

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра антенн и устройств СВЧ

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВЧ-ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Программа, методические указания и контрольные задания по курсу
«Основы проектирования СВЧ-интегральных схем»
для студентов специальности I-41 01 02
«Микро- и нанoeлектронные технологии и системы»
заочной формы обучения

Минск 2007

УДК 621.382.8.049.77 (075.8)
ББК 32.844.1 я 73
О-78

С о с т а в и т е л ь:
В. Б. Кирильчук

О-78 **Основы** проектирования СВЧ-интегральных схем : программа, метод. указания и контрольные задания по курсу «Основы проектирования СВЧ-интегральных схем» для студ. спец. I-41 01 02 «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы» заоч. формы обуч. / сост. В. Б. Кирильчук. – Минск : БГУИР, 2007. – 28 с.

В методическом издании содержатся программа, методические указания и контрольные задания по курсу «Основы проектирования СВЧ-интегральных схем». В каждом разделе методических указаний приведены контрольные вопросы, которые помогают студентам самостоятельно овладеть курсом. Приведена методика выполнения индивидуальных контрольных работ.

Может быть рекомендовано для студентов дневной формы обучения при изучении курса «Основы проектирования СВЧ-интегральных схем».

УДК 621.382.8.049.77 (075.8)
ББК 32.844.1 я 73

© Кирильчук В. Б., составление, 2007
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2007

ПРОГРАММА

Введение

Цель, задачи и основное содержание курса «Основы проектирования СВЧ-интегральных схем». Понятие интегральной схемы СВЧ. Переход к интегральной технологии и автоматизация проектирования как одна из основных тенденций развития современной микроэлектроники. Электромагнитное поле (ЭМП) как вид материи. Аналитическое и графическое описания ЭМП. Линии передачи как основа построения ИС СВЧ. Структура и методы расчета современных ИС СВЧ. Список рекомендуемой литературы.

1 Основы теории электромагнитного поля

1.1 Основные уравнения электродинамики

Вектор напряженности электрического поля и вектор электрической индукции. Материальные уравнения, диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, удельная электропроводимость. Плотность тока проводимости. Ток смещения и полный ток. Вектор напряженности магнитного поля и вектор магнитной индукции. Графическое изображение полей.

Уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Физический смысл уравнений Максвелла.

Закон сохранения заряда, уравнения непрерывности. Сторонние источники. Классификация сред (линейные и нелинейные, изотропные, анизотропные, однородные и неоднородные). Идеальные диэлектрики и идеальные проводники. Относительность разделения сред на диэлектрики и проводники. Граничные условия для нормальных и тангенциальных составляющих векторов ЭМП.

Закон сохранения энергии для электромагнитного поля. Вектор Пойнтинга.

1.2 Статические, стационарные и монохроматические ЭМП

Классификация электромагнитных явлений: электростатические, магнитостатические, стационарные, квазистационарные и гармонические поля. Система уравнений Максвелла для статических (электростатического и магнитостатического) и стационарного ЭМП.

Уравнения Максвелла в комплексной форме, комплексная диэлектрическая и магнитная проницаемости. Закон сохранения энергии для монохроматического поля, комплексный вектор Умова–Пойнтинга.

Уравнения Гельмгольца для векторов поля. Электродинамические потенциалы.

1.3 Излучение и дифракция электромагнитных волн

Условие излучения на бесконечности. Элементарный электрический и магнитный вибраторы. Поля элементарного вибратора в ближней и дальней зонах. Сферические волны. Диаграмма направленности. Мощность и сопротивление излучения вибратора. Лемма Лоренца. Принцип взаимности.

Плоская электромагнитная волна (ЭМВ) в непроводящей среде. Фазовая скорость волны, волновое сопротивление среды. Поляризация волн. Плоская волна в среде с потерями. Коэффициент фазы и коэффициент затухания. Глубина проникновения. Дисперсия, групповая скорость.

Отражение и преломление плоской волны на границе раздела сред. Законы Снеллиуса и формулы Френеля. Полное внутреннее отражение. Поверхностные волны. Угол Брюстера. Особенности преломления волны в проводящих средах. Граничные условия Леонтовича. Потери энергии в проводнике, поверхностный эффект.

Плоские волны в гиротропных средах (плазма, ферриты в постоянном магнитном поле). Эффекты Фарадея и двойного лучепреломления в гиротропных средах.

Понятие дифракции ЭМВ. Приближенные методы решения задач дифракции в квазистатической и квазиоптической областях. Физическая оптика. Дифракция на отверстиях в экране в приближении Кирхгофа. Дифракционное поле в дальней зоне. Зоны Френеля. Геометрическая оптика. Рефракция электромагнитных волн в неоднородной среде. Понятие о геометрической теории дифракции.

2 Линии передачи как основа построения интегральных схем (ИС) СВЧ

2.1 Общая теория линий передачи

Приближенный метод описания линий передачи (ЛП) с помощью условных токов и условных напряжений. Понятие эквивалентной ЛП. Волновое сопротивление ЛП. Коэффициент отражения, коэффициенты стоячих и бегущих волн. Коэффициент отражения и его связь с волновым сопротивлением и сопротивлением нагрузки.

Режимы работы ЛП: режим бегущих волн, режим стоячих волн, смешанный режим. Согласование в эквивалентной ЛП: трансформация сопротивлений, полуволновые и четвертьволновые отрезки ЛП, короткозамкнутые на конце отрезки, шлейфы.

Классификация линий передачи (ЛП) СВЧ. Разновидности электромагнитных волн в односвязных и многосвязных линиях передачи: поперечные (ТЕМ), электрические Е (ТМ), магнитные Н (ТЕ), гибридные (ЕН) ЭМВ.

Традиционные ЛП СВЧ: призматический волновод (ПВ), цилиндрический волновод (ЦВ) и коаксиальный волновод (КВ), конструкции и основные параметры. Граничная задача для волноводов.

Призматический волновод. Решение граничной задачи. Структура и свойства полей в волноводе. Типы волн, дисперсия, фазовая и групповая скорости распространения волн в волноводе. Основная волна (H_{10}). Концепция парциальных волн. Токи и заряды на стенках волноводов.

Цилиндрический волновод. Решение граничной задачи. Простейшие типы волны (H_{11} , E_{01} , H_{01}).

Коаксиальная линия. Основная волна (ТЕМ). Понятие о высших типах волн в коаксиальной линии.

2.2 Линии передачи ИС СВЧ

Линии передачи ИС СВЧ: симметричная полосковая линия (СПЛ), несимметричная полосковая линия (НПЛ), микрополосковая линия (МПЛ), симметричная щелевая линия (СЩЛ), несимметричная щелевая линия (НЩЛ), компланарная линия (КЛ).

МПЛ: определение, конструкция, рабочий тип волны, структура ЭМП в линии, расчет основных характеристик.

СЩЛ: определение, конструкция, рабочий тип волны, структура ЭМП в линии, расчет основных характеристик.

НЩЛ: определение, конструкции двух разновидностей линии, рабочий тип волны, структура ЭМП в линии, расчет основных характеристик.

КЛ: определение, конструкция, два типа поперечных волн в линии, структура ЭМП в линии, расчет основных характеристик.

Линии передачи оптического диапазона: разновидности и основные характеристики.

3 Элементная база ИС СВЧ

3.1 Декомпозиционный подход при проектировании ИС СВЧ

Понятие многополюсника СВЧ. Способы описания многополюсников СВЧ (классический и волновой). Понятие матрицы рассеяния. Декомпозиционный подход как основа машинного проектирования ИС СВЧ. Три этапа декомпозиционного подхода: разбиение сложного устройства на элементарные неоднородности (декомпозиция), вычисление матриц рассеяния элементарных неоднородностей, вычисление матрицы рассеяния сложного устройства по матрицам рассеяния элементарных неоднородностей (рекомпозиция).

3.2 Типичные неоднородности в ЛП

Метод Олинера для расчета характеристик открытых линий передачи и типичных неоднородностей в них. Переход от открытой ЛП к ее закрытой олинеровской модели.

Типичные неоднородности в НПЛ: скачок ширины полосы НПЛ, поворот НПЛ на произвольный угол, Т-образное разветвление НПЛ, поперечная щель в токонесущей полоске НПЛ, отверстие в токонесущей полоске НПЛ.

Типичные неоднородности в СЦЛ и расчет их матриц рассеяния: скачок ширины линии, поворот СЦЛ на произвольный угол, Т-образное разветвление СЦЛ, поперечная перемычка в СЦЛ.

3.3 Узлы ИС СВЧ

Переходы между различными видами ЛП: СПЛ, НПЛ, СЦЛ, НЦЛ, КЛ. Атенюаторы и фазовращатели СВЧ-сигналов: разновидности и принцип работы.

Резонансные и фильтрующие структуры в интегральном исполнении: резонаторы и фильтры. Основные характеристики. Разновидности и примеры конструкций.

Направленные ответвители мощности и кольцевые мосты в интегральном исполнении. Основные характеристики. Разновидности, примеры конструкций и принцип работы.

Согласующие элементы в полосковых и щелевых линиях. Микрополосковые ферритовые вентили и циркуляторы. Основные характеристики. Разновидности, примеры конструкций и принцип работы.

Устройства на р-і-п-диодах: аттенюаторы, фазовращатели, переключатели. Основные характеристики. Разновидности, примеры конструкций и принцип работы.

3.4 Интегральные излучающие элементы

Основные характеристики излучателей: диаграмма направленности (ДН), коэффициент направленного действия, коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент усиления антенны. Конструкции полосковых и щелевых излучателей и их типичные характеристики: диаграмма направленности, коэффициент направленного действия, КПД, коэффициент усиления.

Решетки излучателей (РИ). Классификация. Множитель решетки. ДН решетки излучателей.

4 Структура и методы расчета современных ИС СВЧ

4.1 Планарные и объемные интегральные схемы СВЧ

Структура планарных ИС СВЧ. Понятие объемной ИС СВЧ (ОИС СВЧ). Неоднородности в ОИС СВЧ. Реализация типовых узлов в ОИС СВЧ.

Перспективы развития ОИС СВЧ. Применение ОИС СВЧ в современной радиоэлектронной аппаратуре радиосвязи, радиолокации и быстродействующих ЭВМ.

4.2 Современные методы расчета ИС СВЧ

Современные методы расчета ИС СВЧ: методы эквивалентных границ, методы интегральных уравнений, численно-аналитические методы.

Методы интегральных уравнений. Понятие некорректно поставленных задач и регуляризирующих процедур.

Модифицированный метод неортогональных рядов как пример численно-аналитического метода для расчета ИС СВЧ. Формулировка метода. Расчет обобщенной микрополосковой линии. Примеры: экранированная МПЛ, открытая МПЛ, МПЛ на слоистой подложке, МПЛ на подвешенной подложке.

Применение систем автоматизированного проектирования (САПР) ИС СВЧ. Разновидности и возможности современных САПР. Основные преимущества и недостатки САПР.

4.3 Технологии изготовления ИС СВЧ

Тонкопленочная, толстопленочная и LTCC-технологии. Особенности, преимущества и недостатки. Перспективные методы.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

- 1 Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства : метод. пособие для студ. спец. 45 01 02 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения» дневн. и веч. форм обуч. : Ч 2. Фидерные устройства / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук. – Минск : БГУИР, 2005.
- 2 Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства : метод. пособие для студ. спец. 45 01 02 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения» дневн. и веч. форм обуч. : Ч.1. Распространение радиоволн / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук. – Минск : БГУИР, 2004.
- 3 Гридин, В. Н. Электродинамика структур крайне высоких частот / В. Н. Гридин, Е. И. Нефедов, Т. Ю. Черникова. – М. : Наука, 2002.

- 4 Пименов, Ю. В. Техническая электродинамика / Ю. В. Пименов, В. И. Вольман, А. Д. Муравцов. – М. : Радио и связь, 2002.
- 5 Демидчик, В. И. Электродинамика СВЧ / В. И. Демидчик. – Минск : Университетское, 1992.
- 6 Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М. : Наука, 1989.
- 7 Милованов, О. С. Техника сверхвысоких частот : учеб. пособие для вузов / О. С. Милованов, Н. П. Собенин. – М. : Атомиздат, 1980.
- 8 Гвоздев, В. И. Объемные интегральные схемы СВЧ. Элементная база аналоговой и цифровой радиоэлектроники / В. И. Гвоздев, Е. И. Нефедов. – М. : Наука, 1987.
- 9 Нефедов, Е. И. Радиоэлектроника наших дней / Е. И. Нефедов. – М. : Наука, 1986.
- 10 Гвоздев, В. И. Объемные интегральные схемы СВЧ / В. И. Гвоздев, Е. И. Нефедов. – М. : Наука, 1985.
- 11 Нефедов, В. И. Полосковые линии передачи: электродинамические основы автоматизированного проектирования интегральных схем СВЧ / В. И. Нефедов, А. Г. Фиалковский. – М. : Наука, 1990.
- 12 Конструирование и расчет полосковых устройств / под ред. проф. И. С. Ковалева. – М. : Советское радио, 1974.
- 13 Миттра, Р. Вычислительные методы в электродинамике / пер. с англ.; под ред. Э. Л. Бурнштейна. – М. : Мир, 1977.
- 14 Панченко, Б. А. Микрополосковые антенны / Б. А. Панченко, Е. И. Нефедов. – М. : Радио и связь, 1986.

Дополнительная

- 1 Вольман, В. И. Техническая электродинамика / В. И. Вольман, Ю. В. Пименов. – М. : Связь, 1977.
- 2 Фальковский, О. И. Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978.
- 3 Гупта, К. Машинное проектирование СВЧ-устройств / К. Гупта, Р. Гардж, Р. Чадха. – М. : Радио и связь, 1987.
- 4 Лебедев, И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. Техника сверхвысоких частот / И. В. Лебедев. – М. : Высшая школа, 1970.
- 5 Малорацкий, Л. Г. Проектирование и расчет СВЧ-элементов на полосковых линиях / Л. Г. Малорацкий, Л. Р. Явич. – М. : Советское радио, 1972.
- 6 Малорацкий, Л. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ / Л. Г. Малорацкий. – М. : Советское радио, 1976.
- 7 Бушминский, И. П. Технология гибридных интегральных схем СВЧ / И. П. Бушминский, Г. В. Морозов. – М. : Высшая школа, 1980.
- 8 Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Синицын. – Минск : Бестпринт, 2004.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Введение

В этом разделе следует обратить внимание на усвоение положения о реальности существования электромагнитного поля как одной из форм материи. Изучение курса проводится в рамках классической (макроскопической) электродинамики; вопросы квантовой теории поля не затрагиваются.

Контрольные вопросы

- 1 Краткий исторический очерк развития учения об электромагнетизме.
- 2 Электромагнитное поле как одна из форм существования материи. Условность разделения поля на электрическое и магнитное.
- 3 Графическое изображение ЭМП.

1 Основы теории электромагнитного поля

1.1 Основные уравнения электродинамики

Необходимо знать: определения векторов электромагнитного поля \vec{E} , \vec{D} , \vec{B} , \vec{H} и связь между ними (материальные уравнения электродинамики); классификацию сред по макроскопическим параметрам (линейные и нелинейные, однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные); физический смысл уравнений Максвелла и их запись в интегральной и дифференциальной формах; граничные условия для нормальных и тангенциальных составляющих векторов поля; закон сохранения энергии для электромагнитного поля; определение вектора Пойнтинга.

Контрольные вопросы

- 1 Определение векторов электромагнитного поля \vec{E} , \vec{D} , \vec{B} , \vec{H} .
- 2 Материальные уравнения электродинамики.
- 3 Первое и второе уравнения Максвелла и их физический смысл.
- 4 Ток проводимости и ток смещения.
- 5 Третье и четвертое уравнения Максвелла и их физический смысл.
- 6 Уравнение непрерывности и закон сохранения заряда.
- 7 Граничные условия для нормальных и тангенциальных составляющих векторов ЭМП.
- 8 Определение вектора Пойнтинга.
- 9 Понятие о сторонней напряженности поля, сторонних токах и зарядах; запись уравнений Максвелла с учетом этих величин.

1.2 Статические, стационарные и монохроматические ЭМП

Изучая уравнения Максвелла при наличии сторонних токов и зарядов, необходимо разобраться в сущности понятия сторонних сил и формах их задания (сторонние заряды, ток, напряженность поля). Надо уметь классифицировать электромагнитные явления по характеру их изменения во времени (переменные, статические, стационарные и квазистационарные поля) и знать аналитические формулировки уравнений Максвелла для статических и стационарных ЭМП.

Важным для практики является изучение переменного электромагнитного поля, изменяющегося по синусоидальному периодическому (гармоническому) закону. Зная законы, описывающие поведение гармонического (монохроматического) поля, можно с помощью спектрального анализа найти электромагнитное поле, изменяющееся во времени по более сложному закону.

Поэтому необходимо усвоить запись уравнений Максвелла для монохроматического поля в комплексной форме, выяснить смысл введения комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости, тангенса угла потерь; знать критерий деления сред на проводники и диэлектрики, закон сохранения энергии для монохроматического поля; иметь представление о волновых уравнениях Гельмгольца для векторов ЭМП и их связи с уравнениями Максвелла; иметь понятие об электродинамических потенциалах и их использовании при решении задач электродинамики.

Контрольные вопросы

- 1 Классификация электромагнитных явлений по характеру их изменения во времени.
- 2 Уравнения Максвелла для статического электрического и магнитного полей.
- 3 Уравнения Максвелла для стационарного ЭМП.
- 4 Комплексная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды, тангенс угла потерь. Критерий деления сред на проводники и диэлектрики.
- 5 Система уравнений Максвелла для монохроматического поля в комплексной форме.
- 6 Волновые уравнения электродинамики для векторов напряженности электрического и магнитного полей, форма их представления через электродинамические потенциалы.

1.3 Излучение и дифракция электромагнитных волн

При изучении этого раздела необходимо четко представлять, что первичным источником электромагнитных волн являются электрические заряды, движущиеся с ускорением, или, другими словами, ток, меняющийся во времени. Для полного понимания работы излучающих систем важно усвоить принцип работы элементарных излучателей. Как правило, расчет полей излучающих систем ведется методом суперпозиции: вся система разбивается на элементарные излучатели, определяется поле от каждого, а затем поля всех излучателей суммируются. Следует обратить внимание на принцип эквивалентности и принцип Гюйгенса–Кирхгофа, которые позволяют проследить за распространением фронта волны, начиная с момента, в который фронт волны является известным.

При изучении плоских волн необходимо помнить, что векторы E и H электромагнитной волны перпендикулярны друг другу и изменяются во времени и пространстве по гармоническим законам. В идеальной диэлектрике волны не затухают. В реальной же среде распространение волны всегда связано с затуханием. Необходимо обратить внимание на то, что параметры волны в среде без потерь не зависят от частоты, а в среде с проводимостью зависят. Зависимость свойств волны от частоты называется дисперсией. Следует запомнить определение фазовой скорости, коэффициента фазы и затухания, скорости переноса энергии, волнового сопротивления.

Важнейшей характеристикой ЭМП является поляризация волны. Поэтому при изучении данного раздела необходимо знать определение поляризации волн, виды поляризации, методы ее формирования в линейном и круговом базисах.

Среды, свойства которых различны по разным направлениям, называют анизотропными; в таких средах векторы \vec{P} и \vec{E} , \vec{D} и \vec{E} , а также \vec{M} и \vec{H} , \vec{B} и \vec{H} могут быть непараллельными и, по крайней мере, хотя бы один из этих параметров является тензором.

В ферромагнитных средах тензором является магнитная проницаемость. В постоянном магнитном поле один из видов магнетиков – феррит – становится анизотропной средой по отношению к переменному полю. В данном разделе следует обратить внимание на физическую природу анизотропии. Необходимо знать уравнения Максвелла для анизотропных сред.

При изучении законов отражения и преломления плоской волны на границе раздела сред необходимо знать законы Снеллиуса и формулы Френеля, иметь представление о явлении полного внутреннего отражения и угле Брюстера, а также знать особенности преломления волны в проводящих средах, уметь определять потери энергии в проводнике и диэлектрике, иметь представление о поверхностном эффекте и глубине скин-слоя.

Рассматривая явление дифракции электромагнитных волн, необходимо знать методы решения задач дифракции (приближение Гюйгенса–Кирхгофа,

геометрической оптики, метод краевых волн); иметь представление о ближней и дальней зонах излучения (зона Френеля и зона Фраунгофера), существенной и минимальной областях пространства, участвующего в распространении радиоволн.

Контрольные вопросы

- 1 Сущность процесса излучения электромагнитных волн.
- 2 Определение поляризации ЭМВ и виды поляризаций.
- 3 Элементарные электрический (диполь Герца) и поверхностный (элемент Гюйгенса) излучатели, их определение и диаграммы направленности в полярной и прямоугольной системах координат.
- 4 Определение однородной плоской волны. Выражение для векторов E и H этой волны.
- 5 Коэффициент фазы и коэффициент затухания; фазовая скорость и длина волны в среде с малыми и большими потерями.
- 6 Законы Снеллиуса.
- 7 Коэффициенты отражения и прохождения Френеля для вертикальной и горизонтальной поляризации волн.
- 8 Физическая природа анизотропии. Примеры анизотропных сред.
- 9 Зависимость составляющих тензора магнитной проницаемости феррита от напряженности поля подмагничивания. Ферромагнитный резонанс.
- 10 Анизотропные магнетики. Тензор магнитной проницаемости и смысл его составляющих.
- 11 Фазовые скорости и поляризация волн в продольно-намагниченном феррите.
- 12 Эффект Фарадея. Вращение плоскости поляризации. Необратимость эффекта Фарадея.
- 13 Фазовые скорости и поляризация волн в поперечно-намагниченном феррите.
- 14 Явление дифракции электромагнитных волн. Приближенные решения дифракционных задач.
- 15 Условия применимости геометрической оптики. Изменение интенсивности поля вдоль луча в приближении геометрической оптики.
- 16 Условия применимости физической оптики. Приближения физической оптики.
- 17 Условие ближней и дальней зон излучения (зона Френеля и зона Фраунгофера).
- 18 Определение существенной и минимальной областей пространства, участвующего в распространении радиоволн.
- 19 Определение рефракции электромагнитных волн.

2 Линии передачи как основа построения ИС СВЧ

2.1 Общая теория линий передачи

При изучении данного раздела необходимо усвоить, как определяются основные параметры эквивалентной линии передачи с помощью условных токов и условных напряжений; знать режимы работы ЛП и определения коэффициента отражения, коэффициентов стоячих и бегущих волн и их связь с волновым сопротивлением (ВС) ЛП и сопротивлением нагрузки (СН); уметь определять входное сопротивление отрезка ЛП при заданных значениях его длины ВС и СН, а также знать методику согласования и трансформации сопротивлений в эквивалентной ЛП с помощью отрезков ЛП.

Знать классификацию линий передачи СВЧ по степени связности и типу волн: поперечные (ТЕМ), электрические E (ТМ), магнитные H (ТЕ), гибридные (ЕН) ЭМВ.

Рассмотреть традиционные ЛП СВЧ-систем, такие как призматический волновод (ПВ), цилиндрический волновод (ЦВ), коаксиальный волновод (КВ), с целью приобретения навыков построения структуры поля и расчета основных параметров (фазовая и групповая скорости, длина волны, коэффициент фазы, критическая частота, характеристическое сопротивление) в зависимости от типа волны и размеров направляющей системы.

2.2 Линии передачи ИС СВЧ

Учитывая, что основой построения любой ИС СВЧ являются микрополосковые линии передачи, необходимо знать их классификацию и конструкции, а для основных типов, таких как симметричная полосковая линия (СПЛ), несимметричная полосковая линия (НПЛ), микрополосковая линия (МПЛ), симметричная щелевая линия (СЩЛ), несимметричная щелевая линия (НЩЛ), компланарная линия (КЛ), уметь определять рабочий тип волны, структуру ЭМП в линии и производить расчет основных характеристик.

Контрольные вопросы

- 1 Основные параметры, характеризующие ЛП и режим работы.
- 2 Входное сопротивление отрезка эквивалентной ЛП при заданных значениях его длины ВС и СН.
- 3 Методика согласования и трансформации сопротивлений в эквивалентной ЛП с помощью отрезков ЛП.
- 4 Классификация линий передачи СВЧ по степени связности и типу волн.
- 5 Структура поля и параметры волн E и H в призматическом волноводе.
- 6 Структура полей и основные параметры волн типа E и H в цилиндрическом волноводе.

- 7 Токи на стенках волноводов при распространении различных типов волн.
- 8 Структура полей и условия их существования в коаксиальной линии.
- 9 Конструкции для основных типов МПЛ (СПЛ, НПЛ, СЦЛ, КЛ).
- 10 МПЛ: определение, конструкция, рабочий тип волны, структура ЭМП в линии, расчет основных характеристик.
- 11 СЦЛ: определение, конструкция, рабочий тип волны, структура ЭМП в линии, расчет основных характеристик.
- 12 НЦЛ: определение, конструкции двух разновидностей линии, рабочий тип волны, структура ЭМП в линии, расчет основных характеристик.
- 13 КЛ: определение, конструкция, два типа поперечных волн в линии, структура ЭМП в линии, расчет основных характеристик.
- 14 Линии передачи оптического диапазона: разновидности и основные характеристики.

3 Элементная база ИС СВЧ

3.1 Декомпозиционный подход при проектировании ИС СВЧ

При изучении данного раздела следует усвоить способы описания многополюсников СВЧ (классический и волновой); знать определение многополюсника СВЧ; уметь определять матрицы рассеяния простейших неоднородностей и на их основе – матрицы рассеяния сложного устройства.

Знать сущность и три этапа декомпозиционного подхода как основу машинного проектирования ИС СВЧ.

Контрольные вопросы

- 1 Понятие многополюсника СВЧ.
- 2 Сущность классического и волнового способов описания многополюсников СВЧ.
- 3 Определение матриц рассеяния и передачи.
- 4 Матрицы рассеяния элементарных неоднородностей ЛП: поворот линии на произвольный угол, скачок размеров ЛП, Т-образное разветвление, открытый конец ЛП.
- 5 Сущность методов декомпозиции и рекомпозиции и их место в машинных методах проектирования ИС СВЧ.

3.2 Типичные неоднородности в ЛП

Необходимо четко представлять сущность метода Олинера и границы его использования для расчета характеристик открытых линий передачи и типичных неоднородностей в них.

Используя метод Олинера, уметь характеризовать типичные неоднородности в НПЛ: скачок ширины полосы НПЛ, поворот НПЛ на произвольный угол, Т-образное разветвление НПЛ, поперечную щель в токонесущей полоске НПЛ, отверстие в токонесущей полоске НПЛ.

Знать матрицы рассеяния для типичных неоднородностей в СЦЛ: скачок ширины линии, поворот СЦЛ на произвольный угол, Т-образное разветвление СЦЛ, поперечную перемычку в СЦЛ.

Контрольные вопросы

1 Сущность метода Олинера и границы его использования для расчета характеристик открытых линий передачи и типичных неоднородностей в них.

2 Показать, как используется метод Олинера для анализа типичных неоднородностей в НПЛ: скачка ширины полосы, поворота на произвольный угол, Т-образного разветвления, поперечной щели в токонесущей полоске, отверстия в токонесущей полоске.

3 Записать матрицы рассеяния для типичных неоднородностей в СЦЛ: скачка ширины линии, поворота СЦЛ на произвольный угол, Т-образного разветвления СЦЛ, поперечной перемычки в СЦЛ.

3.3 Узлы ИС СВЧ

В состав современных ИС СВЧ входят различные узлы и устройства, выполняющие определенные функции по управлению параметрами сигнала, такими как амплитуда, частота, фаза и поляризация. В процессе изучения данного раздела следует обратить внимание на конструкции и принцип работы пассивных узлов СВЧ. Для четкого понимания физики работы таких узлов необходимы знания, полученные при изучении предыдущих разделов. Поэтому перед изучением материала данного раздела рекомендуется повторить основные положения предыдущих разделов и проверить усвоение материала с помощью контрольных вопросов.

В ходе изучения данного раздела необходимо четко усвоить классификацию фильтров СВЧ по типу частотной характеристики, а также получить понятие о расчете резонансной частоты, коэффициента передачи и нагруженной добротности. Следует знать, каким образом реализуются многозвенные фильтры СВЧ с четвертьволновыми и непосредственными связями, а также режекторные фильтры.

При изучении направленных ответвителей мощности и балансных устройств СВЧ, которые служат для ответвления энергии СВЧ, регулировки мощности проходящей волны, сложения и разделения сигналов, измерений и коммутаций в трактах СВЧ, необходимо знать, что основой для анализа этих устройств является матрица рассеяния, конкретная форма которой определяется геометрией узла и особенностями электромагнитных процессов, которые в нем протекают. Следует обратить внимание на использование матрицы рассеяния узлов при решении разнообразных задач, а также на функциональные особенности этого или иного СВЧ-узла, обуславливающие возможности его использования на практике.

В трактах радиорелейных линий, приемников СВЧ используются вентили, пропускающие волну практически только в одном направлении и тем самым улучшающие согласование ЛП с оконечными устройствами. Следует освоить принципы, положенные в основу работы резонансных вентилях и вентилях на смещении поля, а также невзаимных и взаимных фазовращателей.

В последние годы наибольшее распространение из невзаимных устройств получают циркуляторы – трех- или четырехплечные невзаимные узлы, пропускающие волну между соседними плечами лишь в определенном направлении. На использовании циркуляторов основано построение большого числа функциональных схем: вентилях, согласованных полосовых и режекторных фильтров, переключателей, разделительных фильтров и ряда других устройств.

Особое внимание следует уделить изучению устройств на основе р-і-п-диодов как наиболее перспективных для применения в ИС СВЧ.

В результате изучения данного раздела необходимо знать принцип работы и конструктивное исполнение следующих узлов: трансформаторов типов волн (переходы между различными видами ЛП: СПЛ, НПЛ, СЩЛ, НЩЛ, КЛ); аттенюаторов и фазовращателей СВЧ-сигналов в микрополосковом исполнении; направленных ответвителей мощности и кольцевых мостов в интегральном исполнении; частотных фильтров и их основные характеристики; согласующих устройств и их реализацию на основе микрополосковых и щелевых линий; микрополосковых ферритовых вентилях и циркуляторов, а также устройств на р-і-п-диодах (аттенюаторы, фазовращатели, переключатели).

Контрольные вопросы

- 1 Фильтры типов волн. Назначение, принцип работы.
- 2 Переходы между различными видами ЛП: СПЛ, НПЛ, СЩЛ, НЩЛ, КЛ. Конструкции и принцип работы.
- 3 Типы резонаторов. Основные параметры: резонансная частота, добротность.
- 4 Четвертьволновой и полуволновой микрополосковые резонаторы.
- 5 Потери энергии в резонаторе. Собственная, внешняя и нагруженная добротности.
- 6 Способы возбуждения резонаторов.

7 Аттenuаторы и фазовращатели СВЧ-сигналов в микрополосковом исполнении. Принцип работы, конструкции и основные параметры.

8 Направленные ответвители мощности и кольцевые мосты в интегральном исполнении. Принцип работы, конструкции и основные параметры.

9 Частотные фильтры, их классификация и основные характеристики.

10 Полосовой и режекторный фильтры и их эквивалентные схемы. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики.

11 Согласующие устройства и их реализация на основе микрополосковых и щелевых линий.

12 Микрополосковые ферритовые вентили и циркуляторы. Принцип работы, конструкции и основные параметры.

13 Устройства на р-і-п-диодах: аттenuаторы, фазовращатели, переключатели. Принцип работы, конструкции и основные параметры.

3.4 Интегральные излучающие элементы

Прежде чем приступить к изучению материала данного раздела, рекомендуется повторить основные положения раздела 1.3 «Излучение и дифракция электромагнитных волн» и проверить усвоение материала с помощью контрольных вопросов.

В результате изучения данного раздела необходимо усвоить, чем определяются основные характеристики излучателей: диаграмма направленности (ДН), коэффициент направленного действия КПД, коэффициент усиления антенны. Следует знать конструкции простейших полосковых и щелевых излучателей, физические основы принципа работы и их типичные характеристики: диаграмму направленности, коэффициент направленного действия, КПД, коэффициент усиления, поляризационную характеристику.

Необходимо иметь представление о конструктивных и электрических характеристиках решетки излучателей (РИ); знать, что такое коэффициент использования поверхности (КИП) системы излучателей и как он связан с амплитудно-фазовым распределением (АФР) поля на элементах РИ. Следует четко представлять, как определяется множитель решетки для простейшего амплитудно-фазового распределения поля (равноамплитудного и синфазного).

Контрольные вопросы

1 Привести примеры простейших полосковых и щелевых излучателей и пояснить физику процесса излучения.

2 Дать определение диаграммы направленности (ДН), коэффициента направленного действия, КПД, коэффициента усиления антенны.

3 Дать определение решетки излучателей и привести классификацию по способу питания элементов РИ.

4 Привести формулу для множителя решетки при равноамплитудном и синфазном распределении питающих токов в элементах РИ.

5 Как влияет АФР на КИП решетки излучателей и ее ДН?

6 Как оценить приближенно максимальный коэффициент направленного действия антенной решетки по ее диаграмме направленности?

4 Структура и методы расчета современных ИС СВЧ

4.1 Планарные и объемные интегральные схемы СВЧ

При рассмотрении данного круга вопросов важно отметить, что переход к интегральной технологии и ИС не только явился отображением практических потребностей, но и целиком и полностью соответствует диалектической концепции развития радиоэлектроники.

Современные радиофизика, радиоэлектроника (РЭ) и в целом системы для обработки больших массивов информации неуклонно следуют по пути изучения и освоения все более коротковолновых диапазонов электромагнитных волн, а также волн другой природы: акустоэлектронных, магнитостатических и др. В последнее десятилетие весьма интенсивно исследуются и технически осваиваются диапазоны коротких волн – сантиметровых, миллиметровых, субмиллиметровых и световых. Эффективность научного и технического освоения и использования в народном хозяйстве и в прикладных проблемах достижений радиофизики и радиоэлектроники существенно зависит от состояния и возможностей элементной базы: источников и приемников излучения, канализирующих, излучающих и колебательных систем и других компонентов аппаратуры. Особое значение приобретают новые методы построения устройств СВЧ, основанные на планарных интегральных схемах и (или) объемных интегральных схемах.

В настоящее время ОИС СВЧ являются высшим этапом развития идей интегральной технологии в приборостроении. В ОИС СВЧ-структурах радиосигнал обрабатывается не только в плоскости схемы (планарные ИС), но и «по вертикали» (ОИС). Использование трехмерной конструкции расположения базовых элементов (БЭ) и обработка сигнала во всем объеме, с одной стороны, открывают широкие возможности для улучшения электродинамических, массогабаритных, климатических, радиационных и других параметров радиофизической, радиоэлектронной, вычислительной аппаратуры (например, только использование трехмерной конструкции расположения микропроцессоров в ЭЦВМ позволило увеличить быстродействие на порядок), но с другой – требуют интенсивной разработки новых адекватных физических и математических моделей БЭ, создания эффективных вычислительных методов анализа и синтеза их электродинамических свойств. При этом адекватные модели должны быть достаточно точными (электродинамический уровень строгости) и позволять определять параметры за допустимое для автоматизированной системы проектирования время (для систем обработки информации – это функционирование в реальном масштабе времени). Требование высокой точности модели является определяющим.

Идеологическую основу ОИС СВЧ составляет принцип конструкционного соответствия, согласно которому ОИС есть такой метод построения СВЧ-модуля, когда в модуль логически могут быть включены БЭ, не только разработанные специально для ОИС, но и используемые в планарных ИС, «традиционной» технике СВЧ и др. Диалектика развития радиоэлектроники привела к созданию ОИС СВЧ, а это, в свою очередь, требует не только и, возможно, не столько эффективных вычислительных алгоритмов анализа и синтеза базовых элементов, но и (а это, может быть, самое главное) глубокого понимания существа физических процессов, происходящих в данном конкретном устройстве. Лишь когда такие ясность и понимание достигнуты, можно приступать к разработке адекватных вычислительных алгоритмов. Построенные на такой основе алгоритмы и программы для автоматизированного проектирования устройств СВЧ, как правило, оказываются оптимальными и с чисто вычислительной точки зрения.

Другим основным положением ОИС СВЧ является принцип: каждому базовому элементу – оптимальную для него линию передачи (принцип оптимальности базового элемента). Дело в том, что к настоящему времени предложено, разработано и применяется большое число (более 120) типов линий передачи (ЛП), однако свои функциональные «обязанности» данный базовый элемент выполнит в полной мере, если он будет создан на основе подходящей для него линии передачи. Анализ известных конструкций БЭ подтверждает такое положение. Созданные на основе ОИС модули СВЧ РЭА имеют массогабаритные параметры, на один-три порядка лучшие (!), нежели СВЧ-модули на основе сочетания металлических волноводов и планарных ИС.

В результате изучения данного раздела необходимо знать основные принципы построения планарных ИС СВЧ. Следует иметь представление об объемной ИС СВЧ (ОИС СВЧ) и принципе конструктивного соответствия как идеологической основе ее построения. Необходимо знать перспективы развития ОИС СВЧ и области их применения.

Контрольные вопросы

- 1 Назвать основные принципы построения планарных ИС СВЧ.
- 2 Дать определение ОИС СВЧ и привести принцип конструктивного соответствия как идеологическую основу ее построения.
- 3 Привести примеры конструктивного исполнения типовых узлов в ОИС СВЧ.
- 4 Назвать перспективы развития ОИС СВЧ и области их применения.

4.2 Современные методы расчета ИС СВЧ

Переход к интегральной технологии, ИС НЧ и СВЧ потребовал, прежде всего, разработки и реализации новых принципов проектирования РЭА. На первый план выдвинулась необходимость самого широкого использования ЭВМ и, главным образом, гибридных комплексов ЭВМ – ЭЦВМ и АВМ. Оказалось, что только мощные гибридные комплексы в состоянии решать современные задачи

проектирования ИС. Так родилась и теперь бурно развивается новая область научно-технического прогресса – автоматизированное проектирование РЭА.

Переход к автоматизированному проектированию РЭА потребовал пересмотра старых и создания новых адекватных моделей БЭ, из которых компонуется данная РЭА. При этом на первый план выдвигается требование адекватности модели реальному БЭ. Если раньше удовлетворительной считалась точность 10–20 % (и даже меньше), что в значительной степени определялось возможностью механической подстройки некоторых элементов РЭА и подгонки их под необходимые параметры (после изготовления устройства), то ИС (и тем более ОИС), по существу, не позволяют этого делать (за исключением, может быть, некоторых активных элементов, расположенных, как правило, на выносной панели). В силу сказанного обстоятельства резко повышаются требования к точности модели БЭ, которая возросла на один-два порядка. В проектировании БЭ последнее обуславливает необходимость перехода к моделям на электродинамическом уровне строгости. В особенности это сказывается на БЭ, предназначенных для РЭА в высокочастотной части сантиметрового диапазона и более коротковолновых участках электромагнитного спектра. Из потребностей практики появилось и теперь интенсивно развивается новое научное направление – электродинамические основы автоматизированного проектирования ИС и ОИС. В свою очередь, для эффективного решения задач автоматизированного проектирования СВЧ-модулей РЭА требуется создание парка ЭЦВМ и АВМ с существенно большими ресурсами, новых вычислительных методов и алгоритмов и гибридных (ЭЦВМ+АВМ) вычислительных комплексов.

В этом процессе наглядно проявляется диалектическое единство метода и объекта исследования: для более точного описания модели необходимо использование эффективных вычислительных алгоритмов, а их создание, в свою очередь, требует глубокого знания физической стороны дела. Только на основе четкой физической картины явления можно построить достаточно эффективный вычислительный алгоритм.

После изучения данного раздела необходимо освоить сущность и особенности современных методов расчета ИС СВЧ: метод эквивалентных границ, метод интегральных уравнений, численно-аналитические методы, модифицированный метод неортогональных рядов как пример численно-аналитического метода. Знать основные разновидности и возможности современных систем автоматизированного проектирования (САПР) ИС СВЧ, уметь указать основные преимущества и недостатки САПР.

Контрольные вопросы

- 1 Чем обусловлено широкое применение САПР при разработке современных ИС СВЧ?
- 2 Какие методы расчета используются при проектировании ИС СВЧ и в чем состоит сущность этих методов?
- 3 Назовите основные численные методы, используемые в САПР.

4 Назовите основные недостатки численных методов.

5 Назовите основные пакеты САПР, которыми можно воспользоваться для синтеза и моделирования узлов ИС СВЧ. Какие численные методы используются в названных САПР для расчета элементов и узлов СВЧ?

4.3 Технологии изготовления ИС СВЧ

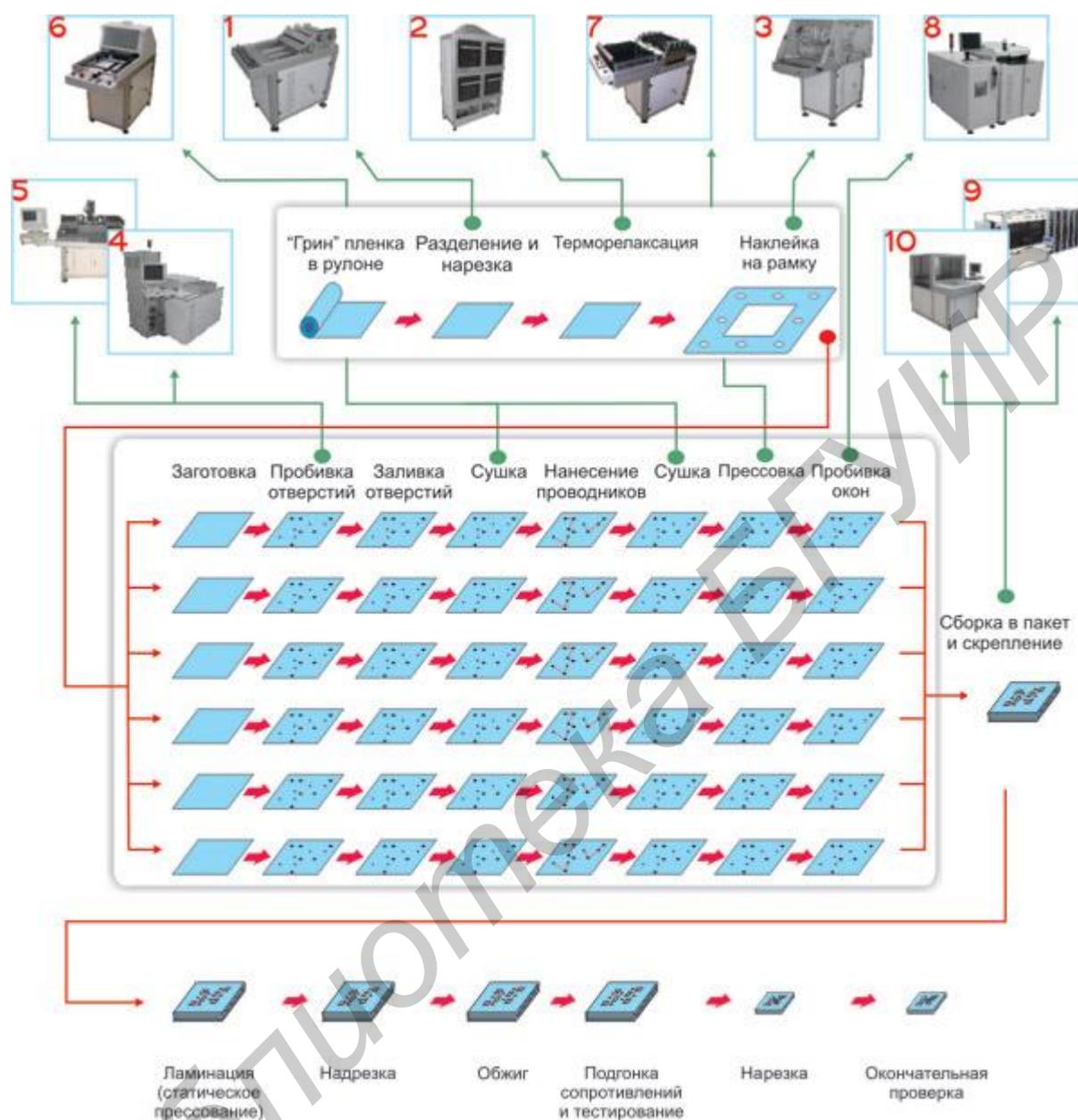
В настоящее время при производстве интегральных модулей СВЧ применяются три основных технологии: тонкопленочная, толстопленочная и LTCC-технология. Первые две широко используются в производстве традиционных схем микроэлектроники. Третья получила развитие в последнее время и связана с разработкой ОИС СВЧ.

LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic – НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СОВМЕСТНО ОБОЖЖЕННАЯ КЕРАМИКА) – технология производства керамических многослойных электро-, радио- и микроволновых компонентов, модулей и плат.

Основные преимущества технологии LTCC:

- температура обжига порядка 850 °С позволяет применять материалы с малым удельным сопротивлением, такие как золото и серебро, вместо молибдена и вольфрама, которые используются в высокотемпературной технологии;
- в качестве основы модулей и плат могут быть применены пленки с различными термофизическими характеристиками (например, с рабочей частотой свыше 30 ГГц и температурой до 3 500 °С);
- лучшая теплопроводимость по сравнению с обычными печатными платами;
- возможность создания в слоях пассивных элементов R, L и C, что обеспечивает компактность модулей и плат;
- каждый слой инспектируется до сборки модуля и при необходимости может быть заменен, что повышает процент выхода годных изделий;
- очень хорошая герметизация слоев;
- технологический цикл многослойных керамических модулей экологически чист и компактен;
- оборудование при производстве относительно простое и недорогое;
- многие процессы могут быть автоматизированы при серийном производстве;
- сокращение производственных циклов по сравнению с обычными толстопленочными технологиями (параллельные процессы).

Типовой технологический процесс изготовления модулей по LTCC-технологии



В процессе изучения данного раздела необходимо усвоить сущность тонкопленочной, толстопленочной и LTCC-технологий. Следует знать особенности, преимущества и недостатки каждой из них. Необходимо выделить перспективные методы.

Контрольные вопросы

1 Назвать основные этапы процесса изготовления модулей СВЧ по тонкопленочной технологии.

2 Назвать основные этапы процесса изготовления модулей СВЧ по толстопленочной технологии.

- 3 Назвать основные этапы процесса изготовления модулей СВЧ по LTCC-технологии.
- 4 Перечислить основные преимущества и недостатки тонкопленочной технологии.
- 5 Перечислить основные преимущества и недостатки толстопленочной технологии.
- 6 Перечислить основные преимущества и недостатки LTCC-технологии.
- 7 Укажите перспективные методы производства ИС СВЧ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Указания к выполнению контрольной работы

Контрольные задания составлены в 100 вариантах. Каждый студент выполняет одну контрольную работу. Вариант задания определяется двумя последними цифрами номера студенческого билета:

m – предпоследняя цифра, n – последняя.

При выполнении контрольной работы студент должен придерживаться следующих правил:

1 Прежде чем выполнять какой-либо расчет, укажите его цель, дайте ссылку на источник, откуда берете расчетные соотношения (номер литературы по списку), и номер формулы.

2 Поясните все вновь вводимые обозначения.

3 Напишите общую формулу, подставьте в нее числовые значения известных величин, приведите результаты промежуточных вычислений и конечный результат. В промежуточных вычислениях размерности величин не указываются; в конечном результате приведение размерности обязательно.

4 Все величины должны выражаться в стандартных единицах Международной системы единиц СИ.

5 Все расчеты должны выполняться с точностью до третьей значащей цифры.

6 Определение векторных величин следует сопровождать рисунком с указанием направления векторов.

7 Графики строятся на миллиметровой бумаге. Они должны содержать стандартный масштаб, размерности величин и расчетные точки. Рисунки должны быть разборчивыми.

8 При выполнении контрольной работы необходимо указывать номер студенческого билета, номер варианта и фамилию.

9 В конце работы следует привести список использованной литературы и расписаться.

Контрольная работа

Задача 1. Плоская однородная электромагнитная волна распространяется в безграничной полупроводящей среде вдоль оси z . Известны амплитуда на-

пряженности электрического поля E_m , частота источника поля f , удельная проводимость среды s , ее относительная диэлектрическая проницаемость ϵ и абсолютная магнитная проницаемость $m_a = m_0$.

Пользуясь данными соответствующего варианта, необходимо:

- 1 Определить коэффициент фазы b и коэффициент затухания a распространяющейся волны.
- 2 Найти модуль $|w|$ и фазу φ комплексного волнового сопротивления W .
- 3 Записать выражения для комплексных амплитуд и мгновенных значений напряженности электрического и магнитного полей.
- 4 Определить расстояние z_0 , на котором амплитуда волны убывает в 1 000 раз.
- 5 Вычислить значения фазовой скорости волны.
- 6 Найти длину волны в данной среде.

Таблица вариантов 1

m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ϵ ,	80	75	70	65	60	50	40	30	20	20
f , МГц	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_m , В/м	50	60	70	80	90	100	105	110	115	120
s , Сим/м	2,0	4,0	5,0	6,0	10	15	10	6,0	8,0	4,0

При решении этой задачи следует помнить о том, что классификация сред по проводимости производится исходя из соотношения между плотностями токов проводимости и смещения.

Если плотности токов соизмеримы, то среда полупроводящая. В этом случае b , a и W зависят от электрических параметров среды и частоты электрических колебаний. От этих же величин зависят длина волны в исследуемой среде и фазовая скорость.

Задача 2. В прямоугольном волноводе, выполненном из идеально проводящего материала с поперечными размерами $a \times b$, требуется:

- 1 Определить критическую и выбрать рабочую длину волны в волноводе.
- 2 Выписать компоненты поля заданного типа волны.
- 3 Изобразить графически эпюры распределения векторов \dot{E} и \dot{H} вдоль соответствующих сторон волновода. Нарисовать эскиз, иллюстрирующий распределение токов проводимости и токов смещения.

4 Рассчитать передаваемую мощность, если амплитуда электрической составляющей поля в пучности равна 1 В/м , а также предельно допустимую мощность ($E_{\text{проб}} = 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$).

5 Рассчитать значение фазовой и групповой скорости волны в волноводе.

6 Определить типы волн, которые могут при выбранной длине волны распространиться в данном волноводе, а также при длине волны, в четыре раза меньшей, чем выбранная.

Таблица вариантов 2

m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a, м	0,02	0,02	0,04	0,04	0,06	0,06	0,08	0,08	0,05	0,02
b, м	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02	0,04	0,02	0,05	0,02

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип волны	H ₁₀	H ₂₀	H ₁₁	H ₁₂	H ₂₀	H ₁₁	H ₁₀	H ₂₀	H ₁₁	H ₁₀

Решение задачи целесообразно начинать с графического изображения структуры поля волны заданного типа. После этого необходимо выписать составляющие векторы напряженности электрического и магнитного поля изображаемой волны, учитывая закон, по которому они изменяются.

Задача 3. Необходимо согласовать микрополосковую симметричную или несимметричную линии с заданным значением Z_0 с активной нагрузкой $R_L = qZ_0$ с полосой частот от f_H до f_B . Модуль коэффициента отражения $|\Gamma|$ на входе перехода $|\Gamma| \leq |\Gamma_{\text{дон}}|$. Согласование следует произвести ступенчатым переходом с максимально плоской характеристикой.

Требуется определить:

- 1) количество ступеней перехода N и его общую длину;
- 2) коэффициенты отражения от ступеней перехода $|\Gamma_i|$;
- 3) волновые сопротивления Z_{0i} и геометрические размеры каждой ступени (ширину и толщину полоски токонесущего проводника ступени a_i микрополосковой симметричной (СМПЛ) или несимметричной (НМПЛ) ЛП);
- 4) рассчитать и построить частотную зависимость в полосе частот от $0,8 f_H$ до $1,2 f_B$ при числе точек не менее 20.

Таблица вариантов 3

M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Z_0 , Ом	100	25	150	50	70	75	80	50	75	25
e	1	1	1	2,2	2,3	2,4	1	1	2,1	2,6
Тип линии	СМПЛ			НМПЛ			СМПЛ		НМПЛ	
Толщина подложки d , мм	2,0	1,5	1,0	0,5	0,5	0,3	0,2	0,15	0,2	0,1

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_B , ГГц	4,5	5,5	6,0	15	12,5	13,5	10,0	11,0	11,5	12,3
f_H , ГГц	2,3	2,4	4,0	7,5	7,0	8,0	6,0	5,5	6,2	5,9
q	0,5	0,3	0,25	2	1,8	0,33	2,2	0,32	2,1	0,28
$ \Gamma_{don} $	0,08	0,06	0,08	0,09	0,02	0,12	0,12	0,14	0,11	0,10

Задача 4. Необходимо определить размеры резонатора на заданном типе колебаний H_{mnl} или E_{mnl} на заданной рабочей частоте f . Зарисовать конструкцию резонатора и метод его возбуждения.

Таблица вариантов 4

m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Конструкция резонатора	призматический					цилиндрический				
Тип колебаний	H_{101}	H_{112}	H_{102}	E_{111}	E_{121}	H_{111}	H_{121}	H_{011}	H_{112}	E_{012}

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота f , ГГц	16	17	18	9	10	13	14	15	36	37
Метод возбуждения	штырь			петля			штырь			

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОГРАММА	3
ВВЕДЕНИЕ	3
1 ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ	3
1.1 Основные уравнения электродинамики.....	3
1.2 Статические, стационарные и монохроматические ЭМП.....	3
1.3 Излучение и дифракция электромагнитных волн.....	4
2 ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ КАК ОСНОВА ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ (ИС) СВЧ	4
2.1 Общая теория линий передачи.....	4
2.2 Линии передачи ИС СВЧ.....	5
3 ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ИС СВЧ	5
3.1 Декомпозиционный подход при проектировании ИС СВЧ.....	5
3.2 Типичные неоднородности в ЛП.....	6
3.3 Узлы ИС СВЧ.....	6
3.4 Интегральные излучающие элементы.....	6
4 СТРУКТУРА И МЕТОДЫ РАСЧЕТА СОВРЕМЕННЫХ ИС СВЧ	7
4.1 Планарные и объемные интегральные схемы СВЧ.....	7
4.2 Современные методы расчета ИС СВЧ.....	7
4.3 Технологии изготовления ИС СВЧ.....	7
ЛИТЕРАТУРА	7
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	9
ВВЕДЕНИЕ	9
Контрольные вопросы.....	9
1 ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ	9
1.1 Основные уравнения электродинамики.....	9
Контрольные вопросы.....	9
1.2 Статические, стационарные и монохроматические ЭМП.....	10
Контрольные вопросы.....	10
1.3 Излучение и дифракция электромагнитных волн.....	11
Контрольные вопросы.....	12
2 ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ КАК ОСНОВА ПОСТРОЕНИЯ ИС СВЧ	13
2.1 Общая теория линий передачи.....	13
2.2 Линии передачи ИС СВЧ.....	13
Контрольные вопросы.....	13
3 ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ИС СВЧ	14
3.1 Декомпозиционный подход при проектировании ИС СВЧ.....	14
Контрольные вопросы.....	14
3.2 Типичные неоднородности в ЛП.....	15
Контрольные вопросы.....	15
3.3 Узлы ИС СВЧ.....	15
Контрольные вопросы.....	16
3.4 Интегральные излучающие элементы.....	17
Контрольные вопросы.....	17
4 СТРУКТУРА И МЕТОДЫ РАСЧЕТА СОВРЕМЕННЫХ ИС СВЧ	18
4.1 Планарные и объемные интегральные схемы СВЧ.....	18
Контрольные вопросы.....	19
4.2 Современные методы расчета ИС СВЧ.....	19
Контрольные вопросы.....	20
4.3 Технологии изготовления ИС СВЧ.....	21
Контрольные вопросы.....	22
КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ	23
УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	23
КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА	23

Учебное издание

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВЧ-ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Программа, методические указания и контрольные задания по курсу
«Основы проектирования СВЧ-интегральных схем»
для студентов специальности I-41 01 02
«Микро- и нанoeлектронные технологии и системы»
заочной формы обучения

Составитель:
Кирильчук Валерий Борисович

Редактор С. Б. Саченко
Корректор М. В. Тезина

Подписано в печать
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 1,5.

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л.
Заказ 579.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6