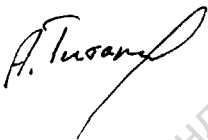


На правах рукописи

Титаренко Алексей Александрович

Исследование неоднородных и продольно-нерегулярных
металло-диэлектрических электродинамических структур
и расчет функциональных узлов на их основе

05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии



Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород - 2002

Работа выполнена на кафедре “Физика”
Нижегородского государственного технического университета

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент В.М. Темнов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Громов Е.М.
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, Козлов В.А.

Ведущая организация:

Нижегородский научно-исследовательский институт “Кварц”

Защита состоится 18 декабря 2002г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.165.01 в Нижегородском государственном техническом университете по адресу: 603600, г. Н.Новгород, ГСП-41, ул.Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НГТУ.

Автореферат разослан ноября 2002г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В.А. Калмык

2003-A
9701

Общая характеристика работы

Актуальность темы: Современный этап развития научных и промышленных отраслей, связанных с прикладной электродинамикой, обладает ярко выраженной тенденцией к продвижению в область более высоких частот, к разработке принципиально новых функциональных узлов и к ужесточению требований к характеристикам уже существующих. Широкое применение в технике СВЧ, КВЧ и устройствах интегральной оптики находят такие металло-диэлектрические и диэлектрические структуры, как полосковые и щелевые линии, планарные и волоконные световоды, гребневые волноводы, а также функциональные узлы на их основе.

Исследование электродинамических структур такого рода требует создания высокоэффективных и теоретически обоснованных методов расчета, позволяющих получать достоверные электрические характеристики рассматриваемых структур и на их основе изучать физическую природу протекающих в них процессов. Этого можно достичь только тогда, когда соответствующие краевые задачи формулируются и решаются в строгой электродинамической постановке, ибо приближенные методы расчета не всегда приводят к адекватному описанию реальных явлений.

На строгом электродинамическом уровне подробно изучены планарные и волоконные оптические световоды, а также круглые диэлектрические волноводы с простейшим ступенчатым профилем показателя преломления [Л1-Л4], частично исследованы аналогичные многоступенчатые структуры [Л.1]. Получены решения для поверхностных и вытекающих волн [Л.6, Л.7], а также комплексных волн без потерь энергии [Л.8, Л.9]. Однако детального исследования волновых процессов в волноводах и световодах с произвольным кусочно-градиентным профилем показателя преломления до настоящего времени не проводилось.

Обширный класс диэлектрических направляющих структур составляют планарные волноводы конечной ширины: пленочные волноводы, нагруженные полоской, гребневые волноводы, профильно-пленочные волноводы и т.д. Сюда же относятся и регулярные структуры, состоящие из связанных электромагнитным полем волноводов. Волноведущие свойства этих структур на строгом электродинамическом уровне определяются, в основном, с помощью численных конечно-разностных методов [Л.10] и численно-аналитических методов [Л.11]. Численные методы, позволяющие рассчитывать структуры со сложной границей раздела сред, мало пригодны для расчета излу-

чающих волн, а вторая группа методов применяется преимущественно к структурам с координатными границами.

Таким образом, возникает задача разработки достаточно универсального подхода, объединяющего возможности известных методов, и максимально приспособленного для реализации на ЭВМ, т.е. обладающего высоким быстродействием и достаточной точностью расчетов. К этому следует добавить еще одно важное требование, заключающееся в необходимости вычисления спектра собственных волн волноводов, поля которых в поперечном сечении обладают полнотой и базисностью. У открытых волноводов спектр волн содержит непрерывную составляющую, что не всегда удобно для решения дифракционных задач, возникающих при анализе продольно-нерегулярных структур. Поэтому бывает целесообразно вместо открытой рассматривать экранированную структуру с достаточно удаленным экраном, но при этом возникают вопросы об адекватном моделировании, под которым подразумевается влияние экрана на основные интегральные характеристики исходной структуры: коэффициенты отражения, прохождения и преобразования волн, а также потери на излучение. Если принять во внимание, что в СВЧ и оптическом диапазонах продольно-нерегулярные структуры содержат, как правило, плавные переходы, расчет которых сводится к решению сложной электродинамической задачи с некоординатными границами, то разработка эффективного подхода к анализу таких структур очень актуальна. Следует заметить, что задачи о плавных переходах решаются в настоящее время или методом поперечных сечений [Л.12] или неполным методом Галеркина [Л.13]. Однако первый из этих методов эффективен при медленно изменяющихся параметрах вдоль оси волновода, а второй требует специфических подходов для повышения устойчивости решения [Л.14].

В СВЧ диапазоне применяются различные методы расчета микрополосковых и щелевых линий передачи [Л.15-Л.18], наиболее эффективными из которых являются методы, максимально полно учитывающие особенности задачи. К ним можно отнести метод сингулярных интегральных уравнений в сочетании с полуобращением матричного или интегрального оператора [Л.19]. Для расчета нерегулярностей в линиях передачи наиболее часто используется модель Олинера [Л.17, Л.18], заменяющая открытую структуру экранированной и позволяющая приближенно учитывать влияние нерегулярностей в одноволновом режиме работы передающих линий. Строгие и эффективные

подходы к расчету нерегулярностей в полосково-щелевых структурах находятся в процессе разработки, наиболее перспективные из существующих представлены в [Л.20].

Представляется, что все перечисленные выше актуальные задачи могут быть успешно решены при использовании одного достаточно универсального метода – метода частичных областей (МЧО). Действительно, метод достаточно прост, особенно при алгебраизации задачи о скачкообразных нерегулярностях, т.к. основывается на свойстве ортогональности собственных волн волновода в поперечном сечении [Л.21], обоснован теоретически [Л.22], в ряде случаев позволяет оценить асимптотику получаемых решений – коэффициентов разложений полей по собственным волнам [Л.23], устойчив при практической реализации [Л.24]. Алгоритмы, созданные на основе МЧО, чрезвычайно удобны для использования в системах автоматизированного проектирования (САПР) для расчета различных электродинамических устройств.

Цель диссертации.

Целью диссертации является исследование на основе МЧО спектров волн ряда базовых металлodieлектрических направляющих структур, решение дифракционных задач, практически важных при проектировании устройств СВЧ, КВЧ и оптического диапазонов, а также построение эффективных алгоритмов для САПР, позволяющих проводить строгий электродинамический расчет базовых структур и функциональных узлов различного назначения.

Методы исследования.

Все представленные теоретические результаты были получены на основе метода частичных областей (МЧО) и метода частичных пересекающихся областей (МЧПО). Теоретические результаты проверены экспериментально по стандартным гостированным методикам.

Научная новизна

- На основе МЧО проведен анализ направляющих свойств многослойных планарных и круглых диэлектрических волноводов. Впервые получены простые рекуррентные формулы, позволяющие проводить строгий электродинамический расчет многослойных планарных волноводов с произвольным числом слоев.
- Подробно исследованы направляющие свойства круглых и планарных многослойных диэлектрических структур. Дана физическая трактовка поведению

вблизи Морсовских точек дисперсионных характеристик структур с немонотонным профилем показателя преломления.

- На основе МЧО развит метод расчета “полуоткрытых” диэлектрических волноводов с произвольной формой поперечного сечения.
- Рассмотрены волны с комплексными значениями волновых чисел в прямоугольном экранированном и “полуоткрытом” волноводах с частичным диэлектрическим заполнением.
- Разработана методика строгого электродинамического расчета многоступенчатых волноводных переходов.
- Решена задача дифракции электромагнитной волны на стыке двух волноводно-щелевых линий с учетом спектра комплексных волн.
- На основе разработанных электродинамических моделей коаксиально-радиального и радиально-полоскового переходов решена задача синтеза многоканального лучевого делителя/сумматора мощности по требуемым характеристикам.

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

- использованием при расчете дисперсионных характеристик направляющих структур и при решении дифракционных задач теоретически обоснованного метода частичных областей;
- численной проверкой выполнения граничных условий “сшивания” полей на границах частичных областей;
- согласованием полученных результатов с экспериментальными данными;
- разработкой на основе проведенных исследований усилителя высокой мощности S-диапазона, созданного на основе радиального сумматора/делителя мощности.

Практическая ценность работы заключается:

- в получении простых рекуррентных формул, позволяющих проводить строгий электродинамический анализ планарных и круглых многослойных диэлектрических волноводов с произвольным числом слоев;

- в разработке эффективных алгоритмов расчета дисперсионных характеристик диэлектрических волноводов произвольного поперечного сечения, заключенных между двумя идеально проводящими бесконечными плоскостями;
- в полученных численных результатах, позволяющих сделать выводы о принципиальных свойствах рассматриваемых структур, на основе которых может быть создан ряд новых функциональных узлов СВЧ, КВЧ и оптического диапазона;
- в развитии методики расчета плавных и многоступенчатых переходов между волноводами.
- в расчете конструкций делителей/сумматоров, используемых при создании усилителей высокой мощности S-диапазона на полевых транзисторах.

Реализация и внедрение результатов

Алгоритмы и программные комплексы, разработанные в ходе выполнения диссертационной работы, внедрены в ФГУП «НПП «Салют» и Институт Химии Высокоочищенных Веществ РАН, где они используются при проектировании СВЧ устройств и при проведении измерений параметров оптоволокна. На основе расчетов, проведенных в ходе выполнения диссертации, в ФГУП «НПП «Салют» был создан усилитель высокой мощности S-диапазона на полевых транзисторах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика строгого электродинамического расчета планарных и круглых многослойных диэлектрических волноводов.
2. Результаты исследования свойств планарных и круглых диэлектрических волноводов с градиентным профилем показателя преломления.
3. Метод расчета диэлектрических волноводов с произвольной формой поперечного сечения.
4. Результаты исследования динамики изменения распределения потоков энергии в связанных диэлектрических линиях передачи вблизи Морсовских критических точек.
5. Алгоритм расчета многоступенчатых и плавных переходов в диэлектрических волноводах.

6. Алгоритм расчета стыка волноводно-щелевых линий с учетом комплексных волн; рекомендации по правилам учета комплексных волн в дифракционных задачах.
7. Алгоритм расчета и проектирования мощных усилителей СВЧ-диапазона на основе радиальных сумматоров/делителей мощности.

Апробация работы: Результаты работы докладывались и обсуждались на:

- VI Международной конференции "Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ", Самара, 1999;
- 55-й научной сессии, посвященной дню радио "Радиотехника, электроника и связь на рубеже тысячелетия", Москва, 2000;
- Научно-технической конференции факультета информационных систем и технологий ФИСТ, Н.Новгород, 2000;
- МНТК "Физика и технические приложения волновых процессов" – Самара, 2001;
- Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 65-летию факультета информационных систем и технологий НГТУ, Н.Новгород, 2001;
- 56-й научной сессии, посвященной дню радио, Москва, 2001;
- 11-й Международной конференции КрыМиКо'2001, Севастополь, 2001;
- 57-й научной сессии, посвященной дню радио, Москва, 2002;
- региональном молодежном научно-техническом форуме, Н.Новгород, 2002;
- 10-й Международной школе-семинаре "Электродинамика и техника СВЧ, КВЧ и оптических частот", Москва, 2002.

Объем и структура диссертации Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 235 страниц основного текста, 15 страниц списка литературы (157 наименований), 65 рисунков, 8 таблиц, 2 страницы приложений, содержащих 2 акта внедрения диссертации.

Содержание работы

Во введении проводится анализ современного состояния вопроса, ставится цель диссертационной работы, обосновывается ее актуальность, формулируются задачи исследований, определяются новизна полученных результатов и их практическая цен-

ность, формулируются основные положения, выносимые на защиту, кратко излагаются результаты диссертации.

В первой главе диссертации: приводятся результаты исследования направляющих свойств многослойных диэлектрических волноводов.

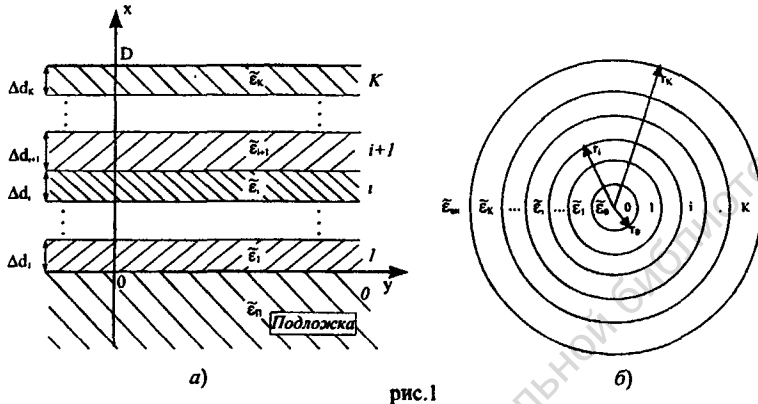


рис.1

На основе метода частичных областей проведен строгий электродинамический расчет многослойного планарного диэлектрического волновода с произвольным числом слоев (рис.1а). Поле в каждой из частичных областей стандартным образом представляется в виде общих решений соответствующих краевых задач, после чего используется условие равенства тангенциальных компонент поля на границах раздела областей. В результате получается система линейных однородных алгебраических уравнений, приравнивание к нулю определителя которой (Δ) дает дисперсионное уравнение.

В главе предлагаются нестандартные математические преобразования, позволяющие “свернуть” определитель полученной СЛАУ и записать его в следующем виде:

Для Н-волн:

$$\Delta = (-1)^K \cdot (\psi_{2K} - i\psi_{2K+1}p),$$

где величины ψ определяются из рекуррентных соотношений:

$$\psi_0 = -ig, \quad \psi_1 = 1,$$

$$\psi_{2j} = \psi_{2j-2} \cdot \cos \alpha_j \Delta d_j + \psi_{2j-1} \cdot \alpha_j \cdot \sin \alpha_j \Delta d_j,$$

$$\psi_{2j+1} = -\psi_{2j-2} \cdot \frac{\sin \alpha_j \Delta d_j}{\alpha_j} + \psi_{2j-1} \cdot \cos \alpha_j \Delta d_j, \quad j = 1, 2, \dots, K,$$

$$g = \sqrt{\omega^2 \epsilon_n \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2}, \quad p = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2}, \quad \alpha_j = \sqrt{\omega^2 \epsilon_j \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2}.$$

Рекуррентные формулы такого рода получаются и в случае расчета Е-волн.

По аналогичной схеме проводится строгий электродинамический расчет и многослойного круглого диэлектрического волновода (рис.1б). В этом случае определитель получаемой СЛАУ удается привести к следующему виду:

Для Н-волн:

$$\Delta = \left(\Gamma_{2K} - \gamma \cdot \Gamma_{2K+1} \frac{H_0^{(2)}(\gamma r_K)}{H_0'^{(2)}(\gamma r_K)} \right) \cdot \left(-\frac{2}{\pi} \right)^K \cdot \prod_{j=1}^K \Gamma_{j-1},$$

где

$$\Gamma_0 = J_0(\alpha_0 r_0), \quad \Gamma_1 = \frac{1}{\alpha_0} J_0'(\alpha_0 r_0),$$

$$\Gamma_{2j} = \alpha_j (\Phi_j \Gamma_{2j-2} + \alpha_j \Psi_j \Gamma_{2j-1}),$$

$$\Gamma_{2j+1} = \Phi_j' \Gamma_{2j-2} + \alpha_j \Psi_j' \Gamma_{2j-1} \quad (j=1, 2, \dots, K).$$

Здесь использованы обозначения:

$$\Psi_j(r) = J_0(\alpha_j r_{j-1}) Y_0(\alpha_j r) - J_0(\alpha_j r) Y_0(\alpha_j r_{j-1})$$

$$\Phi_j(r) = \alpha_j (J_0(\alpha_j r) Y_0'(\alpha_j r_{j-1}) - J_0'(\alpha_j r_{j-1}) Y_0(\alpha_j r))$$

$$\Psi_j'(r) = J_0(\alpha_j r_{j-1}) Y_0'(\alpha_j r) - J_0'(\alpha_j r) Y_0(\alpha_j r_{j-1})$$

$$\Phi_j'(r) = \alpha_j (J_0'(\alpha_j r) Y_0'(\alpha_j r_{j-1}) - J_0'(\alpha_j r_{j-1}) Y_0'(\alpha_j r)),$$

$$\gamma = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2}, \quad \alpha_j = \sqrt{\omega^2 \epsilon_j \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2}.$$

Рекуррентные формулы такого рода получаются и в случае расчета Е-волн.

Приравнивание определителей получаемых СЛАУ нулю ($\Delta = 0$) дает дисперсионные уравнения, строго описывающие направляющие свойства рассмотренной структуры. При этом никаких ограничений на параметры рассматриваемых структур не накладывается – число слоев может быть произвольным, а диэлектрическая проницаемость каждого слоя может быть комплексной величиной.

Полученные дисперсионные уравнения позволяют проводить анализ многослойных и градиентных волноводов с произвольным профилем показателя преломления, который может включать в себя как участки с плавным изменением диэлектрической проницаемости (они представляются с помощью многоступенчатой модели с достаточно большим числом ступеней), так и скачкообразные изменения показателя преломления.

В главе подробно исследуются направляющие свойства планарных и круглых диэлектрических волноводов с различной формой профиля показателя преломления. В частности, проводится сравнительное исследование волноводов со ступенчатым и с параболическим профилем показателя преломления, демонстрирующее снижение степени межмодовой дисперсии в волноводах с параболическим профилем показателя преломления. Подробно исследуется практически важный вопрос о влиянии “приосевого провала” показателя преломления на направляющие свойства круглых диэлектрических волноводов.

Особое внимание уделяется анализу направляющих структур с немонотонным профилем показателя преломления. Показывается, что наличие в дисперсионных характеристиках волн таких структур областей резкого изменения хода дисперсионных кривых (Морсовских точек) обусловлено перераспределением энергии по поперечному сечению волновода.

Во второй главе диссертации: предлагается метод строгого электродинамического анализа диэлектрических волноводов с произвольной формой поперечного сечения, находящихся между двумя бесконечными идеально проводящими плоскостями (рис.2). Разработанный подход к решению краевой задачи основан на МЧО и на аппарате LM и LE-мод и заключается в следующем: поля в каждом слое рассматриваемой системы представляются в виде разложений по собственным функциям соответствующих краевых задач, после чего проекционным методом производится процедура их сшивания на границах раздела частичных областей. На основе данного подхода создан эффективный алгоритм, позволяющий проводить расчет диэлектрических волноводов, подобных изображенному на рис.2, со сколь угодно большим числом слоев K.

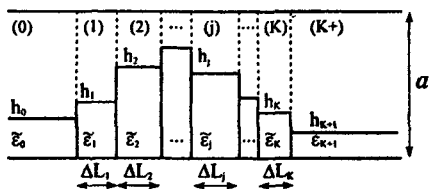


рис.2

Показана возможность расчета диэлектрических волноводов с плавно изменяющимся профилем поперечного сечения, который моделируется ступенчатой кривой с достаточно большим числом ступеней. Проведенные исследования точности предлагаемого метода и сходимости получаемых с помощью него результатов говорят о его перспективности. В качестве примеров проводится расчет дисперсионных характери-

стик гребневых диэлектрических волноводов с круглой и с треугольной формой гребня.

На основе разработанных алгоритмов проведен строгий электродинамический анализ связанных диэлектрических линий передачи. Показано, что в ряде случаев у направляющей структуры, представляющей собой несколько параллельных диэлектрических полосков с разными параметрами, наблюдаются области резкого изменения хода дисперсионных кривых – области Морсовских критических точек. Приведенные численные результаты свидетельствуют о том, что вблизи Морсовских точек поток энергии приблизительно равномерно распределен между параллельными диэлектрическими полосками.

В главе приводятся результаты исследования перехода поверхностных волн гребневого волновода в вытекающие волны, поле которых нарастает по мере удаления от гребня. Представлены также результаты расчета дисперсионных характеристик собственных комплексных волн (КВ), распространяющихся в закрытом прямоугольном волноводе с частичным диэлектрическим заполнением.

В третьей главе диссертации: представлены алгоритмы расчета дифракции поля на стыке различных направляющих структур, составленные на основе МЧО.

Рассматривается подход к решению задач дифракции поля на стыке открытых планарных диэлектрических волноводов, заключающийся в замене открытой системы на закрытую путем введения идеально проводящих бесконечных плоскостей, удаленных на достаточно большое расстояние от планарных волноводов (рис.3а). Правомерность данного подхода численно доказана на примере расчета стыка планарных диэлектрических волноводов: результаты, полученные при решении задачи дифракции на стыке планарных диэлектрических волноводов, экранированных двумя идеально проводящими бесконечными плоскостями, полностью совпадают с приведенными в [Л.25] и полученными на основе строго электродинамического расчета стыка двух открытых планарных диэлектрических волноводов с теми же параметрами, проводимого с привлечением непрерывного спектра. Таким образом, показано, что задачи дифракции в открытых планарных диэлектрических волноводах могут быть заменены на задачи дифракции в экранированных структурах, которые достаточно точно позволяют получить интегральные характеристики (коэффициенты отражения, прохождения, радиационные потери и т.д.) нерегулярных участков открытых направляющих структур.

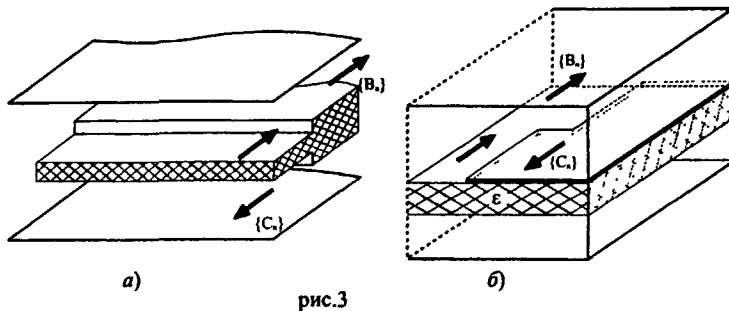


рис.3

В главе также представлена методика решения задачи дифракции электромагнитных волн на многоступенчатых и плавных переходах между планарными диэлектрическими волноводами. Разработан общий алгоритм, позволяющий проводить анализ плавных переходов произвольной формы, заменяя их на многоступенчатые со сколь угодно большим числом ступеней. На основе созданных алгоритмов проведен расчет различных видов плавных переходов между планарными диэлектрическими волноводами.

Методика решения дифракционных задач для экранированных направляющих структур, представленная в данной главе, была использована при строгом электродинамическом решении задачи дифракции на стыке волноводно-щелевых линий (рис.3б). Задача носила принципиальный характер: на ней проверялось влияние на результаты решения дифракционных задач собственных комплексных волн стыкуемых направляющих структур. Поскольку, как было показано в [Л.26], источники, описываемые действительными функциями координат, создают по обе стороны от себя по паре КВ с одинаковыми амплитудами и встречными фазовыми скоростями, то вопрос парного учета комплексных волн в задачах дифракции является принципиальным. Показано, что корректные результаты при любом способе возбуждения стыка двух направляющих структур, в которых существуют КВ, получаются лишь при обязательном парном учете последних. Стык двух направляющих структур, содержащих в своем спектре КВ, можно рассматривать как источник, обязательно возбуждающий пару КВ со встречными фазовыми скоростями [Л.27, Л.28]. Неучет одной из них, как показано в диссертации, приводит к дисбалансу энергии: получаемые характеристики передачи стыка не обеспечивают выполнение закона сохранения энергии.

В четвертой главе диссертации: приводятся результаты решения дифракционной задачи для трехмерной электродинамической структуры, полученные на основе мето-

дик, представленных в третьей главе. На электродинамическом уровне впервые решается задача расчета радиального сумматора/делителя мощности, которая разбивается на две подзадачи – расчета коаксиально-радиального и радиально-полоскового перехода.

Расчет соединения коаксиальной и радиальной линий (рис.4), проводится на основе МЧО, при этом запись поля в выделенной области осуществляется в соответствии со строгим МЧПО [Л.29-Л.31]. Приводятся результаты ряда численных экспериментов, результаты которых говорят о том, что такое представление поля позволяет получить быструю сходимость и высокую точность расчетного алгоритма.

Рассматриваются вопросы широкополосного согласования коаксиально-радиального перехода, исследуется практически важный вопрос чувствительности рассматриваемой структуры к допускам параметров. Получены простые аналитические формулы, позволяющие проводить оперативный расчет соединения коаксиальной и радиальной линий в одноволновом приближении; определены границы применимости этих формул, при нарушении которых следует использовать расчет в более высоком приближении.

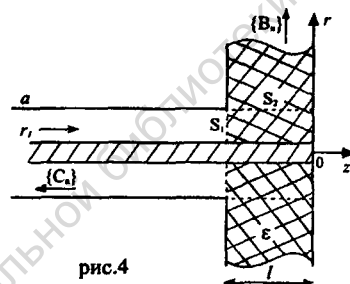


рис.4

Анализ результатов расчета согласованного соединения радиального волновода с микрополосковой линией проведен на основе модели Олинера, когда полосковая линия заменяется на эквивалентный прямоугольный волновод с магнитными боковыми стенками; согласование производится с помощью отрезков микрополосковых линий различной ширины и протяженности. Описываются различные алгоритмы оптимизации параметров структуры с целью достижения наилучшего согласования в заданном частотном диапазоне.

С помощью объединения двух указанных выше задач проведен электродинамический анализ структуры радиального сумматора/делителя мощности в целом. Следует отметить, что данный анализ на таком уровне строгости проведен впервые – во всех литературных источниках, посвященных данному вопросу, используются исключительно приближенные методы. Создан программный комплекс, позволяющий проводить многопараметрическую оптимизацию параметров устройства с целью получения наилучших характеристик в заданном частотном диапазоне. Приведены результаты

экспериментального исследования усилителя мощности, созданного в ФГУП "НПП "Салют" с использованием разработанного программного комплекса.

Основные выводы и результаты

1. Впервые получены аналитические формы записи дисперсионного уравнения многослойных планарных и круглых диэлектрических волноводов с произвольным профилем показателя преломления и сколь угодно большим числом слоев. Данные формы записи представляются в виде рекуррентных формул, имеющих крайне простой вид и позволяющих производить строгий электродинамический расчет направляющих структур рассмотренного типа.
2. Проведен анализ свойств планарных и круглых диэлектрических волноводов с наиболее часто применяемыми профилями показателя преломления.
3. Рассмотрены волноводы с немонотонным законом изменения показателя преломления. Показано наличие резкого изменения структуры поля мод таких волноводов на определенных частотах, выявлена его физическая природа.
4. Разработана методика расчета "полуоткрытых" металло-диэлектрических волноводов произвольной формы.
5. Рассмотрены вытекающие волны в "полуоткрытых" металло-диэлектрических волноводах; исследованы собственные комплексные волны в прямоугольных волноводах с частичным диэлектрическим заполнением.
6. Разработана методика строгого электродинамического расчета многоступенчатых волноводных переходов, показана возможность эффективного моделирования плавных переходов многоступенчатыми.
7. Исследованы основные дифракционные свойства ступенчатой неоднородности в планарном симметричном волноводе; показана возможность моделирования соединений открытых диэлектрических волноводов закрытыми металло-диэлектрическими структурами с достаточно далеко удаленными стенками.
8. Решена задача дифракции электромагнитного поля на стыке двух волноводно-щелевых линий с учетом комплексных волн, сформулированы правила учета последних.
9. На основе метода частичных областей разработана электродинамическая модель соединения коаксиальной линии и радиального волновода, заполненного диэлектриком.

10. Создан программный комплекс, позволяющий проводить расчет и проектирование радиальных сумматоров/делителей мощности. На основе разработанных программ создан экспериментальный образец 20-канального усилителя с уровнем выходной мощности в 35 Вт.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Темнов В.М., Титаренко А.А. Электродинамический анализ ступенчатых переходов в плоском волноводе с частичным диэлектрическим заполнением // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 1998, Т.1, №4, С.17-23.
2. Темнов В.М., Титаренко А.А. Метод реберных трубок в задачах дифракции электромагнитных волн // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2000, №1, С.29-37.
3. Темнов В.М., Титаренко А.А. Метод граничных элементов в задаче дифракции на периодической поверхности // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ, №4, 1999, С.72-82.
4. Темнов В.М., Титаренко А.А. Расчет многослойных и градиентных планарных диэлектрических волноводов // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ, №4, 1999, С.83-87.
5. Темнов В.М., Титаренко А.А. Моделирование многоступенчатых и плавных переходов для устройств КВЧ и оптического диапазонов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2000, №2, С. 32-38.
6. Темнов В.М., Титаренко А.А. Электродинамический расчет коаксиально-радиального перехода // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2001, №1, С. 21-26.
7. Темнов В.М., Титаренко А.А. Метод расчета многослойных и градиентных круглых оптических волноводов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2001, №1, С. 26-30.
8. Темнов В.М., Титаренко А.А., Бударагин Р.В. Электродинамический анализ волноведущих диэлектрических структур // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2001, №4, С. 21-27.
9. Темнов В.М., Бударагин Р.В., Титаренко А.А. Краевые волны в направляющих металлодиэлектрических структурах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2002, №1, С. 44-53.

10. Темнов В.М., Титаренко А.А. Электродинамический анализ радиального сумматора/делителя мощности // Радиотехника, 2001г., №12, С.60-66.
11. Темнов В.М., Титаренко А.А. Анализ и оптимизация многоканальных радиальных сумматоров мощности // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ , №1, 2001, С.54-64.
12. Темнов В.М., Титаренко А.А. Метод реберных трубок в двумерных задачах дифракции // Тезисы докладов VI Международной конференции "Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ". - Самара, 1999, Т.7, №2 (23). С.60.
13. Темнов В.М., Титаренко А.А. Моделирование функциональных элементов оптического диапазона на основе планарных диэлектрических структур // Тезисы докладов на 55-й научной сессии, посвященной дню радио "Радиотехника, электроника и связь на рубеже тысячелетия", Москва, 2000, С.183-184.
14. Темнов В.М., Титаренко А.А. Анализ многослойных и градиентных планарных диэлектрических волноводов // Тезисы докладов научно-технической конференции факультета информационных систем и технологий ФИСТ, 2000, С.53-54.
15. Темнов В.М., Титаренко А.А. Собственные волны многослойных и градиентных световодов и их применение для расчета нерегулярных волоконно-оптических структур // Тезисы докладов МНТК "Физика и технические приложения волновых процессов" – Самара, 2001, С.232-233.
16. Темнов В.М., Петухов Б.А., Галкин М.И., Титаренко А.А., Бударагин Р.В. О разработке усилителей большой мощности S-диапазона на полевых транзисторах // Тезисы докладов МНТК "Физика и технические приложения волновых процессов" – Самара, 2001, С.134.
17. Темнов В.М., Титаренко А.А. Электродинамический анализ радиального сумматора/делителя мощности // Тезисы докладов МНТК "Физика и технические приложения волновых процессов" – Самара, 2001, С.170.
18. Бударагин Р.В., Радионов А.А., Титаренко А.А. Расчет плавных переходов между регулярными двухслойными диэлектрическими волноводами // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 65-летию факультета информационных систем и технологий НГТУ, Н.Новгород, 2001, С.48-49.

19. Темнов В.М., Титаренко А.А., Бударагин Р.В. Метод расчета диэлектрических направляющих структур с произвольной формой поперечного сечения // Труды LVII Научной сессии, посвященной Дню радио, Т.1, М., 2002, С.283-285.
20. Темнов В.М., Титаренко А.А. Анализ многоканального радиального сумматора/делителя мощности // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 65-летию факультета информационных систем и технологий НГТУ, Н.Новгород, 2001, С.49-50.
21. Темнов В.М., Титаренко А.А. К вопросу об использовании метода частичных областей // Тезисы докладов 56-й научной сессии, посвященной дню радио, М., 2001, С.151-153.
22. Темнов В.М., Титаренко А.А. К расчету радиальных сумматоров/делителей мощности // Тезисы докладов 56-й научной сессии, посвященной дню радио, М., 2001, С.153-155.
23. Темнов В.М., Титаренко А.А. Применение метода частичных областей для расчета КВЧ и оптических направляющих структур сложного поперечного сечения // Тезисы докладов на 11-й Международной конференции КрыМиКо'2001, Севастополь, 2001. С.422-423.

Литература

1. Унгер Х. Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. -М.: Мир, 1980, - 656с.
2. Интегральная оптика. Под редакцией Т.Тамира. - М.: Мир, 1978, - 344с.
3. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. - М. "Радио и связь", 1987, -656с.
4. Беланов А.С., Дианов Е.М., Кривенков В.И. Дисперсия в световодах со сложным профилем показателя преломления // Доклады Академии наук, 1999, Т.364, №1. С.37-41.
5. Беланов А.С., Дианов Е.М. Предельные скорости передачи информации по волоконным световодам // Радиотехника, Т.37, №2, 1982, С.35-43.
6. Раевский А.С. Волны HE и EH круглого диэлектрического волновода // Радиотехника и Электроника, Т.44, №5, 1999. С.517-519.

7. Веселов Г.И., Раевский С.Б. Комплексные волны круглого диэлектрического волновода // Радиотехника и Электроника, Т.26, №2, 1983. С.239-236.
8. Веселов Г.И., Раевский С.Б. Слоистые метало-диэлектрические волноводы. – М. Радио и связь, 1988. -247с.
9. Веселов Г.И., Раевский С.Б. О спектре комплексных волн круглого диэлектрического волновода // Радиотехника, Т.38, №2, 1983. С.55-58.
10. N. Mabaya, P.E. Lagasse, P. Vandenbulcke Finite element analysis of optical waveguides. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-29, №6, June 1981, P.600-605.
11. R. Mittra, Y.L. Hou, V. Jamnejad Analysis of open dielectric waveguides using mode-matching technique and variational methods // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-28, №1, Jan 1980, P.36-43.
12. Каценеленбаум Б.З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. М.: Изд-во АН СССР, 1961, -215с.
13. Свешников А.Г. Неполный метод Галеркина // ДАН СССР. 1977. Т.236. №5. С.1076-1079.
14. Ильинский А.С., Слепян Г.Я. Колебания и волны в электродинамических системах с потерями. – М.: МГУ, 1983. -213с.
15. Нефедов Е.И., Фиалковский А.Т. Полосковые линии передачи. –М.: Наука, 1980, с.311.
16. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Современные методы проектирования линий передачи и резонаторов сверх- и крайневых частот. –М., “Педагогика-Пресс”, 1998, -327с.
17. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. Объемные интегральные схемы СВЧ. – М.: Наука, 1985. –255с.
18. Гупта К., Гардж Р, Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ устройств. –М.: Радио и связь, 1987, -429с.
19. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Полосково-щелевые структуры сверх- и крайне-высоких частот. – М.: Наука, 1996. -304с.
20. M.J. Tsai, F. De Flaviis, O. Fordham, N.G. Alexopoulos Modeling planar arbitrary shaped microstrip elements in multilayered media // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.45, №3, 1997, pp. 330-336.

№ . 9701
2003-A
9701

21. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. -440с.
22. Веселов Г.И., Темнов В.М. О применимости метода редукции при решении алгебраических систем в некоторых задачах дифракции // ЖВМ и МФ, 1984. №9. С.1381-1391.
23. Митра Р., Ли С. Аналитические методы теории волноводов. – М.: Мир, 1974. - 328с.
24. Веселов Г.И., Темнов В.М. О решении некоторых систем уравнений в электродинамике и явлении “относительной сходимости” //Радиотехника и Электроника, Т.ХХVI, №10, 1981, С.2034-2043.
25. Rozzi Т. Е. "Rigorous analysis of the step discontinuity in a planar dielectric waveguide", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-26, Oct. 1978, pp. 738-746.
26. Веселов Г.И., Раевский С.Б., Калмык В.А. Исследование комплексных волн двухслойного экранированного волновода // Радиотехника, 1980, Т.35, №9, С.59-62.
27. Иванов А.Е., Раевский С.Б. Комплексный резонанс в структуре на основе круглого двухслойного экранированного волновода // Радиотехника и Электроника, 1991, Т.36, №8, С.1463-1468.
28. Веселов Г. И., Гуреев А.В. Дифракция электромагнитной волны на структурах с комплексным спектром. Электродинамические основы автоматизированного проектирования интегральных схем СВЧ / Под ред. Е.И. Нефедова. -ИРЭ АН СССР. М., 1981. -226с.
29. Прохода И.Г., Чумаченко В.П. Метод частичных пересекающихся областей для исследования волноводно-резонаторных систем сложной формы // Изв. Вузов. Радиофизика. 1973. Т.16. №10. С. 1578-1582.
30. Темнов В.М. О построении поля в задачах дифракции волн на изломах в прямоугольном волноводе // Радиотехника и электроника, 1989, Т.34, №9, С.1809-1818.
31. Власов А.Г. Метод переопределенных рядов в некоторых краевых задачах математической физики // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Сб.3, Л.: Гос. Ун-т, 1959. С.403-462.

Подписано в печать 05.11.02. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 721.

Нижегородский государственный технический университет.
Типография НГТУ. 603600, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.