А. Д. Григорьев, В. А. Иванов, С. И. Молоковский

Микроволновая электроника

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 5

Введение 7

Основные обозначения 10

ЧАСТЬ 1
Физические основы микроволновой электроники

Глава 1
Основные этапы развития микроволновой электроники 15
1.1. Предыстория 15
1.2. Вакуумная микроволновая электроника 17
1.3. Полупроводниковая микроволновая электроника 19
1.4. Сравнительная характеристика вакуумных и полупроводниковых приборов 21
1.5. Перспективы развития микроволновой электроники 22

Глава 2
Взаимодействие потоков заряженных частиц с переменным электромагнитным полем 23
2.1. Индивидуальное и коллективное излучение заряженных частиц 23
2.2. Макроскопические уравнения микроволновой электроники 28
2.3. Уравнения движения заряженных частиц 30
2.3.1. Движение одиночной частицы в вакууме 30
2.3.2. Движение ансамбля частиц в вакууме 32
2.3.3. Движение ансамбля частиц в твердом теле 33
2.4. Параметры среды и процессы релаксации 35
2.5. Шумы в микроволновых приборах 43
Контрольные вопросы 51

Глава 3
Колебания и волны в потоках заряженных частиц 53
3.1. Колебания пространственного заряда 53
3.2. Волны пространственного заряда в электронных потоках 55
3.3. Волны носителей заряда в полупроводниках 58
Контрольные вопросы 61

Глава 4
Взаимодействие потока заряженных частиц с высокочастотным электромагнитным полем 62
4.1. Мощность взаимодействия 62
4.2. Взаимодействие с квазистатическим полем 66
4.2.1. Наведенный ток. Теорема Шокли — Рамо 66
4.2.2. Ток плоского междуэлектродного промежутка и его внешней цепи 67
4.2.3. Воздействие электрического поля зазора на движение заряженных частиц 71
4.2.4. Обмен энергией между электронами и полем зазора 73
4.3. Взаимодействие потока ЗЧ с полем бегущей волны 76
Контрольные вопросы 77

Глава 5
Микроволновый прибор как элемент схемы 78
5.1. Требования к микроволновым приборам 78
5.2. Классификация микроволновых приборов 79
5.3. Основные функциональные узлы электронных приборов 82
5.4. Параметры и характеристики микроволновых приборов 83
5.4.1. Параметры приборов 83
5.4.2. Характеристики микроволновых приборов 84
Контрольные вопросы 87

ЧАСТЬ 2
Электровакуумные микроволновые приборы

Глава 6
Приборы с квазистатическим управлением 91
6.1. Общая характеристика приборов с квазистатическим управлением и их параметры 91
6.2. Входная проводимость монотрона и диода 93
6.3. Режимы работы электронных ламп 95
6.4. Схемы включения усилительных приборов 97
6.5. Влияние индуктивности катодного ввода 99
6.6. Влияние объемного заряда и тока смещения в пространстве катод — сетка 101
6.7. Движение электронов в пространстве сетка — анод 103
6.8. Современные тетроды средней и большой мощности 103
6.9. Приборы микроволновой вакуумной микроэлектроники 106
Контрольные вопросы 109

Глава 7
Микроволновые приборы типа О 110
7.1. Общая характеристика приборов типа О 110
7.2. Клистроны 111
7.2.1. Устройство и принцип действия двухрезонаторного пролетного клистрона 111
7.2.2. Скоростная модуляция в зазоре взаимодействия 112
7.2.3. Кинематическая теория группирования 113

7.2.4. Учет продольного расталкивания электронов 118
7.2.5. Отбор энергии от сгруппированного электронного потока 120
7.2.6. Многорезонаторные клистроны 124
7.2.7. Использование многозазорных резонаторов 132
7.2.8. Многолучевые и многоствольные усилительные клистроны 134
7.2.9. Клистроны с ленточным лучом 137
7.2.10. Конструкция, параметры и характеристики современных усилительных многорезонаторных клистронов 138
7.2.11. Другие типы клистронов 143
7.3. Лампы с бегущей волной типа О 149
7.3.1. Принцип действия лампы с бегущей волной 149
7.3.2. Линейная теория ЛБВ типа О 151
7.3.3. Элементы нелинейной теории ЛБВ 164
7.3.4. Способы повышения КПД лампы с бегущей волной 170
7.3.5. Конструкция ЛБВ 173
7.3.6. Параметры и области применения ЛБВО 175
7.4. Лампы обратной волны 177
7.4.1. Принцип действия лампы обратной волны 177
7.4.2. Линейная теория ЛОВ. Пусковой ток 179
7.4.3. Электронная настройка ЛОВ 181
7.4.4. Электронный КПД ЛОВ 182
7.4.5. Резонансные ЛОВ 183
7.4.6. Конструкция и параметры ЛОВ 183
7.5. Гибридные приборы типа О 185
7.5.1. Преимущества гибридизации 185
7.5.2. Твистрон 185
7.5.3. Клистрод 186
7.5.4. Оротрон 189
Контрольные вопросы 192

Глава 8
Электронные приборы типа М 194
8.1. Общая характеристика приборов типа М 194
8.2. Взаимодействие электронов с высокочастотным полем в приборах типа М 195
8.2.1. Движение электронов в постоянных скрещенных полях 195
8.2.2. Взаимодействие электронов с медленной волной 198
8.2.3. Линейная теория взаимодействия в приборах типа М 200
8.3. Приборы типа М с незамкнутым электронным потоком 205
8.3.1. Лампа с бегущей волной типа М 205
8.3.2. Лампа с обратной волной типа М 210
8.4. Приборы типа М с замкнутым электронным потоком 211
8.4.1. Многорезонаторный магнетрон 211
8.4.2. Другие типы магнетронов 227
8.4.3. Платинотрон 232
Контрольные вопросы 236

Глава 9
Гирорезонансные приборы 237
9.1. Принцип действия гирорезонансных приборов 237
9.2. Взаимодействие электронного потока с высокочастотным электрическим полем 238

9.2.1. Циклотронный резонанс ... 238
9.2.2. Азимутальная группировка ... 240
9.2.3. Уравнения движения электронов ... 243
9.2.4. Укороченные уравнения движения ... 244
9.2.5. Взаимодействие электронов и переменного поля на гармониках циклотронной частоты ... 245
9.3. Гиротрон ... 246
9.3.1. Устройство и принцип действия ... 246
9.3.2. Электронный КПД ... 248
9.3.3. Общий КПД и выходная мощность ... 250
9.3.4. Стартовый ток гиротрона ... 251
9.3.5. Влияние разброса скоростей электронов на работу гиротрона ... 251
9.3.6. Гиротроны на больших орбитах ... 252
9.3.7. Параметры и применение гиротронов ... 253
9.4. Гироклистроны ... 254
9.4.1. Устройство гироклистрона ... 254
9.4.2. Азимутальная группировка в гироклистроне ... 255
9.4.3. Параметры и применение гироклистронов ... 258
9.5. Гиро-ЛБВ ... 258
9.5.1. Устройство гиро-ЛБВ ... 258
9.5.2. Особенности взаимодействия потока и поля ... 259
9.6. Гиро-ЛОВ ... 261
Контрольные вопросы ... 262

Глава 10
Релятивистские микроволновые приборы ... 263
10.1. Общая характеристика релятивистских приборов ... 263
10.2. Классические релятивистские приборы ... 263
10.2.1. Релятивистские клистроны ... 263
10.2.2. Релятивистские ЛБВ и ЛОВ ... 265
10.2.3. Релятивистский магнетрон ... 267
10.3. Лазеры на свободных электронах ... 269
10.3.1. Принцип действия лазера на свободных электронах ... 269
10.3.2. Убитрон — предшественник ЛСЭ ... 270
10.3.3. ЛСЭ — релятивистский убитрон-автогенератор ... 273
10.3.4. Анализ процессов излучения в ЛСЭ ... 275
10.3.5. ЛСЭ-скеттрон ... 277
10.3.6. Сильноточный ЛСЭ ... 278
10.3.7. Рентгеновский лазер на свободных электронах ... 278
10.4. Виркаторы ... 283
10.4.1. Явление виртуального катода ... 283
10.4.2. Типы и параметры виркаторов ... 284
10.4.3. Низковольтные виркаторы ... 286
10.5. Гироконы и магниконы ... 287
Контрольные вопросы ... 290

ЧАСТЬ 3
Полупроводниковые микроволновые приборы

Глава 11
Основные функциональные элементы микроволновых полупроводниковых приборов ... 295
11.1. Элементы зонной теории твердого тела ... 295
11.2. Полупроводниковые материалы для микроволновой электроники ... 299

11.3. Функциональные элементы МПП 301
11.3.1. Особенности функциональной схемы МПП 301
11.3.2. Однородно легированный полупроводник 302
11.3.3. Свойства контакта металл — полупроводник 303
11.3.4. Свойства p–n-перехода 308
11.3.5. Омический контакт 313
11.4. Классификация микроволновых полупроводниковых приборов 314
Контрольные вопросы 315

Глава 12
Диоды с положительным динамическим сопротивлением 316
12.1. Детекторные диоды 316
12.1.1. Назначение и конструкция детекторного диода 316
12.1.2. Статические и динамические характеристики 319
12.1.3. Динамические параметры 321
12.1.4. Схемотехническое использование 325
12.2. Смесительные диоды 326
12.2.1. Функциональное назначение и принцип использования смесительного диода (СД) 326
12.2.2. Схемотехнические особенности применения смесительного диода 329
12.3. p–i–n-диоды 330
12.3.1. Особенности функционирования, структура и эквивалентная схема p–i–n-диода 330
12.3.2. Особенности схемотехнического использования p–i–n-диодов 335
12.4. Варакторный диод 338
12.4.1. Назначение, конструкции и эквивалентная схема варакторного диода 338
12.4.2. Особенности конструкции и технологии изготовления варакторного диода 338
12.4.3. Схемы использования варакторных диодов 341
12.4.4. Соотношения Мэнли — Роу 344
Контрольные вопросы 346

Глава 13
Диоды с отрицательным динамическим сопротивлением 347
13.1. Общая характеристика диодов с отрицательным динамическим сопротивлением 347
13.2. Анализ динамического сопротивления полупроводникового образца 349
13.3. Способы получения переменного конвекционного тока в диодных структурах 356
13.4. Лавинно-пролетные диоды 359
13.4.1. Структура и принцип действия лавинно-пролетного диода 359
13.4.2. Анализ процессов в зоне лавинного умножения. Эквивалентное сопротивление 361
13.4.3. Малосигнальный импеданс ЛПД 365
13.4.4. Нелинейный режим работы лавинно-пролетного диода 366
13.4.5. Режим работы ЛЦД с захватом плазмы (TRAPATT) 371
13.4.6. Структуры и конструкции лавинно-пролетных диодов 373
13.4.7. Конструкция и параметры генераторов на ЛПД 375
13.5. Инжекционно-пролетный диод 377

13.6. Приборы с междолинным переносом электронов 378
13.6.1. Эффект Ганна. Бегущий домен сильного поля 378
13.6.2. Распределение статического поля в диоде Ганна 382
13.7. Туннельный диод 384
13.7.1. Структура, принцип действия, ВАХ. Отрицательное дифференциальное сопротивление 384
13.7.2. Эквивалентная схема. Особенности использования в микроволновом диапазоне 385
13.7.3. Резонансный туннельный диод (РТД) 386
Контрольные вопросы 389

Глава 14
Микроволновые транзисторы 390
14.1. Полевые транзисторы 390
14.1.1. Структура полевого транзистора с управляющим барьером Шоттки 390
14.1.2. Статические характеристики полевого транзистора с управляющим барьером Шоттки 393
14.1.3. Малосигнальные параметры и эквивалентная схема ПТШ 395
14.1.4. Моделирование полевых транзисторов 403
14.1.5. Особенности математического моделирования полевых транзисторов 409
14.1.6. Квазидвумерная температурная модель ПТШ 410
14.1.7. Шумовые характеристики полевых транзисторов 414
14.1.8. Шумовые параметры транзистора как функция режима 417
14.1.9. Полевой транзистор с модулированным легированием канала 418
14.1.10. Перспективы развития микроволновых полевых транзисторов 421
14.2. Биполярные транзисторы в микроволновом диапазоне 422
14.2.1. Структура и принцип действия 422
14.2.2. Эквивалентная схема и ВЧ параметры БТ 424
14.2.3. Гетероструктурные биполярные транзисторы 427
14.3. Особенности применения транзисторов в микроволновом диапазоне 429
14.3.1. Физические и технологические ограничения в создании микроволновых транзисторов 429
14.3.2. «Генеалогическое древо» транзисторов 430
14.3.3. Сравнение быстродействия транзисторов 432
14.4. Применение транзисторов в гибридных и монолитных ИС микроволнового диапазона 433
Контрольные вопросы 434

Приложения 437

Литература 488