

Оглавление

Оглавление	3
Условные обозначения	5
Введение	6
1. Уравнения и объекты электродинамики	15
1.1. Уравнения Максвелла и виды граничных задач	15
1.2. Интегральные соотношения электродинамики.....	22
1.3. Среды и их параметры	33
1.4. Поверхности и граничные условия на них	45
1.5. Источники электромагнитного поля	58
1.6. Симметрия в электродинамике, принцип зеркального изображения	71
1.7. Периодические структуры	82
2. Излучение, антенны	98
2.1. Излучение электромагнитных волн в свободное пространство	98
2.2. Поглощающие поверхности	106
2.3. Электродинамическое моделирование антенных решеток.....	112
2.4. Задачи рассеяния	127
2.5. Антенны с малыми электрическими размерами	132
3. Теория цепей СВЧ	145
3.1. Линии передачи и волноводы.....	145
3.2. Многополюсники СВЧ.....	162
3.3. Матрицы рассеяния недиссипативных, взаимных и симметричных многополюсников.....	170
3.4. Составные многополюсники, анализ СВЧ схем	182
3.5. Особенности моделирования полосковых устройств.....	189
3.6. СВЧ периодические структуры и фильтры	199
3.7. Ферритовые устройства СВЧ	213
3.8. Эквивалентные схемы СВЧ структур	228
4. Методы решения граничных задач электродинамики	242
4.1. Операторные уравнения, метод моментов	242
4.2. Метод интегральных уравнений	254
4.3. Метод конечных элементов	284
4.4. Метод конечных разностей во временной области	296
4.5. Асимптотические методы	308
5. Оптимизация в системах моделирования.....	333
5.1. Введение в оптимизацию	333

5.2. Методы оптимизации прямого поиска	341
5.3. Градиентные методы оптимизации	348
5.4. Оптимизация по совокупности показателей качества.....	353
Заключение.....	365
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	366

Введение

В последние десятилетия в ряде отраслей науки и инженерии произошли изменения, которые без преувеличения можно назвать революционными. Они связаны с появлением и широким распространением компьютерных систем, поддерживающих процесс проектирования устройств разных типов. Мы ограничимся системами, ориентированными на разработку радиоэлектронных устройств (РЭУ).

Под РЭУ понимают самые разнообразные устройства, принцип действия которых основан на формировании и преобразовании электрических сигналов и электромагнитных полей. Можно очень долго говорить об их классификации. Мы остановимся на разделении РЭУ на низкочастотные (НЧ) и высокочастотные (ВЧ). Часто также используют термин сверхвысокочастотные (СВЧ) РЭУ. Здесь в качестве классификационного признака используется диапазон частот, в котором функционирует устройство.

Отличительной чертой НЧ РЭУ является то, что его размеры много меньше длины электромагнитной волны на верхней границе рабочего диапазона частот. Выполнение этого простого соотношения имеет весьма далеко идущие последствия. В частности, оно позволяет использовать для описания электрических процессов в РЭУ упрощенные математические модели, основанные на широко известных уравнениях электрических цепей: законах Ома и Кирхгофа. Указанные модели с хорошей точностью описывают реальные процессы только в относительно НЧ диапазонах, когда отмеченное выше неравенство выполняется с большим запасом. Ограничение со стороны высоких частот эквивалентно ограничению на скорость, с которой происходят электромагнитные процессы в РЭУ. Поэтому законы Ома и Кирхгофа являются законами электро и магнитостатики.

Особенностью электростатического поля является постоянство потенциала на поверхности идеального проводника. Другими словами, напряжение поля на поверхности металлического тела не зависит от положения точки на указанной поверхности, для которой оно определяется. Из этого свойства статического поля следует, что падение напряжения вдоль поверхности идеального проводника равно нулю независимо от его формы. Следовательно, равно нулю и его сопротивление.

Таким образом, форма проводников в НЧ РЭУ не влияет на их электрические характеристики. Их формирование происходит при помощи специальных элементов, имеющих конечное сопротивление. К ним относятся резисторы, конденсаторы, индуктивности и т.д. Отметим, что с точки зрения уравнений электрических цепей размеры этих элементов не имеют никакого значения, важно только их сопротивление. Можно считать, что они равны нулю. Поэтому часто такие структуры называют сосредоточенными элементами.

Независимость электрических характеристик НЧ РЭУ от размеров и формы составляющих ее элементов позволяет разделить единый процесс проектирования РЭУ на самостоятельные этапы схемотехнического и конструкторского проектирования. На этапе схемотехнического проектирования осуществля-

1. Уравнения и объекты электродинамики

Исследование методов и объектов, составляющих основу современных СЭМ целесообразно начать с изучения граничных задач электродинамики. Этому вопросу посвящена первая глава данной книги. В ней мы познакомимся с понятием электромагнитного поля, опишем уравнения Максвелла, которым оно удовлетворяет, введем определение граничной задачи и рассмотрим разные виды таких задач. Кроме того, мы изучим ряд следствий, вытекающих непосредственно из уравнений Максвелла, которые принято называть интегральными соотношениями.

1.1. Уравнения Максвелла и виды граничных задач

Центральным для электродинамики является понятие электромагнитного поля. Оно описывается при помощи двух функций пространственных координат x, y, z и времени t :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x, y, z, t), \\ \mathbf{H}(x, y, z, t). \end{aligned} \tag{1.1.1}$$

Функция $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ описывает электрическое, а $\mathbf{H}(x, y, z, t)$ - магнитное поле. Функции $\mathbf{E}, \mathbf{H}$ - являются векторами, то есть они характеризуются не только своим абсолютным значением, но и направлением. Отметим, что здесь и далее для обозначения векторных и тензорных величин мы используем жирный шрифт. Объяснение физической природы электрического и магнитного полей не является предметом данной книги. Полагаем, что она дается в курсе физики. Мы же берем факт существования электромагнитного поля и способ его описания как данность.

Область физики, занимающаяся изучением процессов генерации, распространения и преобразования электромагнитных полей получила название электродинамики. Электродинамика дает наиболее полное описание электромагнитных явлений. Так из ее уравнений на низких частотах можно получить в качестве частных случаев упомянутые выше законы Ома и Кирхгофа. На высоких частотах уравнения электродинамики переходят в уравнения оптики: геометрическая оптика, физическая оптика и т.д.

Впервые уравнения электродинамики были предложены Дж.К. Максвеллом в 1882 г. Современная их запись принадлежит О. Хевисайду. Уравнения электродинамики по имени их автора носят название уравнений Максвелла. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме могут быть записаны для случая произвольной зависимости векторов электрического и магнитного полей $\mathbf{E}(t), \mathbf{H}(t)$ от времени t :

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \varepsilon_a \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma^e \mathbf{E} + \mathbf{j}^e, \tag{1.1.2}$$

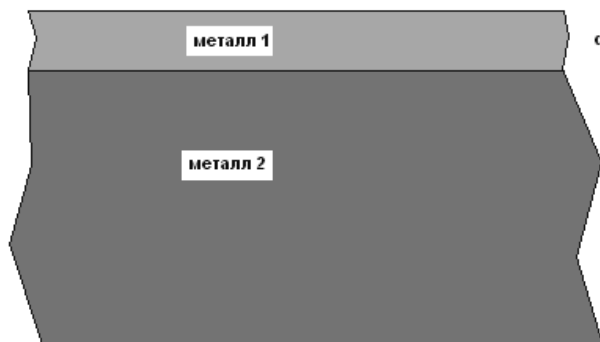


Рис. 1.4.6. Двухслойная структура из металлов

Важность этой структуры обусловлена тем, что в печатных схемах СВЧ часто применяются именно многослойные проводники. Основной слой (металл 2 на рис. 1.4.6), как правило, выполняется из меди. Дополнительный слой наносится на внешнюю поверхность проводника с целью защиты его от внешних воздействий. В качестве материала для такого слоя используют серебро или золото. С внутренней стороны наносятся различные слои, например, хрома или никеля. Эти слои необходимы для обеспечения хорошего механического контакта проводника с диэлектрической подложкой (адгезия). Проводимость адгезионных слоев существенно ниже меди. Поэтому часто, особенно на частотах выше 10 ГГц необходимо учитывать их влияние на поверхностное сопротивление.

Поверхностное сопротивление двухслойной структуры определяется следующей формулой [11]:

$$R_s = R_1 \frac{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 e^{\frac{4d}{\Delta}} + 2\left(\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 - 1\right) \sin\left(\frac{2d}{\Delta}\right) e^{\frac{2d}{\Delta}} - \left(\frac{R_2}{R_1} - 1\right)^2}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 e^{\frac{4d}{\Delta}} - 2\left(\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 - 1\right) \cos\left(\frac{2d}{\Delta}\right) e^{\frac{2d}{\Delta}} + \left(\frac{R_2}{R_1} - 1\right)^2}, \quad (1.4.24)$$

где $R_{1,2}$ - поверхностные сопротивления металла 1,2, d - толщина слоя металла 1, Δ - толщина его скин – слоя. Отметим, что вид ГУ для двухслойной структуры не отличается от вида условий Щукина - Леонтовича.

Двухсторонние импедансные ГУ. Наряду с односторонними известны двухсторонние импедансные ГУ, которые применяются для описания тонких пленок разного вида. Такие пленки частично пропускают электромагнитное поле, то есть являются полупрозрачными структурами. По этой причине в ГУ, которые их описывают входят поля существующие на обеих поверхностях пленки.

3.8. Эквивалентные схемы СВЧ структур

В этом разделе мы рассмотрим вопрос о построении эквивалентных схем двух- и четырехполюсников СВЧ. Следует сказать, что эквивалентная схема является особой формой описания реального объекта, полная информация о котором содержится в его матрице рассеяния. Поэтому мы будем исходить из того, что она уже рассчитана тем или иным образом и наша задача состоит в построении такой схемы, состоящей из относительно простых элементов, которая имеет матрицу рассеяния достаточно хорошо совпадающую с матрицей рассеяния исходного многополюсника.

Чаще всего в качестве элементарных блоков для построения эквивалентной схемы используют сосредоточенные элементы. В СВЧ диапазоне также иногда возникает необходимость включения в эквивалентную схему отрезков ЛП.

Смысл в построении эквивалентной схемы состоит в том, что часто с ее помощью значительно проще решить многие практические задачи, чем с помощью матрицы рассеяния. К таким задачам относится, например, согласование комплексной нагрузки.

Проще всего построить эквивалентную схему двухполюсника, матрица рассеяния которого сводится к одному элементу - коэффициенту отражения S_{11} . Переход к Z или Y матрицам позволяет найти входное сопротивление Z_i или проводимость Y_i :

$$Z_i = \frac{1}{Y_i} = Z_c \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}, \quad (3.8.1)$$

Z_c - характеристическое сопротивление ЛП, подходящей к двухполюснику.

Первый этап построения эквивалентной схемы на этом можно считать законченным. Она представляется в виде конечной нагрузки с сопротивлением Z_i . На втором этапе анализируется поведение сопротивления в полосе частот. Этот анализ позволяет раскрыть внутреннюю структуру нагрузки и представить ее в виде соединенных определенным образом сосредоточенных элементов.

Первым делом необходимо выяснить имеет нагрузка потери или нет. Нагрузке без потерь соответствует модуль коэффициента отражения равный или, по крайней мере, близкий к единице и реактивный импеданс с нулевой действительной частью. В этом случае в эквивалентной схеме присутствуют исключительно реактивные L, C элементы. Наша задача состоит в том, чтобы построить схему, которая в заданном диапазоне частот имеет входное сопротивление близкое к полученному с помощью СЭМ.

В общем случае для построения эквивалентной схемы рассматривают дробно-рациональную функцию частоты Z_a , которой аппроксимируют полученное сопротивление Z_i :

$$Z_a(f) = \frac{\sum_{n=0}^N a_n f^n}{\sum_{m=0}^M b_m f^m}. \quad (3.8.2)$$