

**В. И. ГАЙДУК,
К. И. ПАЛАТОВ, Д. М. ПЕТРОВ**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОНИКИ
СВЕРХВЫСОКИХ
ЧАСТОТ**



**ИЗДАТЕЛЬСТВО «СОВЕТСКОЕ РАДИО»
МОСКВА — 1971**

ГАЙДУК В. И., ПАЛАТОВ К. И., ПЕТРОВ Д. М. **Физические основы электроники сверхвысоких частот.** М. Изд-во «Советское радио», 1971, 600 стр., т. 11 000 экз., ц. 1 р. 82 к.

Излагаются основные идеи электроники СВЧ и их современное теоретическое и техническое воплощение. Рассматриваются принципы действия электронных приборов СВЧ, области применения и основные тенденции их развития.

С единой точки зрения в рамках линейной самосогласованной и приближенной нелинейной теории проводится достаточно подробный анализ уравнений поля и движения, находятся способы их решения. Анализируются процессы взаимодействия электронов с сверхвысокочастотными полями в лампах бегущей и обратной волны, прямопролетных и отражательных клистродах, в магнетронных усилителях и генераторах, мазерах на циклотронном резонансе, системах с центробежной электростатической фокусировкой, плазменных системах и других приборах. Значительная часть монографии основана на оригинальных работах авторов.

Приводятся формулы, графики и задачи, иллюстрирующие основные зависимости и порядок величин параметров. Кратко описывается конструкция приборов.

Книга предназначена для специалистов, работающих в различных областях физики, электроники и радиотехники, желающих ознакомиться с быстро развивающейся областью техники, а также для студентов, аспирантов, научных работников соответствующих специальностей, желающих углубить свои знания в области физики явлений, происходящих в приборах СВЧ.

11 табл. 248 рис., библи. 123 назв.

Владимир Илларионович Гайдук
Константин Иванович Палатов
Дмитрий Михайлович Петров

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Редактор **Л. В. Голованова**
Художественный редактор **З. Е. Вендрова,**
Художник **В. Е. Карпов**
Технический редактор **А. А. Белоус**
Корректоры **Е. П. Озерцкая, О. П. Трушкова**

Сдано в набор 22/VII 1971 г.
Подписано в печать 11/XI 1971 г. Т-17790
Формат 80×108/32 Бумага типографская № 2
Объем 31,5 усл. п. л., 32,147 уч.-изд. л.
Тираж 11 000 экз. Зак. 287
Издательство «Советское радио», Москва, Главпочтамт, п/я 693,
Цена 1 р. 82 к.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ	
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ЭЛЕКТРОНИКИ СВЧ	
1. Общие сведения о диапазоне и приборах СВЧ	8
1.1. Отличительные особенности диапазона СВЧ	8
1.2. Общая характеристика электронных приборов СВЧ и их основные параметры	21
1.3. Типы взаимодействия в электронных приборах СВЧ	26
2. Принципы действия (механизмы взаимодействия) и кон- структивные особенности приборов СВЧ	28
2.1. Взаимодействие в приборах с электростатическим управлением	28
2.2. Кэлистронный механизм взаимодействия, или взаимо- действие, осуществляемое в узком зазоре резонатора	34
2.3. Длительное взаимодействие с группировкой электро- нов, осуществляемое на основе скоростной модуляции в нерезонансных волноведущих структурах	45
2.4. Электронно-волновое взаимодействие, или взаимодей- ствие, осуществляемое с помощью двух параллельных электронных потоков	54
2.5. Взаимодействие прямолинейного электронного потока с плазмой	55
2.6. Гибридные взаимодействия линейного типа	57
2.7. Взаимодействие при движении электронов перпенди- кулярно силовым линиям однородного магнитного по- ля в скрещенных электрическом и магнитном полях	59
2.8. Взаимодействие в системах с вращающимися потоками, сформированными с помощью центробежной элект- ростатической фокусировки (ЦЭФ)	73
2.9. Параметрическое взаимодействие электронного потока	77
2.10. Мазеры на циклотронном резонансе	80
2.11. Прочие типы взаимодействия в электронных прибо- рах СВЧ	83
2.12. Сводные данные о приборах СВЧ	86
2.13. Тенденции в развитии приборов СВЧ	92
Л и т е р а т у р а , использованная в первой части	95
ЧАСТЬ ВТОРАЯ	
ТЕОРИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ	
3. Уравнение для поля и источники поля	98
3.1. Неоднородное волновое уравнение для электрического поля	99

3.2. Плотность тока и плотность заряда	101
3.3. Упрощенные выражения при малом сигнале для потоков, совпадающих со статическими	105
3.4. Большой сигнал. Разложение плотностей заряда и тока в ряд Фурье	108
3.5. Вычисление гармоник Фурье наведенного тока	113
3.6. Взаимодействие электронного потока с ВЧ полем в монотроне и генераторе с тормозящим полем	116
3.7. Разложение источников поля в интеграл Фурье	119
4. Уравнения движения	121
4.1. Движение в слабом ВЧ поле. Нерелятивистский случай	122
4.2. Движение в слабом ВЧ поле. Слабо ускоренный поток	124
4.3. Движение в слабом ВЧ поле. Общий случай	126
4.4. Релятивистский электронный поток в магнитоэлектронном поле	127
4.5. Энергия $\mathcal{E}(t)$ в неконсервативной системе	129
4.6. Вычисление $\mathcal{E}(t)$ с помощью вариации интегралов движения консервативной системы. Движение по прямой	131
4.7. Вариация интегралов движения. Движение точечной частицы в пространстве	136
4.8. Движение электрона в скрещенных полях. Точные уравнения	142
4.9. Переход к укороченным дифференциальным уравнениям путем усреднения по времени	147
4.10. Пример нелинейной системы. Резонансное длительное взаимодействие колеблющегося заряда с ВЧ полем	152
4.11. Уравнения движения в цилиндрических координатах	156
4.12. Движение электрона в системе центробежной электростатической фокусировки	160
5. Волны в заряженных средах	165
5.1. Исходная система уравнений для волн в бесконечной (полубесконечной) среде	165
5.2. неподвижная плазма	168
5.3. Волны пространственного заряда и циклотронные волны в широком электронном потоке	176
5.4. Понятие о конвективной и абсолютной неустойчивости	183
5.5. Система «широкий электронный поток — неподвижная плазма»	187
6. Возбуждение волноведущих линий электронным потоком	195
6.1. Нормальные волны в волноводах	195
6.2. Теория возбуждения при произвольных источниках	197
6.3. Возбуждение линий передачи электронным потоком	200
6.4. Теория возбуждения при малом сигнале	202
6.5. Идея введения кулоновского поля	205
6.6. Поле синхронной волны при большом сигнале	208
7. Кулоновское поле модулированного электронного потока (квазистатическое приближение)	211
7.1. Ленточный поток	211

7.2. Трубчатый поток	222
7.3. Сплошной цилиндрический поток	226
7.4. Тонкий спиральный поток в системе ЦЭФ	228
8. Теория взаимодействия О-типа	230
8.1. Дисперсионное уравнение ЛБВ	230
8.2. Дисперсионное уравнение ЛБВ. Метод бесконечных сумм	235
8.3. Сопротивление связи ЛБВ	237
8.4. Теория малого сигнала с учетом условий на входе ЛБВ	239
8.5. Линейная теория ЛБВ. Результаты теории	244
8.6. ЛБВ. Уравнения движения в поле возрастающей волны и их приближенное решение	246
8.7. Уточненный расчет распределения ВЧ поля и мощности синхронной волны в ЛБВ	249
8.8. ЛБВ. Оценка влияния кулоновских сил на распределение поля в линии	252
8.9. Дисперсионное уравнение ЛОВ	253
8.10. Оценка величины выходной мощности в ЛОВ	256
9. Теория взаимодействия М-типа	259
9.1. Линейная теория ЛБВМ	259
9.2. Дисперсионное уравнение ЛБВМ при малом пространственном заряде	261
9.3. Дисперсионное уравнение ЛБВМ при учете кулоновского взаимодействия зарядов потока	264
9.4. Вращающийся поток. Взаимодействие М- и Е-типа	268
9.5. Асимптотические уравнения движения для ЛБВМ, ЛОВМ и магнетрона	274
9.6. Траектории электронов в приборах М-типа. Электронный к. п. д.	279
9.7. Уточнение закона изменения мощности в линии	282
10. Теория группирования электронов в приборах клистронного типа	286
10.1. Исходные положения	286
10.2. Взаимодействие электронов с СВЧ полем в зазоре резонатора	289
10.3. Двухрезонаторный пролетный клистрон	299
10.4. Отражательный клистрон	309
10.5. Каскадное группирование электронов в одночастотном режиме	318

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ

11. Лампа с бегущей волной О-типа	353
11.1. Рабочая частота и геометрические размеры	353
11.2. Параметр Пирса С. Зависимость усиления от частоты	354
11.3. Свойства корней дисперсионного уравнения. Зависимость усиления от скорости луча, пространственного заряда и потерь в спирали	356
11.4. Зависимость ВЧ сигнала от длины области взаимодействия. Асимптотическая формула для усиления	361
11.5. Пример расчета усиления	365

11.6. Насыщение мощности и предельный коэффициент полезного действия	369
11.7. Образование и разрушение сгустков	377
11.8. Коэффициент шума ЛБВ	379
12. Лампа обратной волны О-типа	381
12.1. Основные зависимости, даваемые линейной теорией	382
12.2. Нелинейная теория	387
12.3. Оценка рабочих характеристик ЛОВ	390
13. Клистронные генераторы и усилители	392
13.1. Общие замечания	392
13.2. Генератор на отражательном клистроне	393
13.3. Уточненная теория отражательного клистрона	408
13.4. Многорезонаторный пролетный усилительный клистрон	432
13.5. Об оптимальных частотных характеристиках и особенностях расчета широкополосных многорезонаторных клистронов	454
13.6. Сопоставление результатов теории многорезонаторного клистрона с экспериментальными данными	466
13.7. Замечания по многорезонаторным клистронам	468
14. Приборы со скрещенными полями	469
14.1. Усилитель бегущей волны М-типа. Механизм группировки	471
14.2. ЛБВМ. Асимптотическая формула для усиления	477
14.3. Электронный к. п. д. и распределение мощности в ЛБВМ	480
14.4. Усиление в приборе цилиндрической конструкции	481
14.5. Пример расчета усиления и к. п. д. ЛБВМ	484
14.6. Лампа обратной волны типа М. Основные свойства	486
14.7. ЛОВМ. Оценка порядка величин	497
14.8. Магнетронный генератор. Плоская система	500
14.9. Оценка параметров цилиндрического многорезонаторного магнетрона. Пример расчета	507
14.10. Усилитель Е-типа (безмагнитный магнетрон)	511
15. Мазеры на циклотронном резонансе. Некоторые другие схемы взаимодействия	519
15.1. Кулоновское поле и волны пространственного заряда во вращающемся трубчатом потоке, направляемом магнитным полем и помещенном внутри цилиндрического волновода	521
15.2. Взаимодействие неосесимметричного трубчатого винтового потока с незамедленными волнами в цилиндрическом волноводе (с учетом ВЧ кулоновских сил)	538
15.3. Другие схемы с поперечным синхронизмом	556
Заключение	564
Приложение 1	569
П1.1. Волновые уравнения для потенциалов. Связь потенциалов с полем \mathbf{E} , \mathbf{H}	569
Скалярный и векторный потенциалы ϕ и \mathbf{A}	569
Вектор Герца \mathbf{P}	569
Результирующий вектор-потенциал \mathbf{A}_{Σ}	569
П1.2. Решение волновых уравнений. Предельный переход к статическому полю	570
	599

П1.3. Поле точечного заряда в квазистатическом приближении	570
П1.4. Некоторые свойства производных δ -функций	572
П1.5. Плотность заряда и тока при малых возмущениях типа плоских волн и малом размытии границ невозмущенного потока	572
П1.6. Нормальные волны в волноводах	573
П1.7. Соотношения ортогональности для нормальных волн	575
П1.8. Линия с большим замедлением	577
П1.9. Пространственные гармоники. Структура типа «встречные штыри»	581
П1.10. Движение электрона в электростатическом поле цилиндрического конденсатора	586
Приложение 2	588
П2.1. Физические константы	588
П2.2. Некоторые физические параметры	588
П2.3. Функции Бесселя (некоторые соотношения и асимптотические представления)	589
П2.4. Некоторые интегралы	590
Литература ко второй и третьей части	592