

**ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ***Р.А. Силин*

© ФАЗИС, 2002
М.: ФАЗИС, 2002. Х+438 с.
ISBN 5-7036-0073-1

В настоящей монографии изложение материала опирается на теорию симметрии периодических волноводов. Рассмотрены основные закономерности распространения волн в периодических волноводах; подробно изучены свойства периодических волноводов для их применения в электронных СВЧ-приборах. Основная часть книги, как и прежде, посвящена наиболее широко применяемым одномерно-периодическим замедляющим системам, при этом многие разделы написаны с новых позиций. Вместе с тем рассмотрены и двумерно-периодические системы, представляющие интерес не только для создания электронных приборов повышенной мощности, но и для получения искусственных диэлектриков с необычными квазиоптическими свойствами. Отмечен вклад в рассматриваемую науку отечественных специалистов, описаны зарубежные достижения.

Важным достоинством монографии является возможность ее использования в учебном процессе: каждая глава снабжена упражнениями и списком литературы; в конце книги приведены ответы и решения.

Предисловие

В технике сверхвысоких частот (СВЧ) периодические волноводы служат, в основном, для уменьшения скорости распространения электромагнитных волн по сравнению со скоростью в пустом пространстве. Они используются в качестве замедляющих систем (ЗС) в приборах с длительным (в масштабе периода колебаний) взаимодействием: лампах бегущей и обратной волны, магнетронах, платинотронах, лазерах на циклотронном резонансе, линейных ускорителях и сепараторах заряженных частиц, электронно-лучевых трубках для СВЧ-осциллографов, черенковских счетчиках. Кроме того, периодические волноводы используются в качестве линий задержки, фильтров, элементов антенн с бегущей и обратной волной. Они применяются также в бытовых и промышленных СВЧ-печах.

В предлагаемой книге периодические волноводы рассматриваются, в основном, с точки зрения их использования в качестве ЗС электронных приборов с длительным взаимодействием, хотя ряд сведений полезен и для других применений. В основу книги положена монография Р.А. Силина и В.П. Сазонова «Замедляющие системы» (М.: Сов. радио, 1966). Эта монография много лет остается настольной книгой разработчиков электронных приборов СВЧ и линейных ускорителей заряженных частиц. Она широко используется в курсах лекций вузов по технике СВЧ, электронным приборам, электродинамике. Книга переведена на английский язык и издана за рубежом.

Предлагаемая книга задумана как второе издание упомянутой выше монографии. В процессе переработки, однако, пришлось внести так много изменений и дополнений, что получилась новая книга. В частности, существенно переработаны и дополнены главы по теории симметрии ЗС, теории спиральных, штыревых и резонаторных ЗС, добавлены разделы, посвященные лемме Лоренца и ее следствиям, комплексным волнам и теории подобия. Существенно расширен раздел, посвященный двумерно-периодическим системам. Библиография существенно сокращена и обновлена. Она не претендует на полноту и установление приоритета в тех или иных вопросах.

Книга рассчитана как на специалистов, занятых разработкой и эксплуатацией соответствующих приборов, так и на студентов и аспирантов, изучающих технику СВЧ и электронные приборы.

Теории ЗС посвящен ряд монографий. Если не считать книг, посвященных частным вопросам (диафрагмированные волноводы, аксиально симметричные ЗС), то, кроме упомянутой выше, нам известны ещё лишь три монографии, посвященные данному вопросу: R.M. Bevens, *Electromagnetic slow wave system* (N.Y., London, Sydney: John Wiley and Sons, 1964), З.И. Тараненко, Я.К. Трохименко, «Замедляющие системы» (Киев: Техника, 1965), В.С. Михалевский, «Элементы теории сверхвысокочастотных замедляющих систем» (Ростов-на-Дону: Ростовский гос. университет, 1964). Все эти издания являются в настоящее время библиографической редкостью.

Предлагаемая книга отличается большей полнотой изложения свойств ЗС и включением современных сведений. Наибольшее внимание уделено качественному описанию свойств тех или иных характеристик ЗС и универсальным методам расчета различных классов ЗС. Так, метод радиальных матриц передачи позволяет рассчитывать большинство спиральных ЗС; проекционный метод в сочетании с методом конечных элементов - широкий класс резонаторных и штыревых ЗС; метод многопроводных линий - штыревые ЗС. Эти методы реализованы в виде программ для ЭВМ. Особо следует отметить двумерно-периодические структуры, которые широко используются в технике СВЧ. Они применяются в качестве излучателей в фазированных антенных решетках [1], в качестве искусственных диэлектриков при создании линз, призм и других квазиоптических элементов для электромагнитных волн СВЧ [2], в электронных приборах повышенной мощности [3] в качестве замедляющих систем, обеспечивающих взаимодействие электромагнитных волн с электронным потоком. Волны в периодических структурах исследуются также в строительной технике, авиа- и кораблестроении [4], ибо соответствующие каркасы можно рассматривать как двумерно-периодические решетки.

Основное внимание уделено изучению распространения электромагнитных волн в замедляющих системах с точки зрения возможности их использования в электронных приборах СВЧ. Вместе с тем в книге освещен ряд вопросов, относящихся к антенным решеткам и искусственным диэлектрикам. Появились новые разделы, посвященные теории симметрии двумерно-периодических систем, искусственным диэлектрикам, условиям взаимодействия электронных потоков с полем в двумерно-периодических системах и т.д. Общие закономерности распространения волн в двумерно-периодических структурах и в кристаллах в значительной мере сходны. В физике твердого тела хорошо развита зонная теория [7, 8, 9], которая применима к описанным в настоящей книге структурам. Различие состоит лишь в числе измерений периодичности. Поэтому описание волноредущих свойств двумерно-периодических структур оказывается несколько проще и нагляднее, чем в физике твердого тела. Именно поэтому настоящая книга может оказаться полезной не только лицам изучающим и занимающимся электронными приборами, фазированными и дифракционными решетками, но и тем, кто начинает изучать физику твердого тела. С другой стороны в физике твердого тела, как правило, не интересуются пространственными гармониками поля и сводят задачу к рассмотрению дисперсионных характеристик в первой зоне Бриллюэна, не интересуются и структурой поля. В теории замедляющих систем и антенных решеток эти вопросы изучаются, так как амплитудами этих гармоник определяется эффективность взаимодействия поля с электронами и интенсивность дифракционных максимумов. В этом смысле изучение волн в двумерно-периодических системах в электродинамике оказывается более полным, чем в физике твердого тела.

* * *

Список литературы

1. Амтей Н., Галиндо В., Ву Ч. Теория и анализ фазированных антенных решеток. Под ред. А. Ф. Чаплина. М.: Мир, 1974. 455 с. Перевод кн.: Amitay N., Galindo V., Wu C. P. Theory and analysis of phased array antennas. New York-London-Sydney-Toronto, 1972.
2. Collin R.E. Field Theory of Guided Waves. New York-Toronto-London: McGraw Hill, 1960. 606 p.
3. Doehler O., Mourier G. Theory of two-dimensional travelling-wave tube Microwellenrohren. Munchen, 1960. S. 97.
4. Бобровицкий Ю.И., Генкин М.Д., Маслов В.П., Римский-Корсаков А.В. Распространение волн в конструкциях из тонких стержней и пластин. М.: Наука, 1974. 102 с.
7. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. М.: Сов. радио, 1966. 632 с.
8. Бриллюэн Л., Пароди М. Распространение волн в периодических структурах. Под ред. П. А. Разина. М.: ИЛ, 1959. 457 с. Перевод кн.: Brillouin L., Parodi M. Propagation des ondes dans les milieux periodiques. Paris: Masson, Dunod, 1956.
9. Зейтц Ф. Современная теория твердого тела. Под ред. Г.С.Жданова. М.-Л.: ГИТТЛ, 1949. 736с. Перевод кн.: Seitz F. The modern theory of solids. New York-London: McGraw Hill, 1940. 698 p.

Оглавление

Предисловие

Глава 1. Основные понятия и определения. 1.1. Замедляющая система 1.2. Плоские волны. 1.3. Сопротивление связи

Глава 2. Симметрия замедляющих систем. 2.1. Значение свойств симметрии 2.2. Понятие симметрии. Основные элементы симметрии. 2.3. Преобразование компонент электромагнитного поля при операциях точечной симметрии. 2.4. Связь компонент поля в симметричных точках замедляющей системы. 2.5. Свойства систем, обладающих одним элементом точечной симметрии. 2.6. Периодические структуры. 2.7. Скользящая плоскость симметрии. 2.8. Винтовая ось CN_s . 2.9. Винтовая ось $C\infty_s$ (s -заходная спираль). 2.10. Системы, в которых элементы симметрии не коммутируют с трансляцией. 2.11. Примеры практических рекомендаций на основе теории симметрии

Глава 3. Лемма Лоренца и ее следствия 3.1. Двухчастотная лемма Лоренца. 3.2. Равенство электрической и магнитной энергии в ячейке без потерь. 3.3. Ортогональность нормальных волн по объему ячейки. 3.4. Ортогональность нормальных волн по сечению ячейки. 3.5. Равенство скорости переноса энергии и групповой скорости. 3.6. Уравнения возбуждения замедляющих систем электронным потоком

Глава 4. Пространственные гармоники. 4.1. Определение пространственных гармоник и их дисперсионные характеристики. 4.2. Пространственные гармоники и волновые уравнения. 4.3. Поле замедляющих систем, однородных в одном из поперечных направлений. 4.4. Поле пространственных гармоник в системах, однородных по координате

Глава 5. Волны в одномерно-периодических системах. 5.1. Волны в электрических цепочках. Дисперсия цепочек четырехполосников. 5.2. Сопротивление связи цепочек четырехполосников. 5.3. Комплексные волны. 5.4. Теорема о периодическом волноводе из N проводников. 5.5. Законы подобия. 5.6. Замедляющие системы, дифракционные решетки, антенны с бегущей волной

Глава 6. Спиральные замедляющие системы. 6.1. Типы спиральных замедляющих систем. 6.2. Свойства симметрии спиральных замедляющих систем 6.3. Типы волн спирали в экране. 6.4. Выражения для поля в спирально проводящем цилиндре. 6.5. Дисперсионная характеристика симметричного типа волны. 6.6. Структура

поля в спирально проводящем цилиндре. 6.7. Сопротивление связи спирально проводящего цилиндра. 6.8. Усредненные граничные условия

Глава 7. Радиальные матрицы передачи для расчета спиральных замедляющих систем.

7.1. Радиальные матрицы передачи. 7.2. Спираль в экране и спираль со стержнем. 7.3. Спираль в диэлектрической трубке. 7.4. Спираль с различной формой диэлектрических опор. 7.5. Спираль, контактирующая с тонким проводящим слоем. 7.6. Спиральные замедляющие системы с анизотропно проводящим экраном

Глава 8. Расчет спиральных замедляющих систем методом Фурье. 8.1. Роль пространственных гармоник и способы их учета. 8.2. Ленточная и нитевидная спирали. 8.3. Сопротивление связи однозаходной ленточной спирали. 8.4. Многозаходная спираль

Глава 9. Замедляющие системы типа «гребенка». 9.1. Резонаторные замедляющие системы. 9.2. Качественная оценка дисперсионной характеристики бесконечно широкой гребенки. 9.3. Дисперсия гребенки на высших типах волн. 9.4. Гребенка конечной ширины. 9.5. Метод частичных областей. 9.6. Расчет дисперсионной характеристики гребенки в приближении одной волны. 9.7. Расчет сопротивления связи. 9.8. Метод эквивалентных схем. 9.9. Расчет сопротивления связи методом эквивалентных схем

Глава 10. Цепочки связанных резонаторов. 10.1. Оценка характеристик цепочки связанных резонаторов с помощью эквивалентных схем. 10.2. Структура поля в гладком волноводе. 10.3. Матрицы проводимости и рассеяния отрезка волновода. 10.4. Матрица рассеяния сочленения волноводов. 10.5. Сопротивление связи ЦСР. 10.6. Результаты исследования характеристик ЦСР

Глава 11. Многоступенчатые замедляющие системы. 11.1. Основные понятия и определения. 11.2. Пространственные гармоники многоступенчатых систем. 11.3. Расчет дисперсии многоступенчатых систем. 11.4. Сопротивление связи многоступенчатых систем

Глава 12. Анодные блоки магнетронов со связками. 12.1. Типы анодных блоков магнетронов и их свойства симметрии. 12.2. Дисперсия резонаторной системы со связками. 12.3. Сопротивление связи. 12.4. Влияние неоднородностей на характеристики анодных блоков

Глава 13. Метод многопроводных линий. 13.1. Примеры штыревых замедляющих систем. 13.2. Телеграфные уравнения. 13.2. Метод многопроводных линий. 13.3. Пределы применимости метода многопроводных линий

Глава 14. Одноступенчатые штыревые замедляющие системы. 14.1. Расчет дисперсии. 14.2. Расчет сопротивления связи одноступенчатых систем методом многопроводных линий. 14.3. О законах подобия штыревых систем

Глава 15. Многоступенчатые штыревые замедляющие системы. 15.1. Метод расчета многоступенчатых штыревых ЗС. 15.2. Дисперсия двухступенчатых систем. 15.3. Сопротивление связи двухступенчатых систем. 15.4. Приближенные оценки

Глава 16. Свойства симметрии двумерно-периодических систем. 16.1. Закономерности сочетания элементов симметрии. 16.2. Косоугольная система координат. 16.3. Группы симметрии двумерно-периодических ЗС. 16.4. Пространственные гармоники. 16.5. Примеры дисперсионных характеристик. 16.6. Свойства поверхностей дисперсии, обусловленные периодичностью структуры. 16.7. Ортогональные преобразования волнового уравнения. 16.8. Свойства, обусловленные зеркальными плоскостями симметрии. 16.10. Свойства, обусловленные поворотными осями симметрии. 16.11. Пример дисперсионной характеристики системы с осью C_4 . 16.12. Свойства, обусловленные зеркально-поворотными осями. 16.13. Свойства, обусловленные скользящими плоскостями, параллельными решетке. 16.14. Свойства, обусловленные скользящими плоскостями, перпендикулярными плоскости решетки. 16.15. Свойства, обусловленные осями C_2 . 16.16. Ортогональность нормальных волн

Глава 17. Многорядные штыревые замедляющие системы. 17.1. Метод многопроводных линий. 17.2. Об особенностях изочастот многорядных лестниц. 17.3. Сопротивление связи. 17.4. Многоступенчатые многорядные системы. 17.5. Пределы применимости метода многопроводных линий. 17.6. Влияние преобразования координат на форму записи уравнения дисперсии двумерно-периодической штыревой ЗС

Глава 18. Многоэтажные системы. 18.1. Одноступенчатые системы. 18.2. Двухступенчатые системы

Глава 19. Замедляющие системы как искусственные диэлектрики. 19.1. Сравнение оптических свойств кристаллов и искусственных диэлектриков. 19.2. Примеры искусственных диэлектриков. 19.3. Примеры «оптических явлений», изученных с помощью изочастот. 19.4. Законы преломления и пространственные гармоники. 19.5. Отражение волн от плоских границ периодических систем

Глава 20. Двумерно-периодические замедляющие системы, свернутые в цилиндр. 20.1. Условие синхронизма волн с электронными потоками. 20.2. Условие замыкания в цилиндр. 20.3. Условия синхронизма для системы с прямоугольной решеткой. 20.4. Условие синхронизма в системах с косоугольной решеткой. 20.5. Механизм обратной связи. 20.6. Широкополосность. 20.7. Крутизна перестройки частоты. 20.8. Вентильность

Глава 21. Замедляющие системы, ограниченные двумя плоскостями. 21.1. Условия, накладываемые на волновой вектор. 21.2. Многопроводная линия, ограниченная плоскостями. 21.3. Элементарное рассмотрение косой системы типа «встречные штыри». 21.4. Косая гребенка. 21.5. Механизм обратной связи. 21.6. Особенности распределения поля в косых замедляющих системах

Глава 22. Двумерно-периодические структуры как фазированные антенные решетки. 22.1. Ячейка Флоке. 22.2. Природа слепых пятен. 22.3. Проекционный метод расчета антенных решеток

Заключение

Приложение 1. Группы симметрии замедляющих систем

Приложение 2. Элементы теории многополюсников

Приложение 3. Коэффициенты $li(h)$ в усредненных граничных условиях

Приложение 4. Волновая проводимость многопроводной линии с проводниками прямоугольного сечения

Ответы и решения

Предметный указатель

Информацию см. на сайте: www.aha.ru/~phaxis