

## **ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ**

**С**овременный этап развития электроники СВЧ характеризуются как широким распространением гибридных и монолитных интегральных схем, так и улучшением энергетических и информационных характеристик мощных электронных приборов. В значительной степени эти достижения обусловлены разработкой и применением новых, более совершенных колебательных и волноведущих систем, обеспечивающих максимальную эффективность взаимодействия потоков заряженных частиц, распространяющихся в твердом теле, плазме или вакууме, с высокочастотным электромагнитным полем. Большую роль сыграла и разработка точных, универсальных методов расчета электродинамических систем, позволяющих оптимизировать их конструкцию.

Физические законы и явления, лежащие в основе принципа действия сверхвысокочастотных электродинамических систем, их характеристики, параметры и конструкции, методы расчета и проектирования составляют предмет дисциплины «Электродинамика и техника СВЧ», которая занимает важное место в системе подготовки инженера электронной техники. Она завершает общетеоретическую подготовку студентов, обеспечивая их одновременно специальными знаниями в области СВЧ-техники.

Сочетание в одной дисциплине общих и специальных вопросов позволяет наглядно продемонстрировать, как фундаментальные положения электродинамики используются на практике для анализа и проектирования различных технических устройств, в том числе с помощью

ЭВМ, а также обеспечить единство изложения всех разделов дисциплины.

Настоящий учебник состоит из трех частей. В первой части излагаются основные положения классической электродинамики. Основное внимание уделяется электромагнитным волнам и особенностям их распространения в различных средах. Вторая часть содержит основы теории волноводов, резонаторов и замедляющих систем, включая численные методы их расчета и анализ простейших неоднородностей в линиях передачи. Описание электромагнитного поля в указанных элементах СВЧ-трактов производится с помощью векторов Герца, что обеспечивает единый подход к анализу всех типов волн и видов колебаний в линиях передачи и резонаторах, а также позволяет наиболее естественно перейти к описанию численных методов их расчета. В третьей части вводятся основные понятия теории СВЧ-цепей, используемые для анализа свойств самых распространенных СВЧ-устройств — фильтров, направленных ответвителей, делителей и сумматоров мощности, невзаимных СВЧ-устройств. Приводятся сведения о численных методах расчета и проектирования СВЧ-устройств, основанных на декомпозиционном подходе.

В основу книги положен курс лекций, читаемых автором в Ленинградском электротехническом институте (ЛЭТИ).

1990 г.

---

## **ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ**

**З**а 15 лет, прошедших со времени первого издания этой книги, область применения электромагнитных полей микроволнового диапазона существенно расширилась. Получили широкое распространение сотовые и спутниковые системы мобильной связи, системы определения местоположения подвижных объектов, системы предупреждения столкновений на транспорте. Быстрыми темпами шло развитие радиолокации, радиоастрономии, радиопротиводействия. Существенно расширилось применение энергии микроволн в технологических и энергетических целях.

Эти успехи стали возможны благодаря разработке новых типов микроволновых приборов, схем, устройств и систем. Были созданы новые типы линий передачи, резонаторов, антенных систем, искусственные материалы, обладающие необычными электрофизическими свойствами в микроволновом диапазоне. Стремительное развитие численных методов моделирования высокочастотных электромагнитных полей в сложных электродинамических системах привело к образованию нового раздела науки — вычислительной электродинамики.

Изменилась и терминология. В соответствии с решениями международной электротехнической комиссии (МЭК) сверхвысокими частотами (СВЧ) называют участок спектра электромагнитных колебаний, ограниченный частотами 3...30 ГГц (см. приложение 14). Это составляет только часть того участка спектра электромагнитных колебаний, который ранее в русскоязычной

литературе традиционно называли «диапазоном СВЧ» и который охватывает значительно более широкую область частот, по крайней мере, в пределах от 0,3 до 300 ГГц. В настоящее время этот диапазон, в соответствии с мировой практикой, называют «микроволновым». Диапазон СВЧ входит в микроволновый диапазон как составная часть.

Указанные изменения потребовали переработки содержания учебника, что выразилось, прежде всего, в расширении параграфов, посвященных радиофизическим свойствам современных материалов, применяемых в микроволновой технике, и особенностям их взаимодействия с электромагнитным полем, вопросам излучения электромагнитных колебаний и их распространения в различных средах, методам компьютерного моделирования микроволновых полей и устройств.

Автор надеется, что предлагаемый учебник окажет помощь студентам, обучающимся по специальности «Электронные приборы и устройства», направлению «Электроника и микроэлектроника», а также магистрантам и аспирантам соответствующих специальностей. Книга будет также полезна специалистам, занимающимся разработкой и применением микроволновых приборов, устройств и систем, а также лицам, занимающимся эксплуатацией указанных изделий.

Автор выражает глубокую благодарность рецензентам — ведущему научному сотруднику ФГУП «НПП “Исток”, д. т. н., профессору Роберту Андреевичу Силину и заведующему кафедрой «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета, д. т. н., профессору Владиславу Алексеевичу Цареву за нелегкий труд по прочтению рукописи и ценные замечания, направленные на улучшение ее содержания.

Автор выражает также искреннюю признательность заведующему кафедрой Радиотехнической электроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» Виктору Болеславовичу Янкевичу за полезные обсуждения и помочь при подготовке рукописи к печати.

## ВВЕДЕНИЕ

Электродинамика — часть теоретической физики, в которой изучается электромагнитное взаимодействие заряженных частиц. Согласно современным представлениям, это взаимодействие осуществляется путем обмена квантами электромагнитного поля — фотонами. Фотоны обладают свойствами как частицы, так и волны, не имеют массы покоя и поэтому всегда находятся в движении. Скорость их распространения  $c = 299792458$  м/с — одна из фундаментальных физических констант, называемая скоростью света в свободном пространстве. Законы излучения и поглощения фотонов заряженными частицами изучаются в квантовой электродинамике.

В большинстве макроскопических электромагнитных явлений корпускулярные свойства фотонов практически не проявляются (за некоторыми исключениями — например, явление фотоэффекта). Так как в них участвует огромное число фотонов, допустимо считать, что пространство, в котором находятся заряженные тела, заполнено особым видом материи — электромагнитным полем. Существование электромагнитного поля проявляется в том, что оно воздействует с определенной силой

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (\text{B.1})$$

называемой силой Лоренца, на заряженные тела. В этом выражении электромагнитное поле характеризуется вектором напряженности электрического поля  $E(\mathbf{r}, t)$  и вектором магнитной индукции  $B(\mathbf{r}, t)$ ;  $q, \mathbf{v}$  — электрический заряд и скорость тела в данной инерциальной системе

координат;  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор тела в момент времени  $t$ . Поскольку электромагнитное поле воздействует на заряженные тела с определенной силой, оно способно производить работу по их перемещению. Следовательно, оно обладает энергией, массой и количеством движения. Закономерности протекания макроскопических электромагнитных процессов в различных средах (без учета квантовых эффектов) составляют предмет изучения классической электродинамики.

Свойства электромагнитного поля существенно зависят от характера его изменения во времени. Во многих случаях зависимостью электромагнитного поля от времени можно пренебречь. Такие поля называют *статическими*. В данной книге они не рассматриваются. Часто можно полагать, что электромагнитное поле изменяется во времени по гармоническому закону

$$\mathbf{a}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{A}(\mathbf{r}) \cos(\omega t + \phi), \quad (\text{B.2})$$

где  $a$  — любая составляющая вектора напряженности или индукции поля,  $A$  — ее амплитуда,  $\phi$  — начальная фаза,  $\omega$  — круговая частота, связанная с частотой изменения поля  $f$ , периодом изменения  $T$  и длиной волны в свободном пространстве  $\lambda$  соотношениями

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T = 2\pi c/\lambda.$$

Частоты изменения наблюдаемых электромагнитных полей лежат в очень широких пределах. Весь спектр электромагнитных колебаний разделен на отдельные диапазоны, в каждом из которых электромагнитное поле обладает определенными особенностями распространения и взаимодействия с веществом. Микроволновый диапазон



Рис. В.1

Часть спектра электромагнитных колебаний

пазон, в частности, расположен между радио- и оптическим диапазонами (рис. В.1). Он занимает участок спектра между частотами  $f_{\min} = 3 \cdot 10^8$  Гц (длина волны в свободном пространстве  $\lambda_{\max} = 1$  м) и  $f_{\max} = 3 \cdot 10^{11}$  Гц ( $\lambda_{\min} = 1$  мм). В радиодиапазоне характерные размеры устройства, как правило, много меньше длины волны, что позволяет использовать для анализа приближенные методы теории цепей. В оптическом диапазоне, напротив, размеры большинства объектов много больше длины волны, и к их анализу применимы методы геометрической оптики. В микроволновом диапазоне характерные размеры устройств соизмеримы с длиной волны. Это обстоятельство вынуждает производить анализ микроволновых устройств с помощью строгих методов классической электродинамики.

Микроволновый диапазон, в свою очередь делится на три поддиапазона:

- $f = 0,3\dots3$  ГГц,  $\lambda = 1\dots0,1$  м — ультравысокие частоты (дециметровые волны);
- $f = 3\dots30$  ГГц,  $\lambda = 10\dots1$  см — сверхвысокие частоты (сантиметровые волны);
- $f = 30\dots300$  ГГц,  $\lambda = 10\dots1$  мм — крайне высокие частоты (миллиметровые волны).

Иногда к микроволновому диапазону относят также поддиапазоны, прилегающие к нему со стороны радиодиапазона:

- $f = 30\dots300$  МГц,  $\lambda = 10\dots1$  м — высокие частоты (метровые волны),

и со стороны оптического диапазона:

- $f = 0,3\dots3$  ТГц,  $\lambda = 1\dots0,1$  мм — гипервысокие частоты (декимиллиметровые волны).

Освоение микроволнового диапазона началось позже, чем соседних, — только в 30-х гг. прошлого века. Это объясняется серьезными трудностями, с которыми столкнулись ученые и инженеры при разработке соответствующих технологий:

- соизмеримостью длины волны и характерных размеров приборов и устройств, что делает малоэффективным применение обычных линий передачи и колебательных контуров;

■ соизмеримостью периода колебаний и времени пролета носителей заряда в активной области прибора. Проявляющаяся при этом инерция носителей заряда нарушает нормальную работу приборов, эффективно функционирующих в радиодиапазоне;

■ незначительной, по сравнению с энергией теплового движения частиц при обычной температуре, энергией кванта электромагнитного поля, что затрудняет использование квантовых эффектов, успешно применяющихся в оптическом диапазоне для генерации и регистрации электромагнитных (световых) волн.

В то же время было известно, что электромагнитные колебания и волны микроволнового диапазона обладают целым рядом преимуществ по сравнению с другими диапазонами:

■ большей информационной емкостью каналов связи, пропорциональной произведению ширины полосы пропускания канала на отношение мощности сигнала к мощности шума. Так как ширина полосы пропускания канала пропорциональна несущей (центральной) частоте, а мощность шумов атмосферного, космического и искусственного происхождения в микроволновом диапазоне наименьшая, именно в этом диапазоне достигается наибольшая скорость передачи информации по открытых каналам связи;

■ возможностью направленной передачи и приема электромагнитной энергии, так как размеры антенн могут быть много больше длины волны;

■ прозрачностью земной атмосферы для электромагнитных волн микроволнового диапазона (за исключением нескольких узких полос поглощения в миллиметровом поддиапазоне), что открывает возможность приема излучения от внеземных объектов и космической связи;

■ избирательным поглощением микроволнового излучения веществом, особенно при низких температурах, позволяющим анализировать тонкие детали строения вещества.

Указанные особенности и преимущества обусловили разработку специальных методов генерации, усиления и

преобразования электромагнитных колебаний микроволнового диапазона, что потребовало значительных усилий многочисленных коллективов ученых и инженеров и больших материальных затрат. Эти усилия, стимулированные, прежде всего, необходимостью развития радиолокации, привели к тому, что в настоящее время электромагнитные колебания и волны микроволнового диапазона исследуются и применяются в самых разнообразных областях науки и техники. К важнейшим из них относятся:

- 1) радиолокация (исторически первая и до сих пор наиболее важная область применения электромагнитного поля микроволнового диапазона);
- 2) сотовые системы мобильной связи;
- 3) глобальные спутниковые системы мобильной связи и позиционирования;
- 4) системы ближней беспроводной связи (Blue Tooth, Wi-Fi, UWB и др.);
- 5) дальняя радиорелейная и кабельная связь;
- 6) космическая связь (непосредственное телевизионное вещание, связь с космическими аппаратами и орбитальными станциями);
- 7) радиоастрономия (прием и анализ микроволнового излучения космических объектов);
- 8) экспериментальная физика (нагрев и диагностика плазмы, радиоспектроскопия);
- 9) метрология (атомные стандарты времени и частоты);
- 10) технология (нагрев, сушка, спекание различных материалов);
- 11) энергетика (передача мощности на расстояние, питание интенсивных источников света);
- 12) химия (микроволновый органический синтез, пропаривание);
- 13) биология и медицина (изучение влияния микроволнового излучения на биологические объекты, анализ их собственного электромагнитного излучения, лечение различных заболеваний).

Основы классической теории электромагнитного поля были заложены М. Фарадеем, Дж. Максвеллом, Г. Герцем, Г. Лоренцем, А. Эйнштейном. Основы теории микроволновых линий передачи, резонаторов, замедляющих

систем заложили Л. Хаксли, Л. Бриллуэн, С. Рамо, Дж. Уинери, Р. Фано, Дж. Саусворт, Н. Марковиц, Л. Левин, Дж. Гинзтон и целый ряд других ученых. Большой вклад в электродинамику и микроволновую технику внесли российские ученые — И. Е. Тамм, Л. И. Мандельштам, Я. Н. Фельд, Л. А. Вайнштейн, Ю. А. Юров, Б. В. Каценеленбаум, Г. В. Кисунько, В. В. Никольский и многие другие исследователи.

В последние годы наблюдается быстрое расширение области применения электромагнитных полей микроволнового диапазона, что стимулирует появление новых типов микроволновых устройств, развитие компьютерных методов их расчета и проектирования. В свою очередь, появление новых микроволновых генераторов, усилителей, преобразователей, разработка новых материалов, линий передачи, фильтров и других устройств позволяет продвигать микроволновые технологии в новые области науки и техники.

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Скалярные величины обозначаются символами, набранными курсивом:  $a$ ,  $v$ ,  $A$ ,  $B$  и т. д. Векторные и тензорные величины, а также матрицы обозначаются символами, набранными прямым полужирным шрифтом:  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и т. д. В необходимых случаях обозначения тензоров и матриц заключаются в прямые скобки:  $|A|$ ,  $|B|$ , или надчеркиваются:  $\bar{\epsilon}$ ,  $\bar{\mu}$ . Комплексные амплитуды обозначаются точкой над символом:  $\dot{A}$ ,  $\dot{\mathbf{A}}$ . Величины электрического типа обозначаются верхним индексом  $e$ , а величины магнитного типа — верхним индексом  $m$ .

$\mathbf{A}^{e,m}$  — векторные потенциалы электрического и магнитного типов;

$\mathbf{B}$  — магнитная индукция;

$B$  — реактивная проводимость;

$c = 2,9979 \cdot 10^8$  м/с — скорость света в вакууме;

$C$  — емкость;

$\mathbf{D}$  — электрическая индукция;

$e = 2,71828$  — основание натуральных логарифмов;

$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл — абсолютная величина заряда электрона;

$\mathbf{E}$  — напряженность электрического поля;

$f$  — частота;

$g$  — фактор Ланде;

$G$  — активная проводимость;

$\mathbf{H}$  — напряженность магнитного поля;

$i$  — мнимая единица;

$i, I$  — ток;

$j, \mathbf{J}$  — плотность тока;

$k, \mathbf{k}$  — волновое число, волновой вектор;

$L$  — индуктивность;

$M$  — взаимная индуктивность;

$\mathbf{M}$  — намагниченность;

$n$  — показатель преломления среды;

- $n_p$ ,  $n_g$  — замедление фазовой и групповой  
 скоростей волны;  
 $P$  — мощность;  
 $p$  — плотность мощности (плотность потока  
 энергии);  
 $\mathbf{P}$  — электрическая поляризация;  
 $Q$  — добротность;  
 $q$  — заряд;  
 $R$  — активное сопротивление;  
 $u$ ,  $U$  — напряжение (разность потенциалов);  
 $v$  — скорость;  
 $W$  — энергия;  
 $w$  — плотность энергии;  
 $X$  — реактивное сопротивление;  
 $Y$  — полная проводимость;  
 $Y_0$  — характеристическая проводимость  
 среды;  
 $Y_c$  — характеристическая проводимость  
 линии передачи;  
 $Y_b$  — волновая проводимость линии передачи;  
 $Z$  — полное сопротивление;  
 $Z_0$  — характеристическое сопротивление  
 среды;  
 $Z_c$  — характеристическое сопротивление  
 линии передачи;  
 $Z_b$  — волновое сопротивление линии передачи;  
 $\alpha$  — постоянная затухания;  
 $\beta$  — постоянная фазы;  
 $\gamma = 3,52 \cdot 10^4$  Гц/(А/м) — гиромагнитная постоянная;  
 $\Gamma$  — вектор Герца;  
 $\delta$  — глубина проникновения;  
 $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость;  
 $\eta_0$  — характеристическое сопротивление  
 вакуума;  
 $\kappa$  — диэлектрическая восприимчивость;  
 $\lambda$  — длина волны в свободном пространстве;  
 $\lambda_c$  — критическая длина волны в линии  
 передачи;  
 $\lambda_b$  — длина волны в линии передачи;  
 $\mu$  — магнитная проницаемость;  
 $\Pi$  — вектор Пойнтинга;  
 $\rho$  — плотность объемного заряда;  
 $\rho_c$  — удельное сопротивление;  
 $\rho_\varphi$  — волновое сопротивление резонатора;  
 $\sigma$  — электропроводность;  
 $\tau$  — постоянная релаксации;  
 $\phi$  — фаза;  
 $\varphi^e$ ,  $\varphi^m$  — скалярный потенциал;  
 $\Phi$  — магнитный поток;  
 $\chi$  — магнитная восприимчивость;  
 $v$  — подвижность;  
 $\omega$  — круговая частота.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОСНОВЫ  
КЛАССИЧЕСКОЙ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

---

# ГЛАВА 1

## ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

### 1.1. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

**В** основе классической электродинамики лежат *уравнения Максвелла*, впервые сформулированные им в 1864 г. В современных обозначениях они имеют следующий вид:

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J}; \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0; \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho; \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (1.4)$$

Все величины, входящие в эти уравнения, являются функциями координат (радиус-вектора  $\mathbf{r}$ ) и времени  $t$ . Плотность электрического тока  $\mathbf{J}$  и удельная плотность заряда  $\rho$  характеризуют распределение источников электромагнитного поля в пространстве и во времени. С этими величинами связаны «функции источников» — *электрическая индукция* (электрическое смещение)  $\mathbf{D}$  и *напряженность магнитного поля*  $\mathbf{H}$ . Кроме этого, в уравнения Максвелла входят «силовые функции» — *напряженность электрического поля*  $\mathbf{E}$  и *магнитная индукция*  $\mathbf{B}$ <sup>1</sup>, определяющие в соответствии с выражением (B.1) силу, действующую на заряженные тела. Знаком « $\times$ » обозначается векторное произведение, а знаком « $\cdot$ » — скалярное. Знак скалярного произведения опускается, если это не может вызвать неправильного толкования.

---

<sup>1</sup> Логичнее было бы называть напряженностью магнитного поля вектор  $\mathbf{B}$ , а магнитной индукцией — вектор  $\mathbf{H}$ , однако исторически сложились используемые в книге определения.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)