация совпадает с традиционной. На рис. 7 даны результаты для ПДР. **П. 3.2.5** содержит краткие выводы по параграфу 3.2. **П. 3.3** содержит результаты по моделированию и модам многослойного концентрического сферического резонатора. Указанный резонатор хорошо соответствует модели Земля-ионосфера. Соответствующие результаты приведены на рис. 8. В **п. 3.3.1** обосновано и дано введение в проблему. В **п. 3.3.2** построена модель многослойного магнитоэлектрического многослойного КСР с использованием метода матриц передачи. **П. 3.3.3** как частный случай рассматривает однородный диэлектрический

сферический резонатор, производится сравнение с известными результатами. В **п. 3.3.4** приведено характеристическое уравнения многослойного концентрического сферического резонатора и получены его решения итерационными методами. В частности, определены резонансные частоты и добротности первых резонансов Шумана для системы Земля-ионосфера.

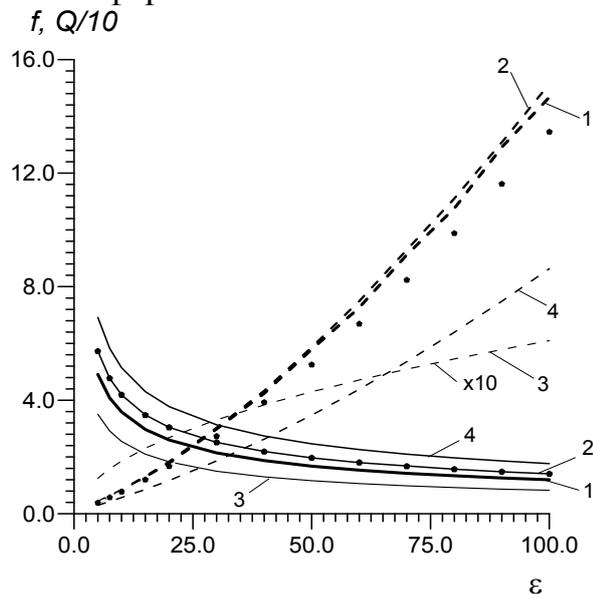


Рис. 7. Резонансные частоты f , ГГц (сплошные кривые) и добротности Q (штриховые кривые) мод ПДР в зависимости от ε : кривые 1, 2, 3 – соответственно моды $H_{\mu\mu\mu}^{eee}$, $H_{\mu\mu\delta}^{e\delta\delta}$, $H_{\mu\mu\delta}^{ooo}$ кубического ДР для $a = 1$ см; звездочки (* * *) и кривая 4 – мода $H_{\mu\mu\delta}^{eee}$ для $a_1 = a_2 = 1$, $a_3 = 0.5$ и $a_3 = 0.25$ см соответственно

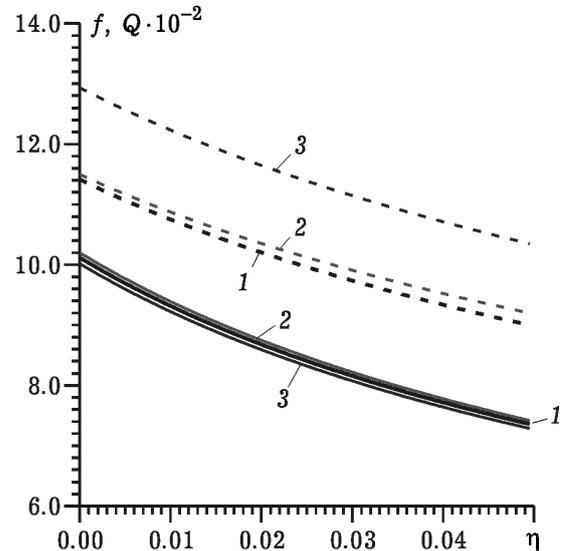


Рис. 8. Частота f , Гц (сплошные кривые) и добротность $Q \cdot 10^{-2}$ (штриховые кривые) первого резонанса Шумана в зависимости от влажности η : 1 и 3 – модель на основе импедансного алгоритма для $t_3 = 30$ и $t_3 = 40$ км; 2 – модель на основе матричного алгоритма для $t_3 = 30$ км

В **п. 3.3.5** дана стационарная теория возбуждения многослойного концентрического сферического резонатора радиальным диполем. **П. 3.3.6** содержит краткие выводы по параграфу 3.3. **П. 3.4** посвящен анализу мод прямоугольного и многослойных планарных диэлектрических волноводов. Используются интегральные уравнения диэлектрических волноводов в сочетании с методами сшивания и матриц передачи слоистых структур. В **п. 3.4.1** содержится введение в проблему и обосновывается важность решаемых задач. В **п. 3.4.2** методом ИУ анализируются H -моды однородного ПДВ. Обнаружены перескоки с одной дисперсионной ветви на другую при итерационном решении. В указанных областях перескоков использованы методы поиска комплексных корней. Найдены решения вблизи частотных отсечек. В **п. 3.4.3** на основе дисперсионных уравнений строятся итерационные алгоритмы и анализируются LM -моды многослойного ПДВ. Алгоритмы позволяют определять дисперсию во всем частотном диапазоне. В **п. 3.4.4** приведены численные результаты для основной LM -моды и высших мод. Волны LM_n с номерами $n > 0$ ниже частоты отсечки становятся быстрыми вытекающими, но на очень низких частотах замедление и потери на вытекание начинают расти, угол вытекания стремится к $\pi/2$, а волна становится медленной. В **п. 3.5** приведены

результаты для многослойных диэлектрических волноводов с полупроводниковыми слоями. Полупроводниковый слой моделировался как диэлектрик с плазмой носителей зарядов (электронов и дырок). Исследовано влияние плазменных частот и частот столкновений на дисперсионные свойства. Рассчитаны дисперсионные характеристики во всем диапазоне, включая и сверхнизкие частоты, где наблюдается переход от быстрой вытекающей волны к медленной с более сильным вытеканием.

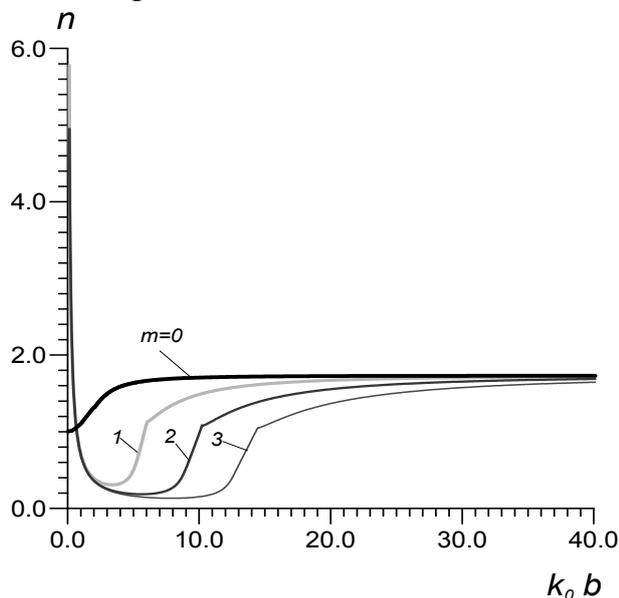


Рис. 9. Замедление волн LM_n в зависимости от нормированного волнового числа для плоскопараллельного ДВ с $\varepsilon = 3$

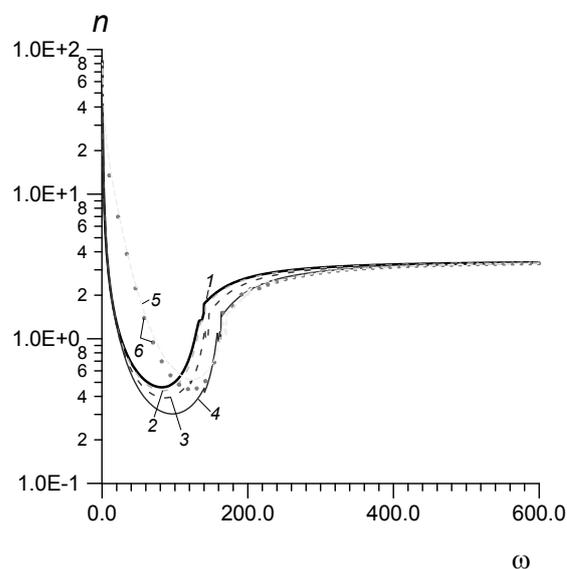


Рис. 10. Зависимость замедления $n = \gamma' / k_0$ от круговой частоты для ПДВ с полупроводниковыми слоями ($\omega_p = 500$, $\omega_c = 100$ и $\omega_c = 50$ ГГц)

П. 3.6 посвящен итерационному анализу мод, дисперсии и потерь в плоскопараллельном волноводе типа полый канал с многослойной оболочкой или с импедансными стенками. Указанные структуры имеют важное значение и широкое применение. В частности, рассмотрены квазипериодические (фотонно-кристаллические) оболочки. В **п. 3.6.1** содержится введение в проблему, обоснование значимости решаемых задач. В **п. 3.6.2** содержится постановка задач и приведены алгоритмы решения. **П. 3.6.3** содержит полученные численные результаты. В частности, анализируется дисперсия в плоскопараллельном волноводе с неидеальными стенками ниже частоты отсечки, а также в волноводе с многослойной оболочкой, включая квазипериодический случай. В **п. 3.6.4** содержатся краткие выводы по п. 3.6. **П. 3.7** посвящен моделированию нелинейного туннелирования электромагнитной волны через слой с кубической нелинейностью и насыщением диэлектрической проницаемости. Указанная задача соответствует прохождению сильной электромагнитной волны через нелинейный плазменный слой полупроводника. Рассмотрены феноменологические зависимости диэлектрической проницаемости от квадрата модуля поля с кубической (керровской) нелинейностью и нелинейностью с насыщением в сильном поле. При этом насыщения достигает плазменная частота (концентрация носителей). В **п. 3.7.1** содержится введение в проблему и обосновывается ее актуальность.

В п. 3.7.2 содержится постановка задачи, приводятся дифференциальные и интегральные уравнения, а также развиваются новые методы интегрирования дифференциальных уравнений и решения интегральных уравнений. Интегрирование основано на интерполяции интеграла с применением метода рядов и получения формул высокого порядка. В п. 3.7.3 приводятся численные результаты и их сравнение с известными методами. Показана возможность ограничения мощности сильной электромагнитной волны при ее туннелировании через слой с насыщением диэлектрической проницаемости рис. 11. П. 3.7.4 содержит краткие выводы по п. 3.7. В п. 3.8 содержатся выводы по п. 3.8.

Глава 4 посвящение моделированию и гомогенизации ФКС. Использован подход на основе периодических ФГ и ИДУ. Рассмотрены также квазипериодические структуры, в том числе плоскостойкие и ФКВ. В п. 4.1 содержится введение в проблему ФКС и их гомогенизацию. В п. 4.2 изложены методы построения дисперсионных уравнений периодических ФК с магнитодиэлектрическими и металлическими включениями. П. 4.3 содержит описание методов гомогенизации и решения обратных задач для ФКС. В п. 4.4 рассмотрены и численно исследованы фильтрующие структуры на основе квазипериодических ФК. На рис. 12 представлено искажение дисперсионных кривых в одномерном плоскостойком ФК с активным и диссипативным диэлектрическими слоями. При этом зона bandgap исчезает, но для некоторых значений компоненты волнового вектора распространение не имеет места.

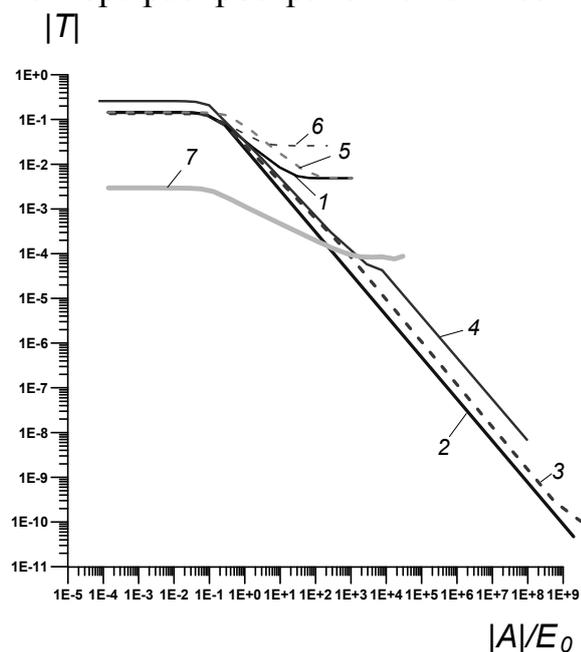


Рис. 11. Ограничение мощности волны в полупроводниковой плазме на длине $d = 2$ см, различных параметрах и в зависимости от отношения амплитуды к внутреннему полю

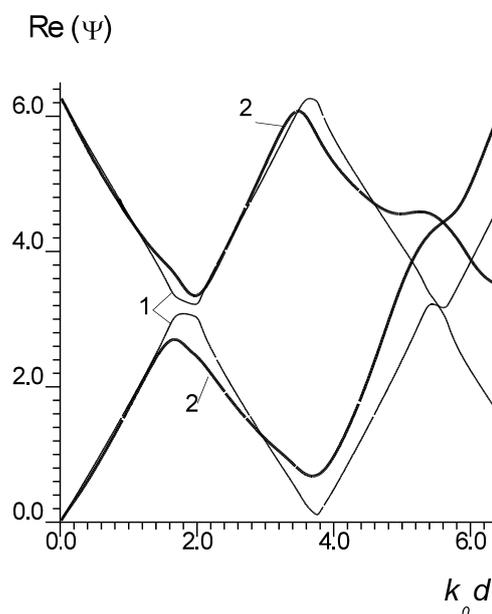


Рис. 12. Искажение дисперсии в 1-D диэлектрическом ФК с диссипативным и активным слоями в периоде при $d_1 = d_2 = d/2$, $\varepsilon'_1 = 2$, $\varepsilon'_2 = 4$: кривые 1 - $\varepsilon''_1 = 0.2$, $\varepsilon''_2 = -0.4$; кривые 2 - $\varepsilon''_1 = -1.0$, $\varepsilon''_2 = 2.0$

П. 4.5 содержит результаты по ФКВ разной конфигурации. Рассмотрены дефекты в 2-D ФК, структуры с планарной оболочкой и 2-D ФК с конечной квазипериодической оболочкой. П. 4.5.1 дает введение

в проблему. В п. 4.5.2 получены новые интегральные уравнения 2-D ФК. В п. 4.5.3 выведены дисперсионные уравнения бесконечного 2-D ФК, включая случай наличия волнового канала вдоль одной из осей. В п. 4.5.4 получен новый вид интегрального уравнения для ФКВ с неограниченной квазипериодической оболочкой. В п. 4.5.5 приведено интегральное уравнение ограниченного ФКВ, основанное на обычной ФГ. В п. 4.5.6 получены численные результаты для ФКВ, демонстрирующие резонансный полосовой характер погонных потерь на вытекание и постоянных распространения в зависимости от частоты в широком частотном интервале. Результаты получены путем итерационного решения дисперсионного уравнения и представлены на рис. 13. П. 4.6 посвящен электродинамическому анализу электрофизических свойств металлических ФК рис. 14. В п. 4.6.1 содержится введение и обоснование важности исследования металлических ФК. П. 4.6.2 содержит постановку задачи для проволочных металлических ФК в виде прямых проволочных включений. Рассматривается также общая задача о включениях произвольной формы. П. 4.6.3 содержит постановку задачи для одноосные и двухосные МФК с неконтактирующими проволочками конечной длины и большой (бесконечной) длины (в случае 2-D ФК).

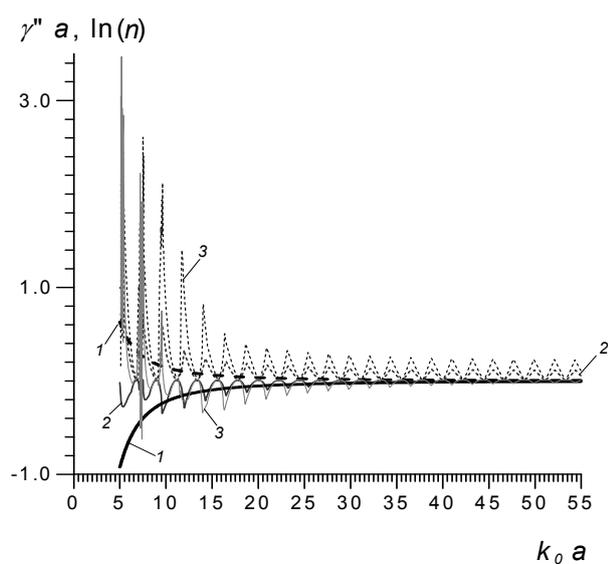


Рис. 13. Логарифм замедления (сплошные кривые) и нормированные потери (штриховые кривые) первой HE -моды полого канала размера $a \times a$ со сплошной бесконечной оболочкой (1), полого канала с конечной одномерной фотонно-кристаллической оболочкой (2) и двумерного ФКВ. $\varepsilon = 3.0 - 0.05j$

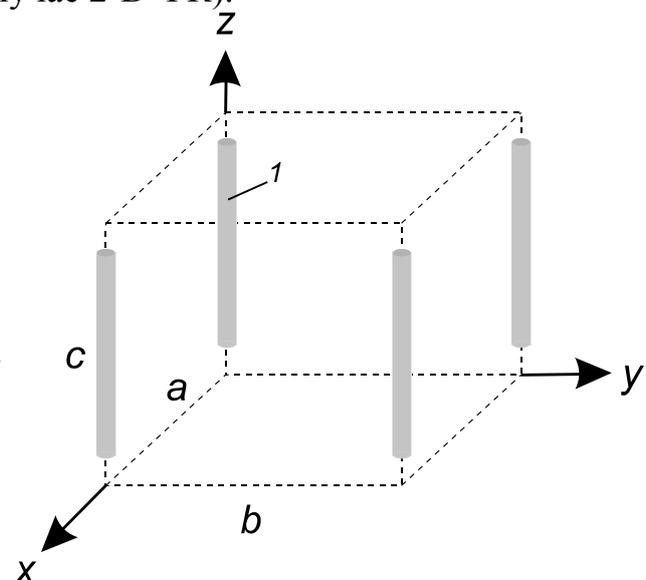


Рис. 14. Общий вид одноосного 3-D проволочного МФК с тонкими проволочками конечной длины

В п. 4.6.4 приведены численные результаты для дисперсии (зонной структуры) рассмотренных металлических ФК и получены тензоры их диэлектрической проницаемости. Используются методы гомогенизации на основе вычисления дипольного момента и путем сравнения дисперсии с дисперсией в гомогенной среде. Показана возможность наличия отрицательной компоненты тензора диэлектрической проницаемости в зоне непропускания при идеальной проводимости проволочек. На рис. 15 даны

примеры расчета зонной структуры, а на рис. 16, 17 приведены результаты гомогенизации. В п. 4.7 содержатся выводы по главе 4.

В заключении сформулированы основные выводы настоящей работы, формулируются основные полученные результаты и подводится итог проведенных исследований.

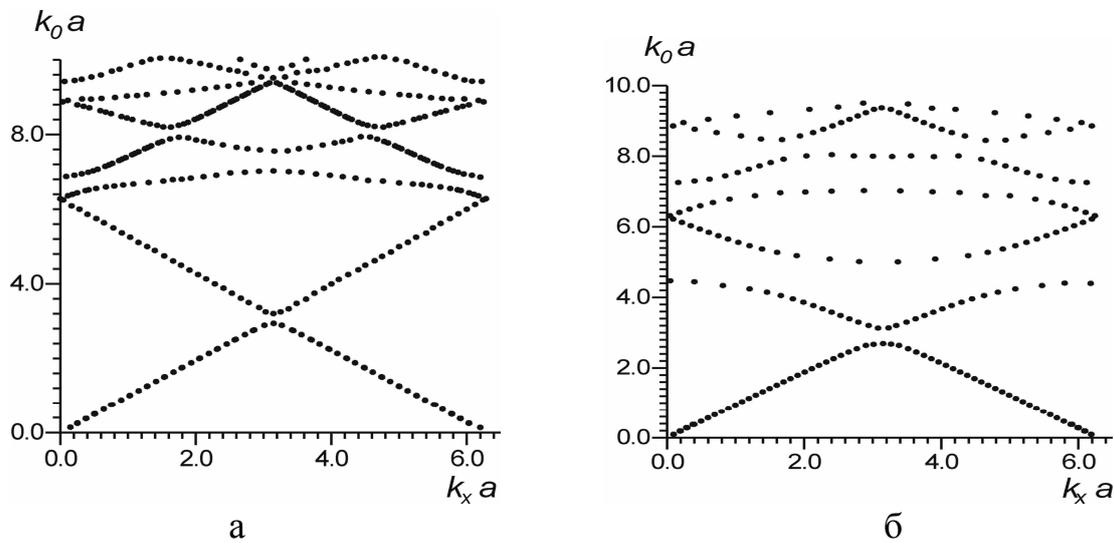


Рис. 15. Зонная структура 3-D-P проволочного метаматериала при $k_z = k_y = 0$, $l/a = 0.6$ для $r/a = 0.01$ (а) и $r/a = 0.06$ (б)

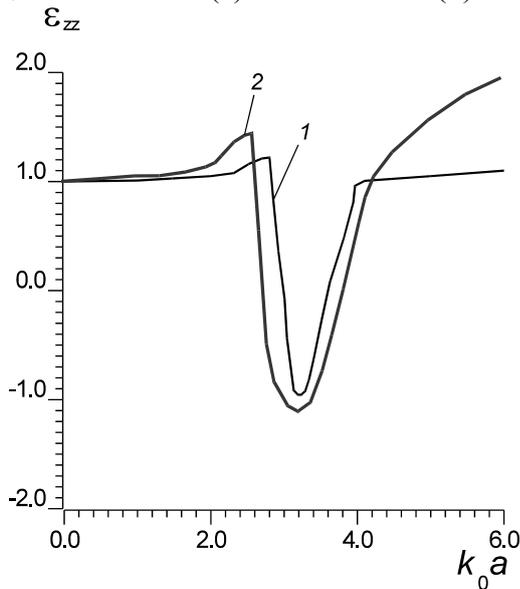


Рис. 16. Значение компоненты ϵ_{zz} в зависимости от нормированной частоты при движении по нижней дисперсионной ветви с переходом при $k_x a = \pi$, $k_y = 0$ на следующую прямую дисперсионную ветвь для рис. 6: а – кривая 1, б – кривая 2

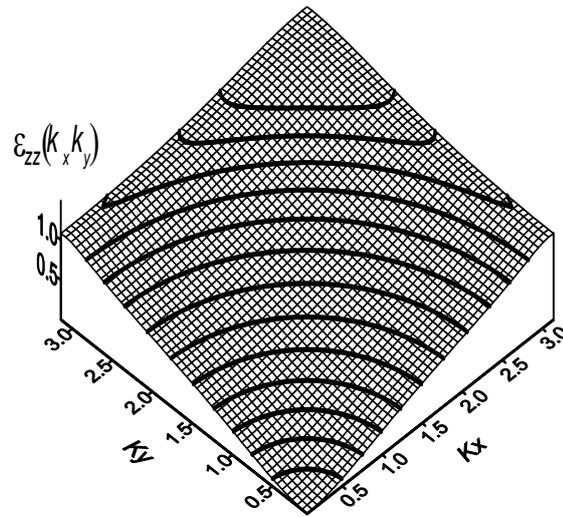


Рис. 17. Компонента ϵ_{zz} в зависимости от компонент волновых векторов в основном секторе первой зоны при $k_z = 0$ для 2-D МФК с бесконечными проволочками

Основные результаты диссертационной работы

1. Разработаны итерационные алгоритмы решения однородных и неоднородных операторных уравнений с определением собственных значений путем достижения экстремума функционала на основе совместных

итерационных процедур типа минимальных невязок с линеаризацией, выполненной замораживанием значений на предыдущем шаге итерации.

2. Получены новые виды интегродифференциальных уравнений с понижением особенности ядер относительно полей и потенциалов в объеме ДР и на поперечном сечении магнитоэлектрических волноводов, на основе которых исследованы методом итерационного решения моды указанных структур с учетом излучения и потерь. Показано, что использование действительных и тем более целых индексов для классификации мод является приближением, поскольку указанные индексы комплексные. Показано наличие высокодобротных и низкодобротных мод. Исследованы моды диэлектрических, металлодиэлектрических и фотонно-кристаллических волноводов с импедансными, многослойными, квазипериодическими и нелинейными оболочками. Для ДВ с сердцевинной расчеты демонстрируют переход от медленных поверхностных мод ДВ к быстрым вытекающим модам при понижении частоты, а затем опять к медленным модам с очень высоким уровнем вытекания при дальнейшем понижении частоты. Для волноводов типа полый канал, ФКВ и канал с металлической оболочкой на высоких частотах вытекание слабое, волна в основном распространяется в канале; на сверхнизких частотах угол вытекания близок к 90 градусам, волна становится медленной и распространяется в основном в оболочке. Для квазипериодической оболочки затухание носит резонансный характер при изменении частоты.

3. Исследовано линейное и нелинейное туннелирование через плоскостойкие структуры с диссипацией и активными слоями, а также через нелинейный плазменный полупроводниковый слой с насыщением диэлектрической проницаемости (концентрации носителей) в сильном поле. Показана возможность ограничения мощности сильной электромагнитной волны.

4. Развита методика гомогенизации фотонных кристаллов, исследованы различные фотонно-кристаллические структуры, в том числе металлические проволочные фотонные кристаллы. Определены их электрофизические параметры. В частности, показана возможность наличия отрицательных компонент тензора диэлектрической проницаемости у одноосного и двухосного проволочного металлического ФК с идеально проводящими проволочками. Указанные параметры получены для структур, где бианизотропией и магнитными свойствами можно пренебречь. В общем случае проницаемости и два тензора кросс-поляризации, описывающие ФК, зависят от частоты и волнового вектора, т.е. от дисперсионной поверхности (ветви). В зоне непропускания волновой вектор может иметь мнимые компоненты, что соответствует отрицательным значениям компонент постоянных распространения. Наличие потерь, конечность структуры, нарушение периодичности или монохроматичности приводят к размыванию (исчезновению) зон непропускания (bandgap). При этом волновые векторы и проницаемости становятся комплексными. Возможность распространения с большим затуханием волн в bandgap приводит к тому, что осуществляется переход с одной дисперсионной ветви на другую через указанные зоны,

причем групповая скорость изменяется от очень малых значений на их границе к весьма большим значениям в центре, многократно превышающим скорость света. Наличие диссипативных и активных диэлектрических слоев в одномерных ФК существенно искажает дисперсионную картину, при этом зона непропускания исчезает, но появляются запрещенные зоны для компонент волнового вектора.

Список публикации автора по теме диссертации

I. Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Давидович М.В., Стефюк Ю.В., Шиловский П.А. Металлические проволочные фотонные кристаллы. Анализ электрофизических свойств // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 3. С. 7–14.
2. Давидович М.В., Стефюк Ю.В. Итерационные методы и алгоритмы для интегральных уравнений диэлектрических резонаторов // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 4. С. 1–14.
3. Давидович М.В., Стефюк Ю.В. Интегральные уравнения для фотонно-кристаллических волноводов // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 109. № 4. С. 643–655.
4. Давидович М.В., Стефюк Ю.В. Нелинейное прохождение электромагнитной волны через слой с квадратичной и дробно-полиномиальной зависимостями диэлектрической проницаемости // ПНД. 2010. Т. 18. № 3. С. 160–177.
5. Давидович М.В., Стефюк Ю.В. Волны плоскопараллельного волновода типа «канал с многослойными стенками» // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 1. С. 31–40.
6. Альтшулер Е.Ю., Давидович М.В., Стефюк Ю.В. LM-волны полупроводниково-диэлектрического плоскостоего волновода с диссипативными и активными слоями РЭ. 2010. Т. 55. № 1. С. 25–32.
7. Давидович М.В., Стефюк Ю.В. Моды многослойного концентрического сферического резонатора // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. № 4. С. 18–27.

II. Статьи в других реферируемых периодических изданиях, сборниках и в трудах международных научных конференций:

8. Давидович М.В., Стефюк Ю.В. Интегральные уравнения фотонно-кристаллических волноводов // Известия Саратовского университета. Новая серия. 2009. Серия Физика. Т. 9. В. 1. С. 2–17.
9. Davidovich M.V., Bushuev N.A., Stephuk J.V. Dispersion of open helix // Modeling in Applied Electromagnetics and Electronics. Saratov University Press. 2011. Issue 10. P. 47–56.
10. Davidovich M.V., Stephuk J.V., Shilovsky P.A. Metallic wire photonic crystals: analysis of electrophysical properties // Modeling in Applied Electromagnetics and Electronics. Saratov University Press. 2011. Issue 10. P. 79–92.
11. Давидович М.В., Савин А.Н., Стефюк Ю.В. Металлические фотонные кристаллы: анализ электрофизических свойств // Труды 21-й Международной Крымской конференций СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (CriMiKo'2011). Севастополь, Украина. 2011. P. 289–290. ISBN 978-966-335-355-5. IEEE Catalog Number: CFP11788-PRT.
12. Давидович М.В., Стефюк Ю.В., Шиловский П.А., Явчуновская С.В. Материальные параметры металлических проволочных фотонных кристаллов // Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2011. Труды конференции, Таганрог, ТРТУ. 2011. С. 246–250.

13. Davidovich M.V., Stephuk J.V. Modes of rectangular and plane-parallel waveguides with impedance walls // *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. Proceedings of 13-th International Conference (MMET'2010)*, September 6 – 8, 2010. Kiev, Ukraine. 978-1-4244-8860-5/10/\$26.00 © 2010 IEEE. 4 P.
14. Davidovich M.V., Stephuk J.V. Iteration methods for analysis of dielectric waveguides and resonators // *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. Proceedings of 13-th International Conference (MMET)*, September 6 – 8, 2010. Kiev, Ukraine. 978-1-4244-8860-5/10/\$26.00 © 2010 IEEE. 4 P.
15. Давидович М.В., Савин А.Н., Стефюк Ю.В. Гомогенизация периодических метаматериалов в виде проволочных включений // *Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2009. Труды конференции, Таганрог, ТРТУ. 2009. С. 370–375.*
16. Давидович М.В., Савин А.Н., Стефюк Ю.В. Прямой метод высокого порядка интегрирования нелинейного неоднородного одномерного уравнения Гельмгольца // *Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2009. Труды конференции, Таганрог, ТРТУ. 2009. С. 331–335.*
17. Davidovich M.V., Stephuk J.V., Shilin I.V. Waves in active and dissipative flat-layered periodic and pseudo-periodic structures // *Proc. of SPIE. 2007. V. 6537. P. 65370F-65370K.*
18. Davidovich M.V., Stephuk J.V. H- and LM- modes of rectangular and square section dielectric waveguides // *Modeling in Applied Electromagnetics and Electronics. Saratov University Press. 2009. Issue 9. P. 13–25.*
19. Davidovich M.V., J.V. Stephuk., Yu.S. Myasoedov. New approach for pulses in structures with dispersive nonlinear inhomogeneous media // *Modeling in Applied Electromagnetics and Electronics. Saratov University Press. 2007. Issue 8. P. 9–21.*
20. Davidovich M.V., Stephuk J.V. Homogenization of periodic metamaterials // *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. Proceedings of 12-th International Conference (MMET'2008). Odessa, Ukraine. 2008. P. 527–529.*
21. Davidovich M.V., J.V. Stephuk. Homogenization of periodic wire and dielectric metamaterials // *2008 International Workshop on Metamaterials, Meta08. Nov. 9-12, Nanjing, China. 2008. P. 251–254.*
22. Davidovich M.V., J.V. Stephuk. H-modes of rectangular dielectric waveguide // *Proceedings of International conference Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2008). 2008. SSTU. P. 308–312.*
23. Davidovich M.V., J.V. Stephuk. Integral and integrodifferential equations for quasiperiodic structures // *Proceedings of International conference Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2008). 2008. SSTU. P. 312–316.*
24. Davidovich M.V., J.V. Stephuk. Homogenization of periodic artificial media // *Modeling in Applied Electromagnetics and Electronics. Saratov University Press. 2007. Issue 8. P. 67–75.*
25. Давидович М.В., Шилин И.В. Стефюк Ю.В. Волны в активных и диссипативных плоскостойких периодических и квазипериодических одномерных фотонных кристаллах // *Проблемы оптической физики. Материалы 10-й международной школы по оптике, лазерной физике и биофизике. Саратов: изд-во «Новый ветер». 2007. С. 150–153.*

III. тезисы докладов международных школ и семинаров:

26. Давидович М.В., Стефюк Ю.В. Итерационные методы и алгоритмы для интегральных уравнений диэлектрических резонаторов и волноводов // *Материалы XIX международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике. 2009. Саратов: Издательский центр «ПАТА». С. 36.*

Подписано к печати 28.09.2012 года. Формат 60x48 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,5
Тираж 100 экз. Заказ № 240-Т

Отпечатано в типографии СГУ
Саратов, Большая Казачья 112-а
Тел. (8452) 27-33-85