

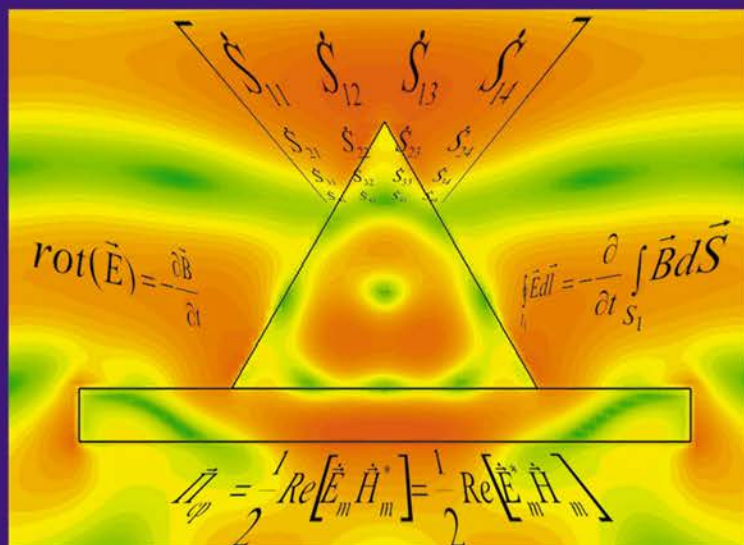
# ТЕОРИЯ И ТЕХНИКА СВЧ

*А. И. Астайкин*

*К. В. Троцюк*

*С. П. Ионова*

*В. Б. Профе*



А  
ФГУП  
«Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ»

*А. И. Астайкин, К. В. Троцюк, С. П. Ионова,  
В. Б. Профе,*

# ТЕОРИЯ И ТЕХНИКА СВЧ

Учебное пособие

Под редакцией  
доктора технических наук, профессора,  
заслуженного деятеля науки РФ А. И. Астайкина

Саров 2008

А

УДК 621.37  
ББК 32.85  
Т-33

**А. И. Астайкин, К. В. Троцюк, С. П. Ионова, В. Б. Профе.** Теория и техника СВЧ: Учебное пособие. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008, 464 с.

ISBN-978-5-9515-0109-7

Целью учебного пособия является обучение читателя основам теории СВЧ и проектирования микроволновых устройств. В пособии представлены основы электродинамики для расчета и проектирования микроволновых устройств.

Для иллюстрации материала приведен ряд примеров решения задач проектирования СВЧ устройств. Подробно рассмотрены наиболее важные этапы расчета основных функциональных узлов конструкций пассивных СВЧ устройств.

Учебное пособие ориентировано на читателя, имеющего базовые знания в области радиотехники и электроники. Может быть использовано в качестве справочного пособия студентами старших курсов технических вузов и инженерами при проведении расчетно-конструкторских работ.

**Рецензент:**

доктор физико-математических наук *В. А. Терехин*

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| <b>Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ</b>                           | 11 |
| 1.1. Задачи электродинамики  | 11 |
| 1.2. Вектор напряженности электрического поля $\vec{E}$                      | 12 |
| 1.3. Поток вектора $\vec{E}$ . Теорема Гаусса                                | 13 |
| 1.4. Вектор электрического смещения $\vec{D}$ .<br>Обобщенная теорема Гаусса | 14 |
| 1.5. Вектор магнитной индукции $\vec{B}$                                     | 15 |
| 1.6. Поток вектора $\vec{B}$   | 15 |
| 1.7. Вектор напряженности магнитного поля $\vec{H}$                          | 19 |
| 1.8. Закон электромагнитной индукции   | 22 |
| 1.9. Вывод дифференциальных уравнений электродинамики.<br>Ток смещения       | 23 |
| 1.10. Основные уравнения электродинамики                                     | 27 |
| 1.11. Сторонние токи   | 30 |
| 1.12. Энергия электромагнитного поля   | 32 |
| 1.12.1. Теорема Пойнтинга в интегральной форме                               | 32 |
| 1.12.2. Вектор Пойнтинга для комплексных амплитуд                            | 35 |
| 1.13. Граничные условия  | 39 |
| 1.13.1. Граничные условия для нормальных компонент<br>векторов поля          | 39 |
| 1.13.2. Граничные условия для тангенциальных компонент<br>векторов поля      | 42 |
| 1.14. Решение волнового уравнения для произвольной<br>передающей линии       | 45 |
| 1.15. Фазовая и групповая скорость волн. Длина волны<br>в линиях СВЧ         | 47 |
| 1.16. Типы волн  | 53 |
| 1.17. Дисперсия в линиях передачи СВЧ  | 55 |
| <b>Глава 2. ТЕОРИЯ ЦЕПЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ<br/>ПАРАМЕТРАМИ</b>               | 61 |
| 2.1. Эквивалентная схема линии с распределенными<br>параметрами              | 61 |
| 2.2. Телеграфные уравнения   | 62 |
| 2.3. Явления отражения волн в линиях   | 66 |
| 2.4. Входное сопротивление и волновое сопротивление<br>линии                 | 69 |
| 2.5. Основные соотношения теории длинных линий                               | 72 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Глава 3. ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ СВЧ</b>   | <b>83</b>  |
| 3.1. Радиочастотные кабели   | 83         |
| 3.2. Коаксиальная линия передачи   | 86         |
| 3.2.1. Волновое сопротивление коаксиальной линии<br>с ТЕМ волной                                     | 86         |
| 3.3. Двухпроводная линия передачи  | 90         |
| 3.4. Волноводные линии передачи  | 92         |
| 3.4.1. Типы волноводных линий  | 92         |
| 3.4.2. Прямоугольный волновод  | 94         |
| 3.4.3. Круглый волновод  | 110        |
| 3.4.4. П – и Н – волноводы   | 121        |
| 3.4.5. Запредельный волновод   | 122        |
| 3.4.6. Изгибы волноводного тракта  | 122        |
| 3.4.7. Особенности изготовления волноводов   | 123        |
| 3.5. Полосковые и микрополосковые линии передачи   | 125        |
| 3.5.1. Основные типы полосковых линий  | 125        |
| 3.5.2. Несимметричная полосковая линия   | 128        |
| 3.5.3. Симметричная полосковая линия   | 133        |
| 3.5.4. Связанные полосковые линии  | 136        |
| 3.5.4.1. Типы связанных полосковых линий   | 136        |
| 3.5.4.2. Симметричные полосковые линии с боковой<br>связью с тонкими проводниками                    | 138        |
| 3.5.4.3. Симметричные полосковые линии<br>с толстыми прямоугольными проводниками<br>с боковой связью | 140        |
| 3.5.4.4. Связанные полосковые линии<br>с круглыми проводниками                                       | 142        |
| 3.5.4.5. Симметричные полосковые линии<br>с лицевой связью   | 143        |
| 3.5.4.6. Несимметричные полосковые линии<br>с боковой связью   | 144        |
| 3.5.5. Способ изготовления полосковых линий  | 146        |
| 3.5.6. Материалы, используемые для подложек<br>полосковых линий                                      | 147        |
| 3.6. Электрическая прочность линий передачи СВЧ  | 149        |
| <b>Глава 4. СОГЛАСОВАНИЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ</b>  | <b>152</b> |
| 4.1. Коэффициент отражения   | 152        |
| 4.2. Согласование и КПД линии передачи   | 153        |
| 4.3. Круговая диаграмма полных сопротивлений.<br>Диаграмма Вольперта-Смита                           | 155        |
| 4.4. Принципы узкополосного согласования   | 162        |
| 4.4.1. Общие положения узкополосного согласования  | 162        |
| 4.4.2. Сосредоточенные реактивности  | 163        |
| 4.4.3. Шлейфы  | 164        |

|  |     |
|--|-----|
| 4.4.4. Четвертьволновый и полуволновой трансформаторы . . . . .                      | 166 |
| 4.4.5. Согласование с помощью нескольких каскадно включенных реактивностей . . . . . | 168 |
| 4.5. Широкополосное согласование . . . . .   | 169 |
| 4.5.1. Общие положения . . . . .   | 169 |
| 4.5.2. Ступенчатые переходы . . . . .  | 172 |
| 4.5.2.1. Приближенный метод расчета ступенчатых переходов . . . . .                  | 172 |
| 4.5.2.2. Методика расчета ступенчатых переходов . . . . .                            | 176 |
| 4.5.3. Плавные переходы . . . . .  | 179 |
| 4.6. Элементы СВЧ тракта . . . . .   | 182 |
| 4.6.1. Согласованные нагрузки . . . . .  | 182 |
| 4.6.2. Реактивные нагрузки . . . . .   | 185 |
| 4.6.3. Изоляторы . . . . .   | 187 |
| 4.6.3.1. Диэлектрические изоляторы . . . . .   | 187 |
| 4.6.3.2. Металлические изоляторы . . . . .   | 189 |
| 4.6.4. Повороты линий передач . . . . .  | 190 |
| 4.6.4.1. Повороты и изгибы коаксиальной линии . . . . .                              | 190 |
| 4.6.4.2. Повороты волноводной линии . . . . .  | 191 |
| 4.6.4.3. Повороты полосковой линии . . . . .   | 192 |
| 4.6.5. Соединители радиочастотные . . . . .  | 192 |
| 4.6.5.1. Требования к сочленениям СВЧ устройств . . . . .                            | 192 |
| 4.6.5.2. Коаксиальные соединители . . . . .  | 193 |
| 4.6.5.3. Волноводные сочленения . . . . .  | 198 |
| 4.6.6. Переходы . . . . .  | 200 |
| 4.6.6.1. Общие сведения . . . . .  | 200 |
| 4.6.6.2. Переходы между коаксиальными линиями . . . . .                              | 200 |
| 4.6.6.3. Переходы между волноводами . . . . .  | 203 |
| 4.6.6.4. Переходы от коаксиальной линии к волноводу . . . . .                        | 210 |
| 4.6.6.5. Полосковые переходы . . . . .   | 211 |
| 4.6.6.6. Переходы на замедляющие системы . . . . .                                   | 213 |
| 4.6.7. Высокочастотные окна вывода энергии . . . . .                                 | 215 |
| 4.6.7.1. Технические требования . . . . .  | 215 |
| 4.6.7.2. Коаксиальные окна вывода энергии . . . . .                                  | 216 |
| 4.6.7.3. Волноводные окна вывода энергии . . . . .                                   | 217 |

## Глава 5. МНОГОПОЛЮСНЫЕ УСТРОЙСТВА СВЧ . . . . . 219

|   |     |
|---|-----|
| 5.1. Принцип декомпозиции многополюсных устройств СВЧ . . . . .           | 219 |
| 5.2. Анализ четырехполюсников и двухполюсников с помощью матриц . . . . . | 220 |
| 5.3. Основные определения матричной теории . . . . .                      | 224 |
| 5.4. Матрица рассеяния . . . . .  | 227 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.5. Матрицы сопротивлений и проводимостей . . . . .                                    | 229 |
| 5.6. Соотношения между матрицами многополюсника . . . . .                               | 231 |
| 5.7. Перенумерация входов . . . . .   | 233 |
| 5.8. Зависимость матриц многополюсника<br>от положения плоскостей отсчета фаз . . . . . | 234 |
| 5.9. Понятие об идеальной и реальной матрицах . . . . .                                 | 235 |
| 5.10. Взаимные многополюсники . . . . .   | 236 |
| 5.11. Недиссипативные многополюсники . . . . .  | 238 |
| 5.12. Симметричные многополюсники . . . . .   | 240 |
| 5.13. Метод декомпозиции многополюсников . . . . .                                      | 241 |
| 5.14. Типы направленности многополюсников . . . . .                                     | 243 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Глава 6. НАПРАВЛЕННЫЕ ОТВЕТВИТЕЛИ, МОСТЫ<br/>И ДЕЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ . . . . .</b>                            | <b>246</b> |
| 6.1. Общие сведения . . . . .  | 247        |
| 6.2. Направленные ответвители на полосковой линии . . . . .  | 249        |
| 6.2.1. Направленные ответвители на симметричной<br>полосковой линии . . . . .                                | 250        |
| 6.2.1.1. Направленные ответвители<br>с лицевой связью . . . . .  | 250        |
| 6.2.1.2. Направленные ответвители<br>с боковой связью . . . . .  | 255        |
| 6.2.2. Направленные ответвители на несимметричной<br>полосковой линии . . . . .                              | 257        |
| 6.2.3. Многосекционные направленные ответвители . . . . .  | 258        |
| 6.2.4. Шлейфный направленный ответвитель . . . . .   | 264        |
| 6.3. Мостовые устройства СВЧ . . . . .   | 271        |
| 6.3.1. Гибридные кольца длиной $3\lambda/2$ . . . . .  | 272        |
| 6.3.2. Гибридное кольцо с неравным делением мощности<br>на выходах . . . . .                                 | 273        |
| 6.4. Делители и сумматоры мощности . . . . .   | 275        |
| 6.4.1. Назначение и область применения.<br>Принципиальные схемы делителей<br>и сумматоров мощности . . . . . | 275        |
| 6.4.2. Кольцевой делитель мощности длиной $\lambda/2$ . . . . .  | 282        |
| 6.4.3. Делитель с неравным делением мощности . . . . .   | 284        |
| 6.5. Направленные ответвители на коаксиальной линии . . . . .  | 286        |
| 6.5.1. НО на коаксиальной линии<br>с круглыми проводниками . . . . .   | 286        |
| 6.5.2. Трехдецибелльный направленный ответвитель<br>конструкции Кона . . . . .                               | 288        |
| 6.6. Направленные ответвители на волноводах . . . . .  | 291        |
| 6.6.1. Типы направленных ответвителей на волноводах . . . . .  | 291        |
| 6.6.2. Направленный ответвитель<br>с одним круглым отверстием связи . . . . .                                | 292        |

|  |     |
|--|-----|
| 6.6.3. Ответвитель с узкой щелью в широкой стенке<br>двух параллельных волноводов . . . . .                                  | 296 |
| 6.6.4. Ответвитель с крестообразным отверстием связи<br>в общей широкой стенке двух перпендикулярных<br>волноводов . . . . . | 297 |
| 6.6.5. Волноводный мост с несколькими отверстиями связи<br>в узкой стенке . . . . .  | 298 |
| 6.6.6. Волноводный «многодырочный»<br>направленный ответвитель с полной связью . . . . .                                     | 299 |
| 6.6.7. Волноводный щелевой мост . . . . .  | 301 |
| 6.6.8. Кольцевой волноводный мост . . . . .  | 303 |

## **Глава 7. ФИЛЬТРЫ СВЧ . . . . . 305**

|   |     |
|---|-----|
| 7.1. Назначение фильтров . . . . .  | 305 |
| 7.2. Классификация фильтров . . . . .   | 305 |
| 7.3. Технические требования . . . . .   | 306 |
| 7.4. Выбор типа конструкции . . . . .   | 307 |
| 7.5. Способы реализации элементов цепей<br>в конструкциях фильтров . . . . .        | 308 |
| 7.6. Фильтры-прототипы . . . . .  | 310 |
| 7.7. Фильтры нижних частот . . . . .  | 318 |
| 7.7.1. Характеристики ФНЧ . . . . .   | 318 |
| 7.7.2. Типы ФНЧ . . . . .   | 321 |
| 7.7.3. Методика расчета ФНЧ . . . . .   | 323 |
| 7.7.4. Расчет ФНЧ коаксиального типа . . . . .                                      | 324 |
| 7.7.5. Конструкция ФНЧ коаксиального типа . . . . .                                 | 328 |
| 7.7.6. Расчет ФНЧ на полосковой линии . . . . .                                     | 329 |
| 7.8. Фильтры верхних частот . . . . .   | 333 |
| 7.8.1. Характеристика ФВЧ . . . . .   | 333 |
| 7.8.2. Типы ФВЧ . . . . .   | 334 |
| 7.8.3. Расчет ФВЧ . . . . .   | 335 |
| 7.9. Полосно-пропускающие фильтры . . . . .   | 337 |
| 7.9.1. Характеристики ППФ . . . . .   | 337 |
| 7.9.2. Типы конструкций ППФ . . . . .   | 338 |
| 7.9.3. Частотные преобразования при переходе<br>от прототипа ФНЧ к ППФ . . . . .    | 339 |
| 7.9.4. ППФ на встречных стержнях с узкой<br>и средней полосой пропускания . . . . . | 342 |
| 7.9.5. Фильтр на встречных стержнях с широкой полосой<br>пропускания . . . . .      | 346 |
| 7.9.6. Полосно-пропускающий гребенчатый фильтр . . . . .                            | 352 |
| 7.10. Полосно-запирающие фильтры . . . . .  | 362 |
| 7.10.1. Типы ПЗФ . . . . .  | 362 |
| 7.10.2. Расчет ПЗФ . . . . .  | 363 |



|   |     |
|---|-----|
| <b>Глава 8. АТТЕНЮАТОРЫ</b> .....   | 373 |
| 8.1. Типы аттенюаторов .....  | 373 |
| 8.2. Фиксированные аттенюаторы<br>на сосредоточенных элементах .....              | 374 |
| 8.3. Предельные аттенюаторы .....   | 376 |
| 8.4. Аттенюаторы на делителях мощности .....                                      | 381 |
| 8.5. Поляризационные аттенюаторы .....  | 382 |
| 8.6. Электрически управляемые аттенюаторы .....                                   | 388 |
| <b>Глава 9. ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ</b> .....   | 392 |
| 9.1. Характеристики и свойства резонаторов .....                                  | 392 |
| 9.2. Типы резонаторов .....   | 394 |
| 9.2.1. Коаксиальные резонаторы .....  | 394 |
| 9.2.2. Волноводный резонатор полуволнового типа<br>прямоугольного сечения .....   | 395 |
| 9.2.3. Цилиндрический резонатор .....   | 396 |
| 9.3. Связь с объемными резонаторами .....   | 397 |
| 9.3.1. Связь с коаксиальными резонаторами .....                                   | 397 |
| 9.3.2. Связь с волноводными резонаторами .....                                    | 399 |
| <b>Глава 10. ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ</b> .....  | 401 |
| 10.1. Методы получения медленных волн .....                                       | 401 |
| 10.2. Основные характеристики замедляющих систем .....                            | 405 |
| 10.3. Методы расчета замедляющих систем .....                                     | 412 |
| 10.4. Спиральная замедляющая структура .....                                      | 415 |
| 10.5. Дисперсионная характеристика ЗС типа<br>цепочки связанных резонаторов ..... | 432 |
| <b>Глава 11. ФЕРРИТОВЫЕ УСТРОЙСТВА</b> .....                                      | 450 |
| 11.1. Свойства ферритовых материалов .....  | 450 |
| 11.2. Устройства СВЧ с ферритами .....  | 451 |
| 11.3. Невзаимные и управляющие устройства СВЧ<br>с ферритами .....                | 453 |
| 11.4. Фазовые циркуляторы .....   | 457 |
| 11.5. Ферритовые фазовращатели .....  | 460 |
| 11.6. Ферритовые фильтры .....  | 462 |
| Список литературы .....   | 464 |

Сигнал, поданный на вход II, делится между каналами A и B с фазами 0 и  $-\pi/2$  и получает в этих каналах дополнительное запаздывание  $-\varphi_0$  и  $-(\varphi_0 + \pi/2)$  соответственно, так что ко входам двойного T-моста сигналы приходят в противофазе и суммируются в его E-ответвлении, т. е. на входе III циркулятора. Аналогично осуществляется передача сигнала со входа III на вход IV и со входа IV на вход I.

Преимуществом фазовых циркуляторов перед циркуляторами на эффекте Фарадея является лучшая широкополосность и способность работать при более высоких мощностях. Последнее объясняется тем, что ферритовые пластины наклеивают на широкие стенки волноводов и этим обеспечивают хороший теплоотвод. Основной недостаток фазовых циркуляторов – увеличенные габариты и масса из-за наличия двух мостов.

Рассмотрим более миниатюрные 6-полюсные циркуляторы. Волноводный Y-циркулятор выполняют на основе H-плоскостного тройника, в центре которого помещают поперечно-намагниченный ферритовый цилиндр 1 с диэлектрической втулкой 2 (см. рис. 6.21,а). Поле подмагничивания создается внешними дисковыми постоянными магнитами 4. Принцип действия Y-циркулятора состоит в следующем. Поступающая на вход 1 волна разветвляется на две волны, огибающие феррит с двух сторон. Области существования вращающегося вектора H для этих волн попадают в ферритовый образец, причем направления вращения вектора H относительно направления поля подмагничивания оказываются противоположными. Из-за различия магнитных проницаемостей феррита  $\mu_+$  и  $\mu_-$  волны, огибающие ферритовый образец, имеют различные фазовые скорости. Размеры и параметры ферритовой вставки выбирают таким образом, чтобы эти волны приходили на вход II в фазе, а на вход III – в противофазе. Таким образом, передача колебаний со входа I происходит только на вход II. Так как Y-циркулятор обладает поворотной симметрией, можно утверждать, что будет иметь место передача со входа II на вход III и со входа III на вход I. Диэлектрическая втулка, окружающая ферритовый образец, способствует повышению устойчивости характеристик Y-циркулятора к величине напряженности подмагничивающего поля, а также способствует повышению температурной стабильности. Диэлектрические стержни 3 обеспечивают широкополосное согласование входов.

Наряду с волноводными широко применяются также малогабаритные Y-циркуляторы на полосковых линиях передачи (рис. 11.8,б). Принципы действия полосковых и волноводных Y-циркуляторов аналогичны.

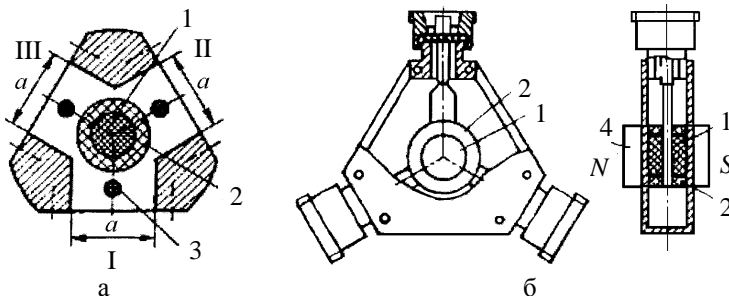


Рис. 11.8. Волноводный (а) и полосковый (б) Y-циркуляторы

Среди различных видов циркуляторов именно  $Y$ -циркуляторы получили наиболее широкое распространение. Это объясняется их простотой, малыми габаритами и массой.  $Y$ -циркуляторы весьма широкополосны. Рабочая полоса частот волноводных  $Y$ -циркуляторов достигает 30 %, полосковых – октавы.

## 11.5. Ферритовые фазовращатели

Ферритовые фазовращатели СВЧ [24] успешно конкурируют с фазовращателями на  $p$ - $i$ - $n$ -диодах и на сантиметровых волнах позволяют управлять более высокими мощностями, хотя и обладают несколько меньшим быстродействием.

Простейший фазовращатель на прямоугольном волноводе с продольно-намагниченным ферритом (так называемый фазовращатель Реджиа–Спенсера) представляет собой ферритовый стержень 1, расположенный на оси прямоугольного волновода и намагничиваемый в продольном направлении обмоткой 2, расположенной снаружи (рис. 11.9). Волновод с ферритом является запредельным для волны с вектором  $E$ , параллельным широким стенкам, и вследствие этого эффект Фарадея не проявляется. Управляющее магнитное поле изменяет магнитную проницаемость феррита и коэффициент фазы основной волны в волноводе с ферритом. Фазовращатель Реджиа–Спенсера взаимный и может быть создан на любую рабочую частоту в диапазоне 8–70 ГГц. Его достоинством являются простота и возможность регулировки фазы в пределах  $0$ – $360^\circ$  при сравнительно слабых управляющих магнитных полях и вносимом ослаблении мощности СВЧ 0,5–1,0 дБ. Однако фазовращатель пригоден для использования в сравнительно узкой полосе частот при уровнях средней мощности не более 0,5 кВт.

Более распространены ферритовые фазовращатели с поперечным полем подмагничивания. В них используются существующие в волноводах области с вращающимся вектором  $H$  и зависимости магнитных проницаемостей ферритов  $\mu_+$  и  $\mu_-$  от напряженности подмагничивающего поля. Поэтому вместо постоянных магнитов в фазовращателях применяются электромагниты.

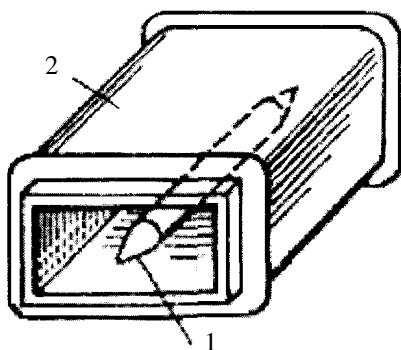


Рис. 11.9. Ферритовый фазовращатель Реджиа–Спенсера

Фазовращатели с поперечным полем подмагничивания невзаимные, так как направление вращения вектора  $H$  в области ферритовых вставок оказывается различным для волн, распространяющихся в противоположных направлениях.

В фазовращателе на прямоугольном волноводе для увеличения фазового сдвига и уменьшения общей длины обычно используют две ферритовые пластины 1, расположенные по обе стороны от средней плоскости волновода, намагничиваемые в про-

тивоположных направлениях (рис. 11.10,а). Возможен коаксиальный вариант фазовращателя, где вращающееся поле  $H$  в ферритовых образцах обеспечивается частичным заполнением диэлектриком 2 поперечного сечения линии передачи (рис. 11.10,б).

Общим недостатком фазовращателей с плавным изменением фазы (аналоговых фазовращателей) является необходимость непрерывной подачи тока в управляющие обмотки. Этот недостаток устранен в дискретных фазовращателях на ферритах с прямоугольной петлей гистерезиса. Такие ферриты, будучи намагниченными, сохраняют это состояние неограниченно долго и требуют затрат энергии на управление лишь при перемагничивании. При реализации управляемых устройств на ферритах с прямоугольной петлей гистерезиса необходимо обеспечивать замыкание управляющего магнитного потока внутри феррита.

Наиболее распространенный волноводный фазовращатель на ферритах с прямоугольной петлей гистерезиса, называемый *тороидальным фазовращателем*, показан на рис. 11.11. Он состоит из нескольких двухпозиционных секций, обеспечивающих бинарный набор фазовых состояний и управляемых переключением направлений максимальной намагниченности феррита. Три секции, обладающие переключаемыми фазовыми сдвигами 180, 90 и 45°, позволяют перекрыть интервал изменения фазы 0–360° с дискретом 45°.

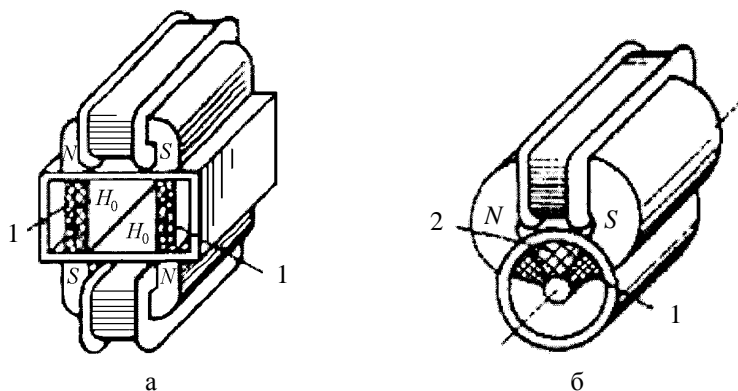


Рис. 11.10. Волноводный (а) и коаксиальный (б) невзаимные ферритовые фазовращатели с поперечным подмагничиванием

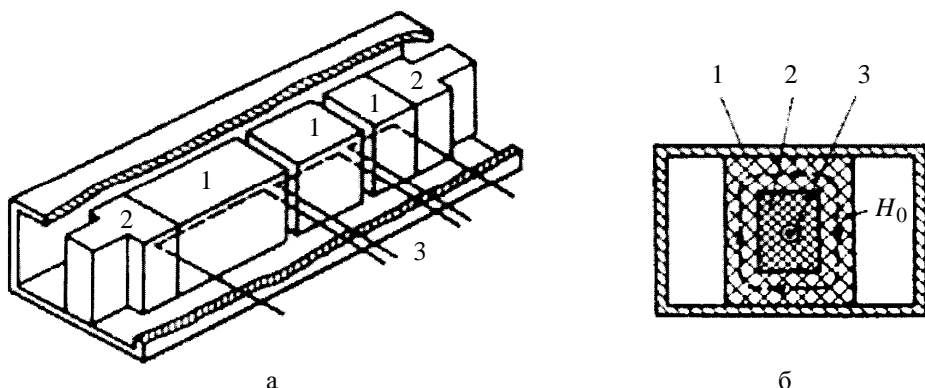


Рис. 11.11. Дискретный тороидальный бинарный фазовращатель с магнитной памятью

Ферритовые вставки 1 имеют форму прямоугольных тороидов, перематываемых пропусканием импульсов тока в противоположных направлениях через проводники 3, пропущенные внутри тороидов. Тороидальный фазовращатель невзаимный, принцип его действия аналогичен принципу действия фазовращателя с поперечно-намагниченными пластинками феррита. На концах тороидального фазовращателя устанавливают согласующие диэлектрические вставки 2. Тороидальные фазовращатели имеют время переключения 0,5–2,0 мкс. В полосе частот  $\pm 5\%$  тороидальные фазовращатели с полным перекрытием фазы  $0-360^\circ$  имеют уровень вносимого ослабления 0,8–1,2 дБ и характеризуются входным КСВ не более 1,2 во всех фазовых состояниях. Допустимый уровень средней мощности колебаний СВЧ может достигать 0,2–0,4 кВт, а энергия, требуемая для перевода фазовращателя из одного состояния в другое, составляет  $3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}$  Дж.

## 11.6. Ферритовые фильтры

Принцип действия перестраиваемых фильтров основан на явлении ферромагнитного резонанса в монокристаллах феррита. Главным элементом перестраиваемого фильтра является связанный с электромагнитным полем линии передачи ферритовый резонатор – подмагниченный образец феррита СВЧ, обладающего малой шириной линии гиромагнитного резонанса. Ферритовые резонаторы выполняют обычно в виде хорошо отполированных сфер из монокристаллов железоиттриевого граната. Резонансная частота ферритового резонатора определяется соотношением  $f_0 = \gamma H_0$ , где  $H_0$  – напряженность поля подмагничивания,  $\gamma \sim 3,5 - 10^{-2}$  МГц / (А/м).

Резонансная частота не зависит от размеров ферритового образца, и резонатор может быть сделан очень малым. Внешняя добротность ферритового резонатора определяется его размерами и местом расположения относительно линии передачи, с которой он связан. На частотах в стороне от резонанса ферритовый резонатор ведет себя как изотропный магнитодиэлектрический образец и из-за малых размеров незначительно влияет на режим линии передачи. Лишь в узкой полосе частот вблизи резонанса связь ферритового резонатора с линией передачи резко увеличивается и появляются компоненты электромагнитного поля, отсутствующие в первоначальной структуре волны линии передачи. Именно это явление и используется для создания перестраиваемых фильтров СВЧ.

На рис. 11.12 показаны три однорезонаторных ферритовых фильтра. Фильтр на индуктивных петлях (рис. 11.12,а) представляет собой ферритовую сферу, помещенную в центре двух перекрещивающихся рамок, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Магнитные поля этих рамок взаимно ортогональны, и передача сигналов между рамками отсутствует. При гиромагнитном резонансе намагниченной ферритовой сферы под воздействием на нее магнитного поля первой рамки  $H_x$  появляется составляющая магнитной индукции  $B_y$ , возбуждающая вторую рамку, и сигнал проходит на выход фильтра.

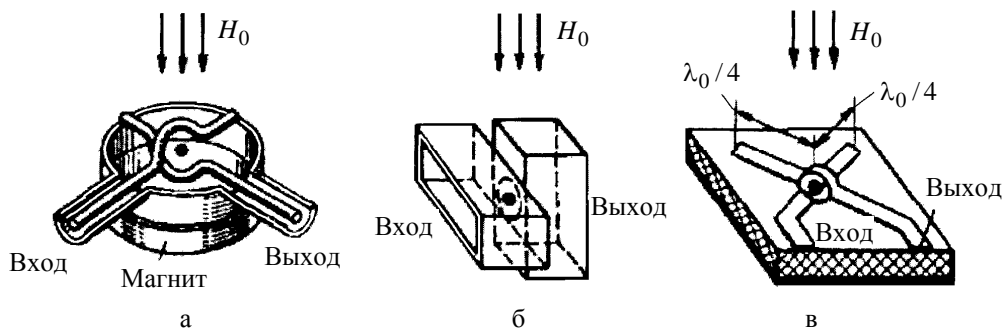


Рис. 11.12. Перестраиваемые фильтры на ферритовых резонаторах

В фильтре на прямоугольных волноводах (рис. 11.12,б) два соосных волновода развернуты один относительно другого на  $90^\circ$  и имеют отверстие в общей торцевой стенке. В центре отверстия располагается подмагничиваемая ферритовая сфера. На частотах в стороне от резонанса волноводы развязаны из-за ортогональности поляризаций их основных волн. При гиромагнитном резонансе между волноводами возникает связь вследствие появления недиагональных компонентов тензора магнитной проницаемости феррита и сигнал СВЧ проходит из одного волновода в другой.

В фильтре на несимметричных полосковых линиях передачи (рис. 11.12,в) две перекрещивающиеся линии при отсутствии гиромагнитного резонанса практически развязаны между собой, поскольку связи через магнитное поле нет, а электрическое поле в месте пересечения линий минимально, так как точка пересечения расположена на расстоянии  $X_B/4$  от разомкнутых концов полосковых линий. В точке пересечения между проводниками полосковых линий помещена ферритовая сфера, намагничиваемая управляющим полем, перпендикулярным плоскости основания полосковой платы. При гиромагнитном резонансе появляется составляющая поля магнитной индукции, продольная возбуждающей линии передачи, что приводит к возникновению сильной связи между полосковыми линиями.

Частотные характеристики коэффициентов передачи рассмотренных фильтров носят ярко выраженный резонансный характер, причем резонансные частоты могут быть изменены в значительных пределах при регулировании поля подмагничивания. Для улучшения формы частотной характеристики в фильтрах может быть использовано несколько близко расположенных ферритовых резонаторов со специально подобранной степенью взаимной связи между ними.

## Список литературы

1. Гальперович Д. Я., Павлов А. А. Радиочастотные кабели. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. ОСТ 4.ГО.206.015. Волноводы прямоугольные латунные. Соединения фланцевые дроссельные.
3. Баскаков С. И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1992.
4. Фельдштейн Ф. Л., Явич Л. Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. М.: Сов. радио, 1967.
5. ОСТ 4. ГО. 206. 210. Волноводы прямоугольные.
6. Малорацкий Л. Г., Явич Л. Р. Проектирование и расчет элементов на полосковых линиях. М.: Сов. радио, 1972.
7. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / Под ред. А. Л. Фельдштейна. М.: Связь, 1979.
8. Зелях Э. В., Фельдштейн А. Л. и др. Миниатюрные устройства УВЧ и ОВЧ диапазонов на отрезках линий. М.: Связь, 1989.
9. Мейнке М, Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. Том 1. М.: Госэнергоиздат, 1971.
10. Милованов О. С., Собенин Н. П. Техника сверхвысоких частот. М.: Атомиздат, 1980.
11. Малорацкий Л. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. М.: Сов. радио, 1976.
12. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988.
13. Сазонов Д. М., Гридин А. Н., Мишустин Б. А. Устройства СВЧ / Под ред. Д. М. Сазонова. М.: Высшая школа, 1981.
14. Конструирование и расчет полосковых устройств / Под ред. И. С. Ковалева. М.: Сов. радио, 1974.
15. Сосунов В. А., Шибаев А. А. Направленные ответвители сверхвысоких частот. Саратов, 1964.
16. Матей Д. Я., Янг Л., Джонс Т. Фильтры СВЧ. Согласующие цепи и цепи связи. Том 1. М.: Связь, 1971.
17. Ханзел Г. Справочник по расчету фильтров. М.: Сов. радио, 1974.
18. Леонченко В. П., Фельдштейн А. Л. Расчет полосковых фильтров на встречных стержнях. Справочник. М.: Связь, 1975.
19. Калашников В. С., Негурей А. В. Расчет и проектирование аттенуаторов СВЧ. М.: Связь, 1980.
20. Дзехер Г. П., Орлов О. С. *P-I-n*-диоды в широкополосных устройствах СВЧ. М.: Сов. радио, 1970.
21. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970.

- 
22. Силин Р. А., Сазонов В. П. Замедляющие системы. М.: Сов. радио, 1966.
  23. Григорьев А. Д., Янкевич В. Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. М.: Радио и связь, 1984.
  24. Хижа Х. С., Вендик И. Б., Серебрякова Е. А. СВЧ – фазовращатели и переключатели. М.: Радио и связь, 1984.



# ***Теория и техника СВЧ***

Учебное пособие

**А. И. Астайкин, К. В. Троцюк, С. П. Ионова, В. Б. Профе**

Редактор *Н. П. Мишкина*  
Корректор *М. В. Кривова*

Компьютерная подготовка оригинала-макета *Н. Ю. Солук*

---

Подписано в печать 29.04.08. Формат 70×108/16  
Усл. печ. л. 40. Уч. изд. л. 29. Тираж 500 экз. Зак. тип. 260-2007

---

Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607188, г. Саров Нижегородской обл.



**Астайкин Анатолий Иванович**  
– главный научный сотрудник РЯЦ-ВНИИЭФ,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Радиофизика  
и электроника» СарФТИ,  
заслуженный деятель науки РФ



**Троцюк Константин Васильевич**  
– начальник группы РЯЦ-ВНИИЭФ,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Радиофизика и электроника» СарФТИ



**Ионова София Павловна**  
– старший научный сотрудник РЯЦ-ВНИИЭФ,  
старший преподаватель  
кафедры «Радиофизика и электроника» СарФТИ



**Профе Виктор Борисович**  
– начальник отдела РЯЦ-ВНИИЭФ,  
кандидат технических наук, профессор,  
заместитель заведующего кафедрой  
«Радиофизика и электроника» СарФТИ