



# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА.....</b>	<b>12</b>
<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	<b>13</b>
<b>СПИСОК АВТОРОВ .....</b>	<b>14</b>
<b>1. ЭЛЕКТРОННЫЕ СВЧ-ЛАМПЫ .....</b>	<b>17</b>
1.1. Введение .....	17
1.1.1. Современный уровень технологий электронных СВЧ-ламп .....	17
1.1.2. История разработки .....	18
1.1.3. Основные принципы работы и определения терминов.....	20
1.2. Клистроны.....	27
1.2.1. Клистронные усилители .....	27
1.2.2. Многолучевые клистроны.....	34
1.2.3. Лампы с индуктивным выходом (ИОТ) .....	37
1.3. Лампы бегущей волны (ЛБВ).....	38
1.3.1. Введение .....	38
1.3.2. Конструкция и принцип работы ЛБВ .....	39
1.3.3. Физические основы работы ЛБВ.....	43
1.3.4. Применение ЛБВ.....	58
1.4. Клистроны с распределенным взаимодействием .....	63
1.4.1. Введение .....	63
1.4.2. Конструкция приборов с распределенным взаимодействием .....	64
1.4.3. Типичное исполнение и приложения ОРВ .....	64
1.5. Лампа обратной волны (ЛОВ) .....	65
1.5.1. Введение .....	65
1.5.2. Принцип действия ЛОВ.....	66
1.5.3. Области применения ЛОВ .....	68
1.6. Магнетроны и усилители со скрещенными полями.....	68
1.6.1. Магнетроны .....	68
1.6.2. Усилители со скрещенными полями (УСП).....	72
1.6.3. Генератор обратной волны со скрещенными полями.....	73
1.7. Устройства на быстрых волнах.....	74
1.7.1. Принципы взаимодействия .....	75
1.7.2. Диаграмма рассеяния при быстроволновых взаимодействиях .....	78
1.7.3. Гиротронный генератор .....	82
1.7.4. Гироусилители .....	86
1.7.5. Гиротронные ЛОВ.....	90
1.7.6. Мазер на свободных электронах (МСЭ) .....	90
1.8. Перспективные тенденции и приложения.....	92
Литература.....	94
<b>2. ВАКУУМНЫЕ ДИСПЛЕИ.....</b>	<b>96</b>
2.1. Введение .....	96
2.1.1. История разработки дисплеев.....	96
2.1.2. Обзор современных дисплеев .....	97

2.1.3.	Основные принципы работы дисплеев .....	99
2.1.4.	Основные параметры дисплеев.....	103
2.1.5.	Сравнение различных технологий производства дисплеев .....	109
2.2.	Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ).....	110
2.2.1.	История разработки .....	110
2.2.2.	Электрофизические основы.....	110
2.2.3.	Современное состояние технологии .....	116
2.2.4.	Будущие направления разработок .....	120
2.3.	Плазменные панели (ПП).....	120
2.3.1.	История развития .....	120
2.3.2.	Электрофизические основы.....	121
2.3.3.	Современное состояние технологий и применения .....	124
2.3.4.	Будущие направления развития.....	126
2.4.	Вакуумные флуоресцентные дисплеи (ВФД).....	126
2.4.1.	История разработки .....	126
2.4.2.	Электрофизические основы.....	127
2.4.3.	Современное состояние технологий и применения .....	128
2.4.4.	Будущие направления развития.....	130
2.5.	Дисплеи с автоэлектронной эмиссией (FED).....	130
2.5.1.	История разработки .....	130
2.5.2.	Электрофизические основы.....	131
2.5.3.	Современное состояние технологий и применения .....	132
2.5.4.	Будущие направления разработок .....	133
	Литература.....	133

### **3. ВАКУУМНЫЕ КОМПОНЕНТЫ И УСТРОЙСТВА, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ К РАДИАЦИИ ..... 135**

3.1.	История разработки .....	135
3.2.	Электрофизические основы .....	136
3.2.1.	Фотоэлектронная эмиссия.....	136
3.2.2.	Вторичная электронная эмиссия .....	138
3.2.3.	Электронная оптика.....	139
3.3.	Современное состояние технологий и применения .....	139
3.3.1.	Умножители вторичных электронов.....	139
3.3.2.	Преобразователи и усилители изображения .....	144
3.3.3.	Передающие телевизионные трубки .....	149
3.4.	Перспективные разработки радиационно-чувствительных вакуумных электронных компонентов.....	157
	Литература.....	158

### **4. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И АНАЛИЗА ..... 159**

4.1.	Введение и история разработки.....	159
4.1.1.	Электронная оптика.....	160
4.1.2.	Источники электронов.....	167
4.2.	Термическая обработка материалов .....	173
4.2.1.	Сварка .....	176
4.2.2.	Термическая обработка поверхности.....	180

4.2.3. Скоростное испарение материалов с использованием электронных пушек .....	183
4.2.4. Электронно-лучевое плавление и очистка материалов в вакуумной металлургии .....	186
4.3. Нетермические технологии обработки материалов.....	190
4.3.1. Химические эффекты, вызванные электронными пучками .....	190
4.3.2. Электронно-лучевая литография.....	193
4.3.3. Электронно-лучевая обработка .....	197
4.3.4. Отверждение органических покрытий и поверхностных слоев .....	200
4.3.5. Рафинирование полимерных материалов .....	202
4.3.6. Борьба с патогенными организмами .....	204
4.3.7. Обработка газообразных и жидких отходов .....	206
4.4. Анализ, визуализация и тестирование материалов.....	208
4.4.1. Растровая электронная микроскопия.....	208
4.4.2. Электронная микроскопия .....	211
4.4.3. Электронно-лучевая спектроскопия и анализ .....	219
4.4.4. Электронно-лучевое тестирование.....	220
Литература.....	224

## **5. ИОННО-ЛУЧЕВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА МАТЕРИАЛОВ ..... 231**

5.1. Ионно-лучевой анализ.....	231
5.2.1. История разработки .....	231
5.1.2. Электрофизические основы.....	231
5.1.3. Методы анализа .....	232
5.2. Ионно-лучевая обработка материалов и восстановление шаблонов и масок ...	236
5.2.1. История разработки .....	236
5.2.2. Электрофизические основы.....	237
5.2.3. Современное состояние технологий и применения .....	238
5.2.4. Перспективные разработки .....	245
5.3. Имплантация ионов .....	246
5.3.1. История разработок.....	246
5.3.2. Электрофизические основы.....	247
5.3.3. Современное состояние технологий и применения .....	247
5.3.4. Перспективные разработки .....	253
5.4. Высокоэнергетические ионные пучки .....	253
5.4.1. История разработки .....	253
5.4.2. Введение .....	253
5.4.3. Физические принципы действия ускорителя .....	254
5.4.4. Транспортировка пучка .....	258
Литература.....	258

## **6. ИОННЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ..... 263**

6.1. Электростатические и индукционные ионные ракетные двигатели малой тяги с СВЧ-ионизацией .....	263
6.1.1. Введение .....	263
6.1.2. История разработки ионных ракетных двигателей (RIT) .....	263
6.1.3. Электрофизические основы.....	264

6.1.4.	Современное состояние технологий и применения ионных ракетных двигателей малой тяги .....	265
6.1.5.	Применения ионных ракетных двигателей .....	266
6.1.6.	Будущие направления развития .....	268
6.2.	Электрический ракетный двигатель с полевой эмиссией (FEEP) .....	269
6.2.1.	История разработки .....	269
6.2.2.	Электрофизические основы .....	270
6.2.3.	Современное состояние технологий и применения .....	271
6.2.4.	Будущие направления развития .....	274
6.3.	Ионные двигатели на эффекте Холла .....	275
6.3.1.	Введение .....	275
6.3.2.	Эксплуатационные характеристики .....	275
6.3.3.	Примеры применений НЕТ для полетов в космос .....	281
6.4.	Высокоэффективные многоступенчатые плазменные двигатели малой тяги .....	283
6.4.1.	Введение .....	283
6.4.2.	Конструкция и принцип действия .....	284
6.4.3.	Конструкция и рабочие характеристики .....	288
6.4.4.	Будущие разработки и потенциальные применения .....	291
	Литература .....	292

## **7. ИНФРАКРАСНЫЕ, СВЕТОВЫЕ, УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ, ЛАЗЕРНЫЕ И РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛАМПЫ ..... 296**

7.1.	Общие физические принципы генерации фотонов .....	296
7.1.1.	История разработки .....	296
7.2.	Лазеры .....	300
7.2.1.	Введение .....	300
7.2.2.	Типичные лазерные устройства .....	301
7.2.3.	Ионные лазеры .....	302
7.2.4.	Эксимерные лазеры .....	303
7.2.5.	Электронно-лучевая накачка мощных КгF-лазеров .....	305
7.3.	Эффект Смита–Парселла .....	307
7.3.1.	История разработки .....	307
7.3.2.	Электрофизические основы .....	307
7.3.3.	Современное состояние технологий .....	307
7.3.4.	Перспективы для терагерцевых источников .....	309
7.4.	Источники миллиметрового и инфракрасного излучения .....	309
7.4.1.	История разработки .....	309
7.4.2.	Генерация ИК-излучения .....	310
7.4.3.	ИК-применения .....	310
7.4.4.	Генерация терагерцевого излучения .....	311
7.4.5.	Применения терагерцевого излучения .....	311
7.4.6.	Перспективы развития .....	313
7.4.7.	Обнаружение терагерцевого излучения .....	313
7.5.	Источники видимого света .....	314
7.5.1.	История разработки и производства .....	314
7.5.2.	Лампы накаливания .....	314
7.5.3.	Газоразрядные лампы .....	315
7.5.4.	Флуоресцентные покрытия .....	317

7.5.5. Газоразрядные лампы высокого давления..... 320  
 7.5.6. Общая информация об источниках света..... 325  
 7.6. Ультрафиолетовые источники света ..... 325  
 7.6.1. Введение ..... 325  
 7.6.2. Тепловые вольфрамовые лампы для калибровки интенсивности..... 326  
 7.6.3. Дейтериевые лампы..... 326  
 7.6.4. УФ дуговые лампы..... 327  
 7.6.5. Ртутные лампы..... 328  
 7.6.6. Лампы с полым катодом..... 328  
 7.6.7. Эксимерные источники света..... 329  
 7.6.8. Эксимерные лампы с разрядным возбуждением тлеющего разряда..... 331  
 7.6.9 Эксимерные лампы с электронно-лучевым возбуждением..... 333  
 7.7. Рентгеновские лампы..... 333  
 7.7.1. История получения рентгеновского излучения..... 333  
 7.7.2. Генерация рентгеновских лучей..... 334  
 7.7.3. Рентгеновские фильтры ..... 335  
 7.7.4. Рентгеновская дозиметрия..... 335  
 7.7.5. Рентгеновские трубки ..... 336  
 7.7.6. Синхротроны ..... 338  
 7.7.7. Обнаружение рентгеновского излучения..... 339  
 7.7.8. Применения..... 339  
 7.7.9. Перспективные разработки – миниатюрные рентгеновские трубки ..... 340  
 Литература..... 340

**8. УСКОРИТЕЛИ ЧАСТИЦ ..... 345**

8.1. История изобретения и типы ускорителей ..... 347  
 8.1.1. Статические ускорители..... 347  
 8.1.2. Круговое резонансное ускорение ..... 348  
 8.1.3. Линейное резонансное ускорение ..... 350  
 8.1.4. Индукционное ускорение (бетатрон) ..... 352  
 8.1.5. Источники частиц ..... 353  
 8.1.6. Коллайдеры ..... 355  
 8.1.7. Источники синхротронного излучения ..... 356  
 8.2. Основы динамики пучка..... 358  
 8.2.1. Эмиттанс пучка и фазовое пространство ..... 359  
 8.2.2. Уравнения движения и сильная фокусировка ..... 360  
 8.2.3. Синхротронное излучение ..... 364  
 8.3. Требования к вакууму ускорителей частиц ..... 367  
 8.3.1. Взаимодействие пучка с газом ..... 367  
 8.3.2. Статические и динамические аспекты вакуумных систем ускорителей ..... 371  
 8.4. Положение дел, оборудование. Конструкция вакуумных систем ускорителей ..... 374  
 8.4.1. Расчеты профиля давления для одномерных систем ..... 375  
 8.4.2. Насосы ..... 377  
 8.4.3. Вакуумное оборудование ..... 381  
 8.4.4. Выбор материала и проекта ..... 381  
 8.4.5. Очистка и обработка вакуумных камер ..... 385  
 8.5. Специальные конструкции вакуумных систем ускорителей..... 385

8.5.1. Ускорители с холодными вакуумными системами .....	385
8.5.2. Объекты с синхротронным излучением .....	388
8.5.3. Системы сверхвысокого вакуума без присутствия частиц .....	389
Литература .....	390

## **9. ВАКУУМНЫЕ ПЕРЕРЫВАТЕЛИ ..... 392**

9.1. Историческое развитие .....	392
9.2. Физические основы.....	393
9.2.1. Прерывающая способность .....	393
9.2.2. Диэлектрические свойства.....	398
9.2.3. Эффекты перехода тока через нуль.....	400
9.2.4. Механические и тепловые основы работы .....	400
9.3. Современное состояние знания и приложений.....	401
9.3.1. Конструкция и технология производства вакуумных прерывателей .....	401
9.3.2. Вакуумные выключатели среднего напряжения.....	404
9.3.3. Контактторы среднего напряжения .....	404
9.3.4. Низковольтные выключатели .....	405
9.3.5. Контактторы низкого напряжения .....	406
9.3.6. Высоковольтные вакуумные выключатели .....	406
9.3.7. Выключатели нагрузки.....	407
9.3.8. Трансформаторные переключатели.....	407
9.3.9. Другие приложения .....	408
9.4. Аспекты будущего .....	408
Литература .....	409

## **10. ВАКУУМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ. МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ..... 411**

10.1. Термоэмиссионные вакуумные источники электронов .....	411
10.1.1. История разработки .....	411
10.1.2. Физические основы термоэмиссии .....	413
10.1.3. Типы термокатодов, их характеристики и приложения .....	416
10.2. Нетепловые источники электронов .....	430
10.2.1. История разработки .....	430
10.2.2. Автоэмиссионные катоды .....	431
10.2.3. Автоэмиссионные термокатоды .....	432
10.2.4. Холодные катоды для автоэлектронной эмиссии .....	434
10.2.5. Новые материалы для катодов .....	436
10.2.6. Тенденции современных разработок .....	436
10.2.7. Материалы эмиттера металл–диэлектрик–металл (МДМ) .....	439
10.2.8. Эмиттеры с алмазными пленками и скачковой проводимостью .....	439
10.2.9. Эмиттеры из углеродных нанотрубок.....	440
10.2.10. Другие углеродные эмиттеры и перспективы развития.....	441
10.3. Другие типы электронных эмиттеров.....	442
10.3.1. <i>pn</i> -эмиттеры.....	442
10.3.2. Вторичная эмиссия .....	445
10.3.3. Сегнетоэлектрическая электронная эмиссия .....	445
10.3.4. Фотоэлектронная эмиссия.....	446
10.4. Вакуумные электронные конструкции .....	448

10.4.1. Разделители для матричных автоэммиттеров.....	448
10.4.2. Анодное склеивание.....	448
10.4.3. Создание вакуума при производстве вакуумных электронных устройств на кристалле.....	450
10.5. Материалы для вакуумных электронных источников.....	451
Литература.....	455

## **11. ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА ..... 459**

11.1. Введение и история разработки.....	459
11.2. Газы в вакуумных системах.....	459
11.2.1. Физические основы вакуума.....	459
11.2.2. Идеальный газ.....	460
11.2.3. Диапазоны давлений в вакуумной технике.....	460
11.2.4. Поверхностные взаимодействия и дегазация.....	462
11.3. Вакуумные насосы.....	463
11.3.1. Введение.....	463
11.3.2. Низко- и средневакуумные насосы.....	464
11.3.3. Диффузионные и пароструйные насосы для высокого и сверхвысокого вакуума (СВВ).....	465
11.3.4. Выбор насоса.....	472
11.4. Измерение давления вакуума.....	472
11.4.1. Введение.....	472
11.4.2. Вакуумметры полного давления.....	472
11.4.3. Вакуумметры парциального давления.....	479
11.5. Вакуумные материалы и компоненты.....	481
11.5.1. Критерии выбора материалов для вакуумной техники.....	481
11.5.2. Стандарты и конструкции элементов вакуумных камер.....	484
11.5.3. Процедуры очистки.....	484
11.6. Течи и их обнаружение.....	486
11.6.1. Введение.....	486
11.6.2. Методы обнаружения течей.....	486
11.6.3. Гелиевые течеискатели.....	486
11.6.4. Испытания на герметичность вакуумной микроэлектроники.....	488
11.7. Примеры вакуумных систем.....	488
11.7.1. СВВ-система для получения характеристик автоэмиссии.....	489
Литература.....	491

## **Предметный указатель ..... 492**



# ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

В современном мире электроника является одной из наиболее динамично развивающихся областей науки и техники. В полной мере это относится и к имеющей более чем столетнюю историю электронике вакуумной. Периодически предпринимаются попытки обобщить накопленные знания и опыт, провести их анализ и на его основе оценить перспективы важнейших направлений развития. В известной мере такая попытка осуществлена и в книге, предлагаемой вашему вниманию, в подготовке которой приняли участие 36 (!) известных специалистов по вакуумной электронике. Несмотря на крайне ограниченный объем, авторам удалось изложить принцип работы, технические возможности и области применения основных электровакуумных приборов и устройств, что позволяет использовать книгу в качестве своеобразного справочника или учебного пособия для студентов высших учебных заведений и специалистов, занимающихся вопросами разработки и применения электронных компонентов в различных системах радиоэлектроники. Книга написана доступным языком, методически сбалансирована, что позволило при редактировании ограничиться минимальным количеством замечаний.

Н. А. Бушуев

# ПРЕДИСЛОВИЕ

В 1989 году в издательстве R. Oldenbourg Verlag (Мюнхен, Вена) вышел «Handbuch der Vakuumelektronik» («Справочник по вакуумной электронике») под редакцией Дж. Айхмайера и Г. Гейниша. За последние 18 лет достигнут значительный прогресс в области вакуумных электронных компонентов, систем и процессов. В настоящей книге группа из 36 известных специалистов в области производства, из научных институтов и университетов представили свои сообщения об основах вакуумной электроники, ее состоянии в настоящее время, а также информацию о последних событиях в этой области и свой собственный опыт во всех важных областях этой науки. Работа вакуумных электронных компонентов и устройств основана на движении электронов или ионов под влиянием электрических, магнитных или электромагнитных полей. В настоящее время исследовательская деятельность сосредоточена на разработке новых СВЧ-устройств, особенно ламп бегущей волны, клистронов, гиротронов и СВЧ-устройств магнетронного типа, разрядников (электронно-лучевых коммутаторов) и вакуумных реле фотоумножителей, преобразователей и усилителей видеоизображения, а также вакуумных и плазменных дисплеев (панелей), систем электронных и ионных пучков, ускорителей частиц, электронных и ионных микроскопов, плазменных и ионных двигательных установок, источников света и газовых лазеров, рентгеновских трубок, газоразрядных систем вакуумных электронных систем для полупроводниковой технологии и наконец методов измерения вакуума.

Вакуумные электронные компоненты, системы и процессы применяются для передачи информации, измерения и контроля различных параметров, а также в высокочастотном, ядерном, плазменном и биомедицинском оборудовании. Эта книга представляет современное состояние исследований, разработки и производства вакуумной электроники. Для понимания читатель должен иметь базовые знания в области электроники, особенно относительно принципов вакуумной электроники. Книга может стать полезным источником необходимой информации для студентов электротехнических и физико-технических специальностей, а также для инженеров и физиков, которые разрабатывают или применяют вакуумные электронные компоненты и устройства в различных технологических областях. Для дополнительной информации предлагаются дополнительные литературные источники. Все главы начинаются с исторической справки и ссылок на уважаемых ученых и инженеров, которым принадлежат прорывы и достижения в различных областях вакуумной электроники.

От имени всех соавторов, редакторов хочу поблагодарить Springer-Verlag, Берлин, Гейдельберг, Нью-Йорк, за тщательное планирование и печать этой книги. Редакция благодарит всех соавторов за их большой вклад.

Дж. Айхмайер, М. К. Тамм  
Мюнхен, Карлсруэ  
Январь 2008

# СПИСОК АВТОРОВ

## **Гельмут Баснер**

Niemöllerallee 8  
81739 Мюнхен, Германия  
[helmut.bassner@T-online.de](mailto:helmut.bassner@T-online.de)

## **Карлхайнц Бланкенбах**

Университет Пфорцхайма  
Лаборатория дисплеев  
Tiefenbronnerstr. 65  
75175 Пфорцхайм, Германия  
[kb@displaylabor.de](mailto:kb@displaylabor.de)

## **Ганс-Йоахим Блум**

Исследовательский центр Карлсруэ  
Institut für Hochleistungsimpulsund  
Mikrowellentechnik  
Postfach 3640  
76021 Карлсруэ, Германия  
[hansjoachim.bluhm@ihm.fzk.de](mailto:hansjoachim.bluhm@ihm.fzk.de)

## **Маттиас Борн**

Philips Technology Research Laboratories,  
Weissshausstr. 2  
52066 Аахен, Германия  
[matthias.born@philips.com](mailto:matthias.born@philips.com)

## **Эрнст Бош**

Thales Electron Devices GmbH  
Söflingerstr. 100  
89077 Ульм, Германия  
[ernst.bosch@thalesgroup.com](mailto:ernst.bosch@thalesgroup.com)

## **Анджей Г. Хмелевский**

Институт ядерной химии и технологии  
16 Dorodna street  
03-185 Варшава, Польша  
[a.chmielewski@ichtj.waw.pl](mailto:a.chmielewski@ichtj.waw.pl)

## **Дитрих фон Добенек**

pro-beam GmbH  
Behringstr. 6  
82152 Planegg bei, Мюнхен, Германия  
[dietrich.dobeneck@про-beam.de](mailto:dietrich.dobeneck@про-beam.de)

## **Джозеф А. Айхмайер**

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Technische Elektronik  
Arcisstr. 21  
80290 Мюнхен, Германия  
[eichmeier@tum.de](mailto:eichmeier@tum.de)

## **Жорж Фэйллон**

Thales Electron Devices  
2, Rue Latécoère  
F-78941 Велизи, Франция  
[georges.faillon@wanadoo.fr](mailto:georges.faillon@wanadoo.fr)

## **Георг Гертнер**

Philips Technology Research Laboratories,  
Weissshausstr. 2  
52066 Аахен, Германия  
[georg.gaertner@philips.com](mailto:georg.gaertner@philips.com)

## **Герхард Гесслер**

Samtel Group, Германия  
Söflingerstr. 100  
89075 Ульм, Германия  
[gerhard.gassler@samtelgroup.de](mailto:gerhard.gassler@samtelgroup.de)

## **Уве Гош**

Институт электронно-лучевых и плазменных технологий Фраунгофера  
Winterbergstr. 28  
01277 Дрезден, Германия  
[uwe.gohs@fep.fraunhofer.de](mailto:uwe.gohs@fep.fraunhofer.de)

## **Юрген Гстотнер**

Atmel Germany GmbH  
Theresienstr. 2  
74072 Хейльбронн, Германия  
[juergen.gstoettner@hno.atmel.com](mailto:juergen.gstoettner@hno.atmel.com)

## **Бумсу Хань**

EB-Tech Co, Ltd  
Yongsan-dong 550, Yuseong-gu  
Daejeon 305-500, Республика Корея  
[bshan@eb-tech.com](mailto:bshan@eb-tech.com)

**Герхард Хоблер**

Technische Universität Wien  
Institut für Festkörperelektronik  
Floragasse 7/362  
A-1040 Вена, Австрия  
[gerhard.hobler@tuwien.ac.at](mailto:gerhard.hobler@tuwien.ac.at)

**Томас Йастель**

Университет прикладных наук Мюнстера  
Stegerwaldstr. 39  
48656 Штайнфурт, Германия  
[tj@fh-muenster.de](mailto:tj@fh-muenster.de)

**Райнер Киллингер**

EADS-Astrium  
Langer Grund  
74239 Мокмул, Германия  
[Rainer.killinger@astrium.eads.net](mailto:Rainer.killinger@astrium.eads.net)

**Вольфрам Кнапп**

Университет Отто фон Герике  
Магдебург  
Институт экспериментальной физики  
Universitätsplatz 2 39106 Магдебург, Германия  
[wolfram.knapp@physik.uni-magdeburg.de](mailto:wolfram.knapp@physik.uni-magdeburg.de)

**Норберт Кох**

Thales Electron Devices GmbH  
Söflingerstr. 100  
89077 Ульм, Германия  
[norbert.koch@thalesgroup.com](mailto:norbert.koch@thalesgroup.com)

**Ганс В. П. Купс**

HaWilKO PSS  
Эрнст Людвиг ул. 16  
64372 Обер-Рамштадт, Германия  
[hans.koops@T-online.de](mailto:hans.koops@T-online.de)

**Гюнтер Корнфельд**

Thales Electron Devices GmbH  
Söflingerstr. 100  
89077 Ульм, Германия  
[guenter.kornfeld@thalesgroup.com](mailto:guenter.kornfeld@thalesgroup.com)

**Геста Матош**

Институт электронно-лучевых и плазменных технологий Фраунгофера  
Winterbergstr. 28  
01277 Дрезден, Германия  
[goesta.mattausch@fep.fraunhofer.de](mailto:goesta.mattausch@fep.fraunhofer.de)

**Йоханнес Миттерер**

Technische Universität Wien  
Institut für Photonik  
Gusshausstr. 27-29  
A-1040 Вена, Австрия  
[joh.mitterauer@nextra.at](mailto:joh.mitterauer@nextra.at)

**Генри Моргнер**

Институт электронно-лучевых и плазменных технологий Фраунгофера  
Winterbergstr. 28  
01277 Дрезден, Германия  
[henry.morgner@fep.fraunhofer.de](mailto:henry.morgner@fep.fraunhofer.de)

**Леопольд Пальметшофер**

Johannes Kepler Universität Linz  
Abteilung für Festkörperphysik  
Altenbergerstr. 69  
4040 Линц, Австрия  
[leopold.palmetshofer@jku.at](mailto:leopold.palmetshofer@jku.at)

**Аксель Рейхман**

Институт электронно-лучевых и плазменных технологий Фраунгофера  
Winterbergstr. 28  
01277 Дрезден, Германия  
[axel.reichmann@fep.fraunhofer.de](mailto:axel.reichmann@fep.fraunhofer.de)

**Роман Ренц**

Siemens AG  
Передача и распределение энергии  
Rohrdamm 88  
13623 Берлин, Германия  
[roman.renz@siemens.com](mailto:roman.renz@siemens.com)

**Олаф Редер**

Институт электронно-лучевых и плазменных технологий Фраунгофера  
Winterbergstr. 28  
01277 Дрезден, Германия  
[olaf.roeder@fep.fraunhofer.de](mailto:olaf.roeder@fep.fraunhofer.de)

**Фридрих Реденауэр**

Австрийские исследовательские центры/FM  
Boltzmannstr. 1  
2444 Зайберсдорфе, Австрия  
[fritz.ruedenauer@aon.at](mailto:fritz.ruedenauer@aon.at)

**Зигфрид. В. Шульц**

(понижен в должности в 2003 г.)  
Surface Solutions, Inc.  
7989 Ranchers Road  
Фридли, MN 55432, США  
[info@tincoat.net](mailto:info@tincoat.net)

**Майк Зейдель**

Институт Пауля Шерпера  
CH-5232 Виллиген, Швейцария  
[mike.seidel@psi.ch](mailto:mike.seidel@psi.ch)

**Манфред К. Тамм**

Universität und Forschungszentrum  
Карлсруэ  
Institut für Hochleistungsimpulsund  
Mikrowellentechnik  
Postfach 3640  
76021 Карлсруэ, Германия  
[manfred.thumm@ihm.fzk.de](mailto:manfred.thumm@ihm.fzk.de)

**Андреас Ульрих**

Technische Universität München  
Fakultät für Physik E 12  
James-Franck-Straße  
85748 Garching bei Мюнхен, Германия  
[andreas.ulrich@ph.tum.de](mailto:andreas.ulrich@ph.tum.de)

**Бернд Венцель**

Von Ardenne Anlagentechnik GmbH  
Plattleite 19/29  
01324 Дрезден, Германия  
[wenzel.bernd-dieter@vonardenne.biz](mailto:wenzel.bernd-dieter@vonardenne.biz)

**Кирстен Запф**

Немецкий электронный синхротрон  
Notkestr. 85  
22607 Гамбург, Германия  
[kirsten.zapfe@desy.de](mailto:kirsten.zapfe@desy.de)

**Олаф Зивитски**

Институт электронно-лучевых и плазмен-  
ных технологий Фраунгофера  
Winterbergstr. 28  
01277 Дрезден, Германия  
[olaf.zywitzki@fep.fraunhofer.de](mailto:olaf.zywitzki@fep.fraunhofer.de)

# I. ЭЛЕКТРОННЫЕ СВЧ-ЛАМПЫ

Г. Фэйллон, Г. Корнфельд, Е. Бош и М. К. Тамм

## I.1. Введение

### I.1.1. Современный уровень технологий электронных СВЧ-ламп

На протяжении более 60 лет электронные СВЧ-лампы используются во многих приложениях в качестве генераторов и мощных усилителей электромагнитных волн в диапазоне частот от 300 МГц до примерно несколько сотен гигагерц, а некоторые даже в диапазоне от 1 до 2 ТГц.

Существует множество типов СВЧ-ламп, которые классифицируются на основе рабочей частоты и мощности. В то же время их можно подразделить на две основные категории: импульсные лампы и лампы непрерывного действия. Рабочие характеристики (зависимости мощности от частоты) наиболее часто используемых СВЧ-ламп приведены на рис. 1.1.

В основном электронные СВЧ-лампы применяются в трех областях:

- радио, телевидение и телекоммуникации;
- радиолокационные станции и военные системы (особенно авиационные);
- промышленная, научная, медицинская аппаратура.

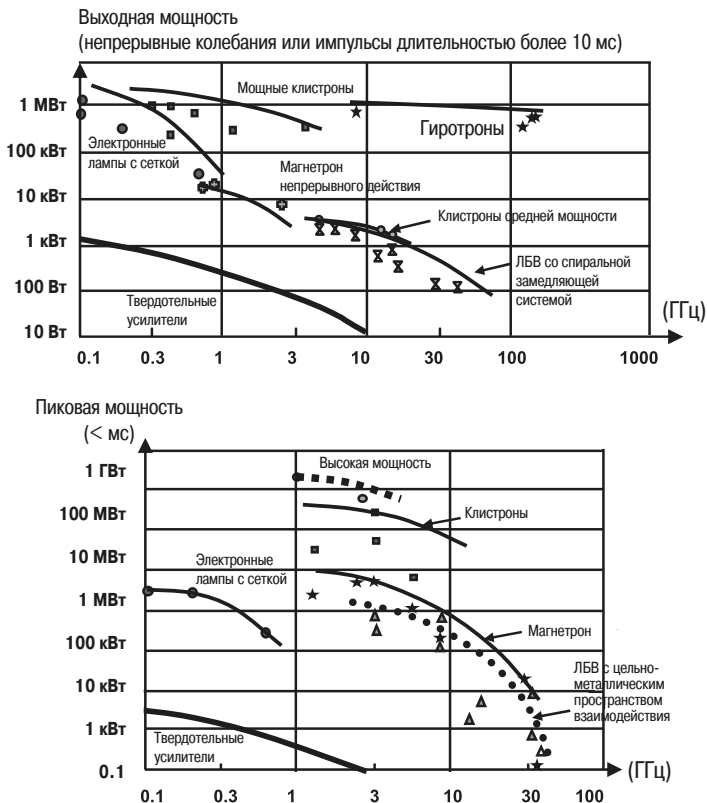


Рис. 1.1. Выходные и импульсные характеристики (зависимости мощности от частоты колебаний) различных СВЧ-ламп

Хотя для характеристики эффективности СВЧ-ламп, как правило, используются такие параметры, как мощность, КПД и усиление, однако необходимо принимать во внимание и другие характеристики, которые будут интересны пользователю с практической и профессиональной точек зрения. К ним относятся: ширина полосы частот, линейность характеристик, отношение сигнал/шум, способ взаимодействия СВЧ-колебаний с электронным пучком, масса лампы и передатчика, надежность и т. д.

### 1.1.2. История разработки

Более ста лет назад, в 1904 году, сэр Дж. А. Флеминг изобрел электронный вакуумный прибор — диод, который сразу же начал использоваться для обнаружения электромагнитных волн, незадолго до этого продемонстрированных Г. Р. Герцем. На самом деле, диод был первой электронной вакуумной лампой, конечно, пусть и с недостаточным уровнем вакуума. Спустя пару лет, в 1906 году, Ли де Форест, вдохновленный этим изобретением, предложил новую конструкцию — добавление в электронную лампу третьего электрода. Так появился триод. Примерно после 10 лет испытаний и дискуссий новая вакуумная лампа была успешно использована в качестве усилителя, что в 1920-х годах привело к быстрому развитию и распространению радиовещания и радиосвязи.

Исследования проводилось не только для улучшения работы триодов, также рассматривались другие вакуумные устройства, работающие в высокочастотном диапазоне. В 1920 году Г. Баркгаузен изобрел лампу с тормозящим полем (или рефлекс-триод), которую можно рассматривать как первую пролетную лампу. Магнетрон был открыт А.В. Халлом в 1921 году, а затем последовали открытия Э. Габанна и А. Жачека. Двенадцать лет спустя был понят принцип работы такого генератора, а в 1939 году А.Г. Бут и Дж.Т. Рэндалл использовали резонатор «клистронного» типа для концентрации ВЧ-полей. Изобретение оксидного катода с высоким коэффициентом вторичной эмиссии было также значительным продвижением вперед. Во время Второй мировой войны сильная необходимость в СВЧ-генераторах высокой мощности для радиолокационных передатчиков привела к развитию магнетронов до современного уровня.

В 1953 году В. К. Браун представил усилитель со скрещенными полями (СФА), магнетрон с разделением ВЧ цепи по входному и выходному сигналу. В то же время по обе стороны Атлантического океана был создан генератор обратной волны (МВВО — ЛОВ), или «карсинотрон», разработанный на основе усилителя со скрещенными полями, но с инжектированным электронным пучком и особой конструкцией замедляющей системы. Этот генератор имел преимущество — он мог настраиваться в пределах широкого диапазона частот.

Тем не менее ни триоды, ни магнетроны не обладали широким диапазоном частот и высоким коэффициентом усиления. В 1934—35 годах, А. и О. Хайли были первыми учеными, которые использовали периодическое и локализованное изменение скорости электронов для получения электронных ступков. После регистрации патентов в 1937 году Хан и Меткаф и особенно братья Р. и Г. Варианы дали точное описание многорезонаторного клистрона. Первый прототип усиливал ВЧ-сигнал до мощности около 50 Вт на частоте 3 ГГц с коэффициентом усиления 30 дБ, вскоре в клистроне было получено усиление от 30 до 50 дБ на частоте от 1 до 10 ГГц для использования, например, в радиолокационных станциях и ускорителях частиц. По принципу действия этого клистрона и на основе предыдущих исследований электронных отражателей без ВЧ-полей был создан «отражательный клистрон», который с большим успехом использовался в качестве собственных генераторов в радарх.

Возможность взаимодействия бегущих волн с электронным пучком была описана в 1942 году Р. Компфнером, который разработал первую лампу бегущей волны (ЛБВ),

а спустя год использовал спираль в пространстве взаимодействия. Но реальное начало разработки ЛБВ возникло после 1946 года, когда Дж.Р. Пирс создал теоретический фундамент работы этих ламп и решил проблему подавления большинства паразитных колебаний. Связанные резонаторы были введены в конструкцию ЛБВ в 1950 году. Эволюция ЛБВ впечатляет, когда мы узнаем, что они по-прежнему используются и сейчас, правда, в современном исполнении.

С этого времени вследствие больших потребностей военной промышленности и выпуска бытовых приборов началось промышленное производство электронных ламп. Конечно, исследования и разработка новых устройств сильно продвинулись вперед не только в деле улучшения действующих ламп и замены их новыми в соответствии с требованиями пользователей (более высокие частоты, более продолжительный срок службы, большие мощности и ширина полосы частот), но также вследствие конкуренции с транзисторами и твердотельными приборами, а в настоящее время — для создания комбинированных устройств.

Последние 40 лет можно охарактеризовать следующими основными инновационными разработками [1]:

- коаксиальный магнетрон, магнетрон с быстрой перестройкой частоты.  
Массовое производство магнетронов в 1960-х годах для производства микроволновых печей;
- ЛБВ с паяными и обжатыми спиралями, в основном использовавшиеся до 1980-х годов в радиолокационных передатчиках и наземных станциях радиосвязи.  
ЛБВ со спиралями с переменным шагом для повышения эффективности взаимодействия.  
Электронные пушки с сетками и внедрение пропитанных катодов в 1970-х годах.  
Затем разработка ЛБВ была сориентирована на внедрение коллекторов с многоступенчатой рекуперацией и коллекторов с охлаждением за счет излучения.  
С 1962 ЛБВ космического назначения используются на спутниках;
- настраиваемые клистроны или клистроны с мгновенной шириной полосы частот (10 %) для телевидения и связи.  
Лампы с индуктивным выходом (ИОТ).  
Многолучевые клистроны средней мощности, которые в основном использовались в СССР с 1960-х по 1980-е годы.  
Пароохлаждаемые коллекторы и 300-киловольтные импульсные электронные пушки.  
Клистроны непрерывного действия с высоким КПД (65 %), высокой импульсной (десятки мегаватт) и непрерывной (1,3 МВт) мощностью.  
Многолучевые клистроны высокой мощности (МЛК), применяемые с 1995 года;
- недавно появившиеся гиротроны, которые представляют собой лампы, способные генерировать большую мощность (порядка нескольких мегаватт) при высоких частотах (100 ГГц).

В 1959 году, не зная о работах астрофизика Р. К. Твисса, Й. Шнайдер в США и А. В. Гапонова в России, предложили объяснение механизма усиления, основанного на гироизлучении свободных электронов. Но первые успешные эксперименты имели место в 1970-х и привлекли внимание в 1980-е годы благодаря поддержке научного сообщества, занимающегося вопросами термоядерного синтеза и получения плазмы, особенно в Европе. И теперь после решения большинства трудных технологических проблем (создание сверхпроводящих электромагнитов, окон из сапфира или алмаза) налажено производство и продолжают новые разработки гиротронов и многомодовых волноводов с малыми потерями или с квазиоптическими линиями передачи.



Структура рынка начала меняться примерно 20 лет назад и требования стали более конкретными, серьезными и жесткими, что помешало массовому производству электронных ламп. Тем не менее после слияния и реорганизации многих производителей электронных ламп сложилась структура их применения, как показано в подразделе 1.1.

В то же время новые исследования и разработки ведутся в направлении повышения эффективности [1] как более высокочастотных устройств, так и ламп большей мощности, а также в направлении передовых технологий: эмиссия с холодных катодов, нанотехнологии, миниатюризация и оптимизация усилителей в целом.

### 1.1.3. Основные принципы работы и определения терминов

#### Основные принципы работы

Электронной СВЧ-лампой называется откачанный (вакуумный) прибор, внутри которого электронный пучок взаимодействует с электромагнитными волнами [2, 3]. Это означает, что электроны пучка отдают часть своей кинетической или потенциальной энергии электромагнитной волне, создавая или усиливая ее. Поскольку в целом известно, как создавать, а затем ускорять электронный пучок или, другими словами, давать ему энергию, особенно благодаря использованию электронных пушек высокого напряжения, цель этой книги заключается в том, чтобы пойти дальше и представить физические процессы взаимодействия и передачи энергии электронного пучка электромагнитной волне. Такой процесс включает в себя несколько отдельных или одновременно происходящих физических явлений.

1. Формирование и ускорение электронного пучка.
2. Периодическая группировка электронов с частотой  $f$ . Эта группировка начинается под действием входной ВЧ-мощности, которой является мощность возбуждения колебаний  $P_d$  в случае усилителя или мощность электромагнитного шума в случае генератора.
3. Замедление пучков (или сокращение их релятивистской массы) таким образом, что их кинетическая или потенциальная энергия превращается в электромагнитную или СВЧ-энергию с частотой  $f$ .
4. Передача этой микроволновой энергии за пределы лампы — превращение ее в выходную мощность лампы  $P_{\text{OUT}}$ .

#### Характеристики и определения

Для обеспечения работы СВЧ-лампы [4] прежде всего необходимо нагреть катод, излучающий электроны, путем подключения нити накаливания к источнику электроэнергии  $P_F = V_F I_F$ . Затем на катод и анод подается питание ( $P_0 = V_0 I_0$ ) в целях получения электронного пучка с необходимой энергией, который будет двигаться со скоростью  $v_0$ , проводя ток силой  $I_0$ , что задается двумя нерелятивистскими выражениями (релятивистские выражения будут даны ниже):

$$mv_0^2/2 = eV_0, \quad (1.1)$$

$$I_0 = PV_0^{3/2}, \quad (1.2)$$

где  $P$  — коэффициент, относящийся к конструкции пушки и именуемый первеансом.

Для фокусировки пучка используется магнитное поле [5]. Это поле создается либо постоянным магнитом (магнитами), либо электромагнитом с потребляемой мощно-

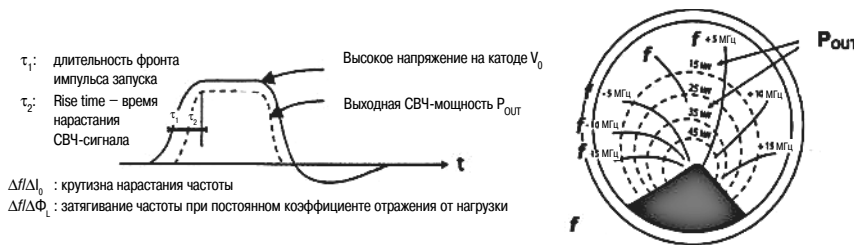


Рис. 1.2. Генераторы

стью  $P_{FOC}$ . В случае генератора входной СВЧ-сигнал отсутствует и лампа непосредственно преобразует энергию пучка в СВЧ-энергию с частотой  $f$ . Пусть  $P_{OUT}$  является выходной мощностью лампы. Тогда общий КПД лампы составляет  $\eta = P_{OUT}/(P_F + V_0 I_0 + P_{FOC})$ , а КПД взаимодействия –  $\eta_{вз} = P_{OUT}/V_0 I_0$ .

Колебания начинаются не сразу после приложения напряжения  $V_0$ , а спустя время задержки  $\tau_1$ , которое может иметь различную продолжительность, как показано на рис. 1.2. Затем в течение времени нарастания  $\tau_2$  выходная мощность увеличивается до номинального уровня  $P_{OUT}$ . В течение этого времени  $\tau_2$  частота  $f$  изменяется, а затем стабилизируется.

Мощность  $P_{OUT}$  зависит от силы анодного тока  $I_0$  и сопротивления нагрузки  $Z_L$ , как показано на диаграмме Рика (рис. 1.2). Пусковое  $\Delta f/\Delta I_0$  и затягивающее  $\Delta f/\Delta \phi_L$  отношения, измеренные при постоянном коэффициенте отражения от нагрузки (или коэффициенте стоячей волны (КСВ)), характеризуют чувствительности частоты лампового генератора, где  $\phi_L$  является фазой сопротивления нагрузки  $Z_L$ . Иногда имеет смысл ограничивать или контролировать частоту колебаний  $f$  с помощью управляющего сигнала мощностью  $P_c < P_{OUT}$  при частоте  $f_c$  (близкой к  $f$ ), который подается на выход лампы. Для данной мощности  $P_c$  отношение Адлера дает полный диапазон частот, в пределах которых возможно это ограничение:  $\Delta f_{max} = 2f_c / Q_x \sqrt{P_c / P_{OUT}}$ .

В случае усилителя ВЧ-сигнал мощностью  $P_d$  и частотой  $f$  подается на вход лампы и затем усиливается до мощности  $P_{OUT}$ . Общий КПД усилителя определяется практически тем же способом, что и для генератора:  $\eta = P_{OUT}/(P_F + V_0 I_0 + P_{FOC} + P_d)$ , а КПД взаимодействия опять же составляет  $\eta_{вз} = P_{OUT}/V_0 I_0$ . Соотношение  $G = P_{OUT}/P_d$  является величиной усиления, которое часто выражается в децибелах (дБ) как  $G = 10 \log_{10}(P_{OUT}/P_d)$ . Обычно передаточная характеристика  $P_{OUT}/P_d$  (рис. 1.3) показывает почти линейную зависимость при низких уровнях сигнала и участок насыщения при больших сигналах.

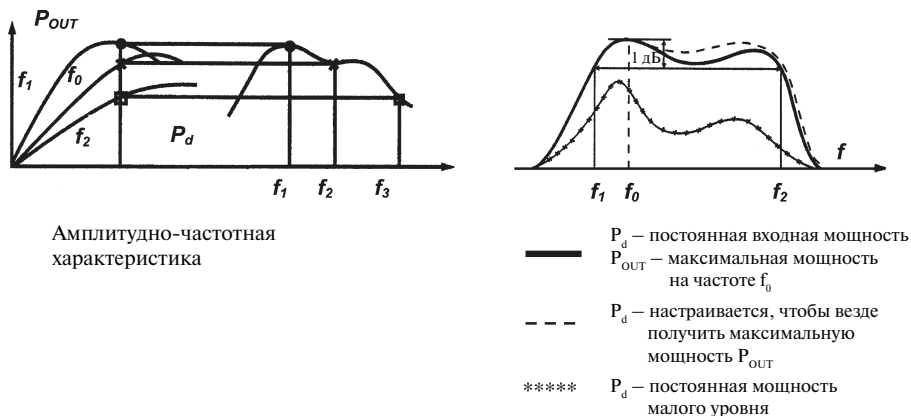


Рис. 1.3. Усилители

лах. Ширина диапазона, как правило, измеряемая на уровне -1 дБ, определяется на основе изменения выходной мощности  $P_{\text{OUT}}$  в зависимости от частоты с коррекцией  $P_d$  на каждой частоте, чтобы максимально увеличить  $P_{\text{OUT}}$ . Ширина диапазона может быть определена при постоянной  $P_d$ , например, с поправкой на величину данной максимальной  $P_{\text{OUT}}$  (см. рис. 1.3).

Групповая задержка  $\tau_g = d\phi/d\omega$  представляет собой задержку сигнала внутри лампового усилителя  $\phi(f)$ , которая является сдвигом фаз между входом и выходом. Влияние сопротивления нагрузки  $Z_L$  представлено на диаграмме Рика, где построены кривые зависимости  $P_{\text{OUT}}(Z_L)$ .

### Основные физические законы движения электронных пучков

#### Уравнение движения электронов и релятивистские поправки

На электроны в СВЧ-лампах при их взаимодействии с высокочастотными волнами влияют только определенные силы, которыми нельзя пренебречь. Эти силы называются электромагнитными силами Лоренца. Все другие силы, например обусловленные спином или гравитацией соответственно, на 11 или 16 порядков ниже.

Из релятивистского уравнения движения одного электрона

$$d(m_e v_e)/dt = -e(E + v_e B), \quad (1.3)$$

$$m_e = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v_e/c)^2}}, \quad (1.4)$$

$$v_e = c \sqrt{1 - 1/(1 + (V/V_n))^2}, \quad (1.5)$$

где заряд  $e = 1,60 \times 10^{-19}$  Кл,  $v_e$  – релятивистская скорость электронов,  $m_e$  – релятивистская масса электрона;  $m_0 = 9,11 \times 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона,  $c$  – скорость света,  $V$  – ускоряющее напряжение;  $V_n = m_0 c^2/e = 511$  кВ – ускоряющее напряжение для получения эквивалента массы покоя одного электрона с учетом релятивистского увеличения массы.

Можно сделать вывод, что кинетическая энергия электрона (или другой заряженной частицы) может быть изменена только электрическим, а не магнитным полем  $\mathbf{B}$ , так как вектор магнитной силы Лоренца  $\mathbf{F}_L = -e(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$  перпендикулярен скорости  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$ , и потому, что скалярное произведение двух ортогональных векторов всегда равно нулю. Таким образом, передача энергии от пучка электронов ВЧ-волне и в обратном направлении происходит всегда только за счет электрических компонентов поля ВЧ-волны и объемного заряда пучков.

$$dE_{\text{кин}} = \mathbf{F} ds = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \mathbf{v} dt = -eE v dt, \quad (1.6)$$

где  $ds$  является элементом линейного пути вдоль траектории.

Это не означает, что магнитное поле  $\mathbf{B}$  не так важно. Наоборот, магнитное поле необходимо для поддержания свойств сфокусированных пучков (см. подраздел 1.3).

#### Уравнения Максвелла

Поскольку расчет движения большого числа электронов в пучке находится далеко за пределами вычислительной мощности современных компьютеров, во многих случаях движение частиц можно описать с помощью теоретических уравнений Максвелла.

Здесь напряженности полей  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  самосогласованно определяются собственными плотностями заряда и тока  $\rho$  и  $\mathbf{j}$ , для определения которых требуется решение множества дифференциальных уравнений в соответствии с граничными и начальными условиями для полей  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ . Уравнения Максвелла не способны описать локализованные процессы столкновения или даже прохождения частиц, которые происходят в электронных лампах в состоянии, близком к насыщению. Тем не менее они позволяют сделать полезные выводы и выдвинуть общие соображения симметрии, а также создать основу для различных видов компьютерного моделирования.

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \rho / \varepsilon_0 \quad \text{плотность заряда источника электрических полей } \mathbf{E}; \quad (1.7)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\delta \mathbf{B} / \delta t \quad \text{закон индукции}; \quad (1.8)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad \text{магнитное поле является источником свободных немагнитных единичных полюсов}; \quad (1.9)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = -\mu_0 \mathbf{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \delta \mathbf{E} / \delta t; \operatorname{rot} \mathbf{B} = -\mu_0 \mathbf{j} \text{ для стационарных пучков.} \quad (1.10)$$

Из стационарных уравнений Максвелла можно заключить, что электрические и магнитные поля  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  могут быть получены из *скалярного потенциала*  $\phi$  и *векторного потенциала*  $\mathbf{A}$  в виде

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \phi, \quad (1.11)$$

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}. \quad (1.12)$$

Вводя эти выражения в уравнения Максвелла (1.7) и (1.10), получим уравнения для тех потенциалов, которые определены в пространстве плотностью заряда  $\rho$  и плотностью тока пучка  $\mathbf{j}$  соответственно:

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \phi = -\rho / \varepsilon_0 \quad \text{уравнение Пуассона (уравнение Лапласа для } \rho = 0); \quad (1.13)$$

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{j}. \quad (1.14)$$

Поскольку влиянием плотности тока  $\mathbf{j}$  на магнитное поле можно в большинстве случаев полностью пренебречь по сравнению с внешними магнитными полями, четвертое уравнение Максвелла (1.10) сводится для стационарного случая к следующему выражению:

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = 0 \quad \text{при незначительном текущем воздействии на магнитное поле } \mathbf{B}; \quad (1.15)$$

$$\mathbf{B} = -\mu_0 \operatorname{grad} \Omega \quad \text{если магнитное поле } \mathbf{B} \text{ определяется скалярным потенциалом } \Omega; \quad (1.16)$$

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \Omega = 0 \quad \text{магнитный эквивалент уравнения Лапласа для электрического поля.} \quad (1.17)$$

В этом случае, как и для скалярного электрического потенциала  $\phi$ , можно определить магнитный скалярный потенциал  $\Omega$ , тогда выражение (1.17) станет магнитным эквивалентом уравнения Лапласа (1.13) для электрического поля.

Теорема Буша

Как прямое следствие уравнений Максвелла в аксиально-симметричной (цилиндрической) системе координат, теорема Буша очень важна для анализа магнитной фокусировки линейных электронных пучков (рис. 1.4). Она констатирует закон сохранения, действующий вдоль траектории электрона: сумма момента  $m_e v \theta r$  углового движения электрона относительно оси  $z$  и магнитного потока  $\Phi$ , параллельного оси симметрии, проходящей через круговую область траектории с радиусом  $r$ , и умноженного на коэффициент  $e/2\pi$ , является величиной постоянной.

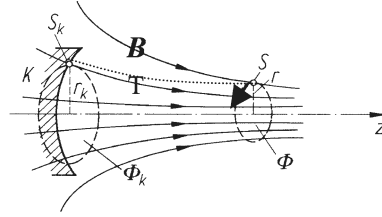


Рис. 1.4. Теорема Буша в цилиндрической симметричной системе координат

$$m_e v \theta r + e/2\pi \cdot \Phi = \text{const} \quad \begin{array}{l} \text{теорема Буша действительна} \\ \text{вдоль траекторий заряженных частиц} \\ \text{в цилиндрических симметричных} \end{array} \quad (1.18)$$

$$m_e \theta' r^2 + e/2\pi \cdot \Phi = \text{const} \quad \text{системах координат (рис. 1.4).}$$

Поскольку при катодной эмиссии угловая скорость равна нулю в соответствии с теоремой Буша (1.18), угловая скорость  $v \theta$ , или  $\theta'$  в S, просто определяется двумя значениями потока  $\Phi_k$ ,  $\Phi$  и радиусом  $r$  (при  $\theta'$ , равной угловой скорости вокруг оси  $z$ ). Есть много других приложений теоремы Буша. Некоторые из них будут приведены в главе, посвященной фокусировке электронного пучка.

Законы масштабирования

Геометрическое подобие (масштабирование) СВЧ-ламп часто используется, когда по отработанной конструкции лампы, работающей на частоте  $f_1$ , нужно создать лампу новой конструкции, работающую на частоте  $f_2$ . Поскольку размеры лампы масштабируют при длине ВЧ-волны  $\lambda$  или обратно пропорционально частоте  $f$ , то коэффициент масштабирования  $\gamma$  для всех линейных размеров составляет

$$\gamma = \lambda_2 / \lambda_1 = f_1 / f_2 \quad \text{масштабирование по частоте.} \quad (1.19)$$

Теперь возникает вопрос, как масштабировать электромагнитные свойства лампы, чтобы получить идентичные траектории электронного пучка в масштабе системы координат  $x_2$ .

Ответ можно получить с помощью уравнений Максвелла. Легко показать с помощью подстановки, что уравнения Максвелла остаются инвариантными при масштабировании в новой системе координат  $x_2$  при применении следующих законов масштабирования:

$$x_2 = \gamma x_1 \quad \begin{array}{l} \text{линейное геометрическое масштабирование всех} \\ \text{размеров в системе } x_1 \text{ с коэффициентом } \gamma \\ \text{для новой системы координат } x_2; \end{array} \quad (1.20)$$

$$E_2 = \gamma^{-1} E_1 \quad \text{для электрического поля,} \quad (1.21)$$

$$\mathbf{B}_2 = \gamma^{-1} \mathbf{B}_1 \quad \text{для магнитного поля;} \quad (1.22)$$

$$\phi_2 = \gamma^0 \phi_1 \quad \text{для электрического потенциала;} \quad (1.23)$$

$$\mathbf{A}_2 = \gamma^0 \mathbf{A}_1 \quad \text{для векторного потенциала;} \quad (1.24)$$

$$\mathbf{j}_2 = \gamma^{-2} \mathbf{j}_1 \quad \text{для плотности тока} \quad (1.25)$$

$$I_2 = \gamma^0 I_1 \quad \text{для общего тока (электронной пушки);} \quad (1.26)$$

$$P_2 = \gamma^0 P_1 \quad \text{для первеанса } P = IV^{3/2}. \quad (1.27)$$

С учетом указанных выше законов масштабирования понятно, почему можно примерно масштабировать допустимую мощность  $P_{\text{OUT}}$  СВЧ-лампы данной конструкции на частоте  $f$  или что  $P_{\text{OUT}} \cdot f^2 = \text{const}$ .

Допустим, лампа масштабируется с коэффициентом  $\gamma = 1/2$  для удвоения частоты  $f_2 = 2f_1$ . Если все потенциалы электродов остаются постоянными, то будут постоянными общий ток и потребляемая мощность. Но так как плотность тока масштабируется с коэффициентом  $\gamma^{-2}$ , мы получаем в 4 раза большую тепловую нагрузку в критически важных областях. Поэтому, чтобы сохранить значение тепловой нагрузки на материал в тех же самых пределах, при удвоенной частоте нужно использовать для допустимой мощности коэффициент масштабирования только  $1/4$ . Ссылки по теме масштабирования даны в [6].

#### *Формирование пучка в электронной пушке*

Вначале рассмотрим эмиссию электронов с поверхности катода. В настоящее время в основном используются диспенсерные катоды пропитанного типа на основе Ва-, Са-алюминатов. Так как они подробно описаны в главе 10, мы ограничимся здесь только напоминанием законов эмиссии для этого типа термоэлектронных излучателей, которые имеют работу выхода  $\phi$  и температуру катода  $T$ .

#### *Электронная эмиссия нагретого катода (термоэлектронная эмиссия)*

В режиме термоэлектронной эмиссии с ограничением рабочих температур (все испускаемые электроны покидают поверхность катода) плотность тока  $j_s$  насыщения эмиссии задается уравнением Ричардсона–Дешмана (1911 г.; Нобелевская премия, 1928 г.):

$$j_s = A(1-r)T^2 e^{-\phi/kT}, \quad (1.28)$$

где  $A = 4\pi e m_0 k^2 / h^3 = 120 \text{ A}/(\text{см}^2\text{K}^2)$ ,  $k$  – постоянная Больцмана,  $r$  – квантово-механический коэффициент отражения, на границе металл/вакуум равен нулю.

Более совершенная формула Шоттки включает электрическое поле  $E$  на поверхности и называется уравнением Ричардсона–Дешмана–Шоттки:

$$j_s = A T^2 e^{-\phi/kT} e^{Ka^* E^{1/2}}$$

$$\text{при} \quad Ka = (e^3/4\pi\epsilon_0)^{1/2}/kT. \quad (1.29)$$

#### *Эмиссия, ограниченная пространственным зарядом*

В связи с ограничением, накладываемым пространственным зарядом, максимальный ток эмиссии катода  $j_s$  не может быть получен в СВЧ-лампах с линейными пучками. Только катоды гиротронов могут работать в режиме температурного ограничения. Электронные заряды, инжектируемые в определенном объеме, который соответствует

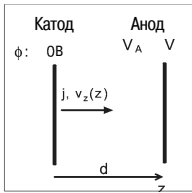


Рис. 1.5. Планарный диод

граничным условиям для электростатического потенциала  $\phi$ , изменяют распределение потенциала внутри этого объема. Как следствие, данный объем будет пронизан только для тока определенной величины, поскольку пространственный заряд ограничивает ток эмиссии. Следующие выражения описывают эмиссию планарного диода (рис. 1.5), ограниченную пространственным зарядом:

$$j_0 = [(2,335 \cdot 10^{-6}) V_a^{3/2} ]/d_2 \quad \text{закон Чайлда–Ленгмюра} \quad (1.30)$$

для диода с плотностью тока, ограниченного пространственным зарядом;

$$\begin{aligned} I_0 &= (2,335 \cdot 10^{-6}) V_a^{3/2} (F/d^2) && \text{закон Чайлда–Ленгмюра для полного тока;} \\ P &= 2,335 \cdot 10^{-6} (F/d^2) && P - \text{переванс диода, } F - \text{площадь диода.} \end{aligned} \quad (1.31)$$

Нужно отметить, что ток, ограниченный пространственным зарядом, не зависит ни от температуры катода, ни от природы эмиссии катода (работы выхода  $\phi$ ), но только от приложенного напряжения и геометрии пушки. Здесь  $d$  – размер диода,  $F$  – площадь диода (см. рис. 1.6 и 1.7). Результат (1.30) можно обобщить в следующем виде:

$$I_0 = P V_a^{3/2} - \text{закон Чайлда–Ленгмюра для полного тока.} \quad (1.32)$$

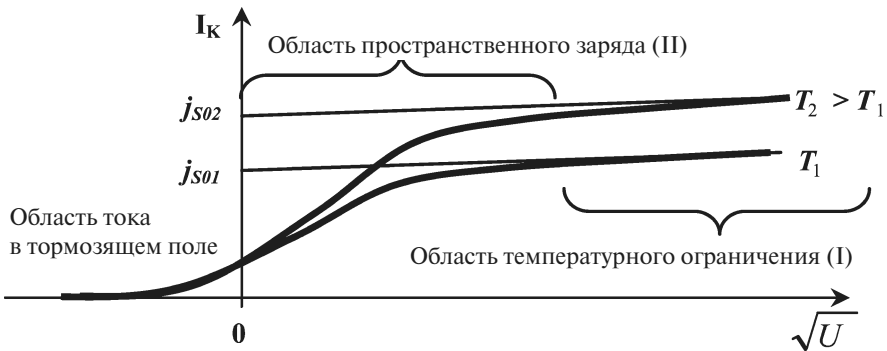


Рис. 1.6. График зависимости катодной эмиссии от приложенного анодного напряжения. При достаточно высоких напряжениях сила тока ограничивается током насыщения согласно уравнению Ричардсона–Дашмана–Шоттки

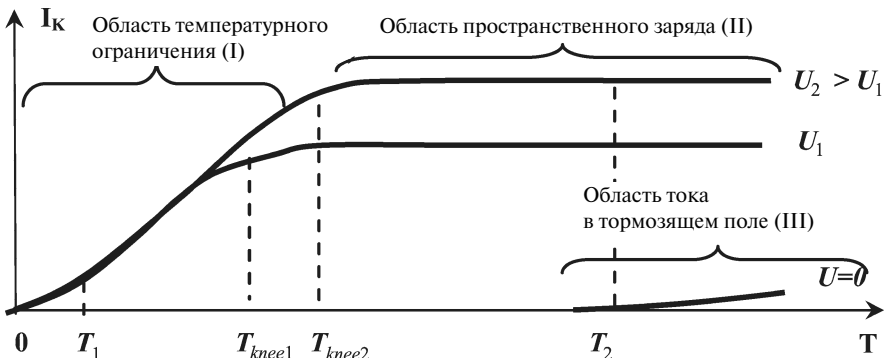


Рис. 1.7. График зависимости катодной эмиссии от температуры. При низких температурах катодная эмиссия ограничена температурой. При так называемых переломных температурах эмиссия ограничивает пространственный заряд, и она перестает зависеть от температуры

Напомним, что в результате действия законов масштабирования (1.27) перванс  $P$  остается постоянным в случае линейного масштабирования всех размеров.

## 1.2. Клистроны

### 1.2.1. Клистронные усилители

#### Введение

Клистроны являются электронными ламповыми усилителями, предназначенными в основном для использования на высоких частотах от 0,3 ГГц до примерно 30 ГГц. Они характеризуются высоким усилением (около 50 дБ) и высокой выходной мощностью:

- 3 кВт при настройке частоты непрерывных колебаний от 14 до 14,5 ГГц с КПД  $\eta = 40\%$ ,
- 60 МВт при импульсах длительностью 4 мкс и частоте 3 ГГц ( $\eta = 38\%$ ),
- 1,3 МВт на частоте непрерывных колебаний 352 МГц с КПД до 65%,
- 500 кВт на частоте непрерывных колебаний 3,7 ГГц с КПД  $\eta = 45\%$ .

Однако почти у всех клистронов мгновенная полоса частот довольно ограничена. В клистроне (рис. 1.8) основные функции разделены, поэтому их конструкцию и технологические параметры можно оптимизировать для каждой отдельной функции. Этими функциями являются эмиссия электронов, магнитная фокусировка пучка,

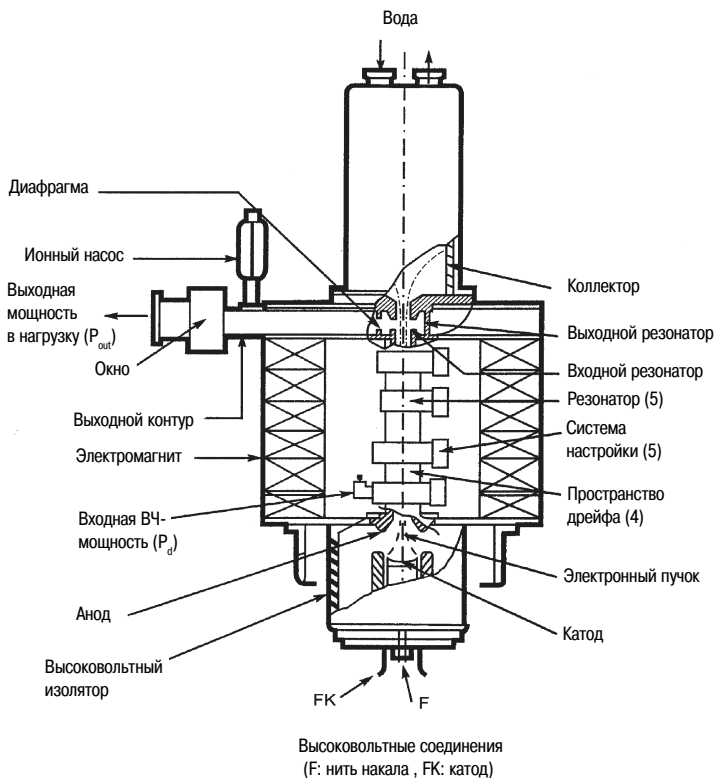


Рис. 1.8. Поперечное сечение клистрона



группировка электронов или модуляция плотностью пучка, получение ВЧ-энергии и, наконец, рассеяние остаточной энергии пучка.

### Взаимодействие в клистроне: модуляции и отбор энергии

Благодаря более высоким напряжениям  $V_0$  на катод по сравнению с анодом, электронная пушка Пирса формирует электронный пучок, который переносит ток силой  $I_0 = PV_0^{3/2}$  согласно выражению (1.2). Магнитное поле  $B_z(z)$  поддерживает форму пучка, приближенную к цилиндрической по всей длине лампы. После выхода из анода электроны проходят через первый, или входной объемный резонатор. Этот резонатор возбуждает слабый входной сигнал мощностью  $P_d$ , который подвергается усилению. Частота  $f$  этого сигнала примерно равна  $f_0$  – резонансной частоте резонатора. Входной резонатор предназначен для создания резонанса на его основной моде  $TM_{110}$  (прямоугольной) или  $TM_{010}$  (круговой) с максимальной напряженностью электрического поля  $E_1$  в центре лампы, где пролетают электроны [7]. Кроме того, это электрическое поле

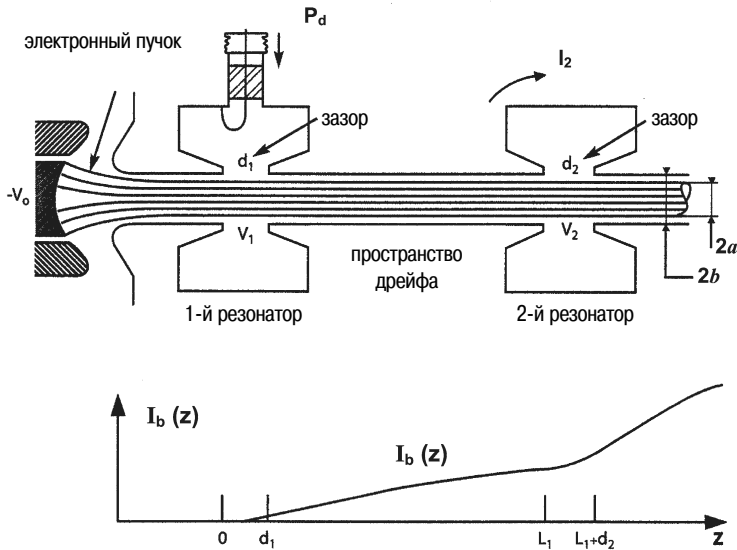


Рис. 1.9. Модуляция пучка вдоль клистрона

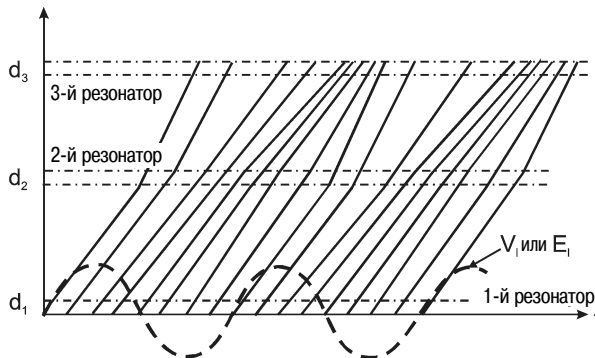


Рис. 1.10. Диаграмма Аплгейта  $z(t)$

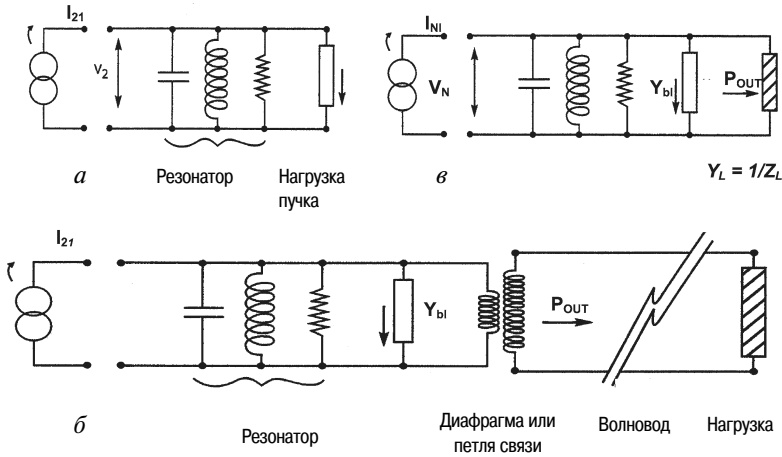


Рис. 1.11. Эквивалентная схема резонатора клистрона

усиливают резонаторы, расположенные по обе стороны пространства дрейфа, входные зазоры которых открываются в полость этого пространства (рис. 1.9).

Электроны, движущиеся через узкий зазор из полости резонатора, находятся под действием периодического электрического поля  $E_1 e^{i\omega t}$ . Половину периода они ускоряются, а вторую половину замедляются (рис. 1.10). Следовательно, быстро движущиеся электроны данного полупериода догоняют медленно движущиеся электроны предыдущего полупериода, в результате формируются электронные сгустки. Другими словами, модуляция скорости электронов во входном резонаторе создает модуляцию тока пучка в пространстве (трубе) дрейфа, который выражается как  $I_{\text{сгустка}}(z, t)$  [8, 9].

Во втором резонаторе на расстоянии  $L_1$  формируются сгустки электронов. Ток пучка  $I_{\text{пучка}}(z, t)$  индуцирует ток  $I_2$  в этом резонаторе, который вызывает напряжение  $V_2 = Z_2 I_2$  (или электрическое поле  $E_2$ ) на разных концах зазора при сопротивлении резонатора  $Z_2$ . В свою очередь напряжение  $V_2$  (или электрическое поле  $E_2$ ) создает новую модуляцию по скорости электронов, которая, как правило, намного превышает предыдущую модуляцию. Опять же третий резонатор устанавливают на расстоянии  $L_2$  и т. д.

Процесс повторяется в каждом пространстве дрейфа и в каждом резонаторе вдоль клистрона, пока в последнем, или выходном, резонаторе пучок не станет очень узким и плотным. В последнем, выходном резонаторе существует очень высокий индукционный (наведенный) ток  $I_N$ , который создает высокое напряжение резонатора  $V_N = Z_N I_N$ . Затем электронные сгустки сильно тормозятся этим напряжением  $V_N$  (или  $E_N$ ), так что они сами становятся генераторами энергии. Таким образом, в выходном резонаторе они отдают большую часть своей кинетической энергии электромагнитному полю, которое усиливается и поддерживает  $V_N$  (или  $E_N$ ). Эта энергия, запасенная в резонаторе, дает выходную мощность  $P_{\text{OUT}} = V_N^2 / 2Z_L$ , которая направляется в нагрузку через диафрагму или петлю связи и окно связи (рис. 1.8 и 1.11). Выходная мощность  $P_{\text{OUT}}$  является результатом усиления клистроном мощности  $P_d$ . Как правило, клистроны имеют от четырех до шести резонаторов, коэффициент усиления ( $P_{\text{OUT}}/P_d$ ) — примерно 50 дБ, КПД взаимодействия ( $P_{\text{OUT}}/V_0 I_0$ ) — от 35 % до 65 %.

### Взаимодействия между первым и вторым резонаторами

С учетом нескольких упрощений соотношение между  $V_1$  и  $P_d$  задается выражением

$$V_1^2 = 8 \left( \frac{R}{Q} \right) Q(Q/Q_x) P_d \left[ 1 + Q^2 \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (1.33)$$

где  $f_0$  – резонансная частота резонатора,  $f$  – рабочая частота [8, 9, 11].

Решая уравнение для электрона, попадающего в зазор резонатора со скоростью  $v_0$  (1.1), получаем скорость  $v(d_1)$  на выходе из зазора

$$v(d_1) = v_0 \left( 1 + \frac{M_1 V_1}{V_0} e^{j\omega t} \right), \quad (1.34),$$

где  $t$  – момент времени, когда электроны проходят центр зазора, и

$$M_1 = \sin \left( \frac{\omega d_1}{2v_0} \right) / \left( \frac{\omega d_1}{2v_0} \right),$$

$M_1$  – коэффициент связи.

Электроны покидают резонатор и проходят в следующее пространство (трубу) дрейфа на скорости, заданной уравнением (1.34).

Из-за периодичности модуляции (рис. 1.10) с течением времени электроны меняют свое положение (одни собираются, другие рассеиваются) и формируются сгустки, по одному за период. Модуляция скорости, вызванная прохождением электронов через первый резонатор, приводит к пространственной модуляции плотности электронов, т. е. модуляции тока в трубе дрейфа. Этот ток вдоль оси  $z$  задается выражением

$$I_b(z, t) = I_0 + 2 I_0 \sum_1^\infty J_n(nX) \cos n(\omega t - \omega z/v_0), \quad (1.35)$$

где  $X = M_1(V_1/2V_0)(\omega z/v_0)$ ,  $J_n$  – функции Бесселя,  $I_0$  – постоянный ток или средний ток пучка, формулу для  $M_1$  см. выше.

Уравнение (1.35) позволяет рассчитать гармоники. Максимум первой гармоники ( $n = 1$ ) составляет  $1,16 I_0$  и находится на расстоянии  $z = L_1$  от центра зазора первого резонатора, так что  $X = 1,84$ . Максимум второй гармоники ( $n = 2$ ) составляет  $0,96 I_0$ , и он находится на расстоянии  $z = L_2$ , так что  $X = 1,54$  [8, 9]. Второй резонатор, как правило, расположен на расстоянии примерно  $z = L_1$ , где происходит формирование электронных сгустков.

В отличие от входа в первый резонатор скорость электрона  $v(L_1, t)$  из (1.34) и ток  $I(L_1, t)$  из (1.35) у входа во второй резонатор изменяются и модулируются с течением времени. Ток пучка  $I_{\text{пучка}} I(z, t)$  проходит через зазор (шириной  $d_2$ ) второго резонатора.  $I_{\text{пучка}}(z, t)$  – мгновенный ток вдоль оси  $z$  в момент времени  $t$ .

Каждый электрон индуцирует положительный заряд на стенках трубы дрейфа и особенно резонатора. Таким образом, в момент  $t$  ток  $I_2(t)$ , индуцированный внутри резонатора, представляет собой сумму всех зарядов, индуцированных электронами в зазоре в момент времени  $t$ . Это может быть выражено математически, поскольку  $I_2(t)$  является интегралом  $I_{\text{пучка}}(z, t)$  на интервале от  $L_1$  до  $L_1 + d_2$ .

После расчетов выражение для  $I_2(t)$  состоит из трех основных слагаемых:

- $I_0$  – средний ток, который не взаимодействует с резонатором;

- $$I_{21} = M_2 I_{\text{пучка}} e^{j\omega t}, \quad (1.36)$$

где  $M_2 I_{\text{пучка}} e^{j\omega t}$  – первая гармоника тока пучка  $I_{\text{пучка}}(z, t)$  при  $L_1 + d_2/2$  и коэффициенте связи  $M_2$ , который определяется по формуле (1.38) (см. ниже);

$$\bullet \quad I_{22} = jG_0(V_2/D_2)[\exp(-jD_2/2)][\cos(D_2/2) - \sin(D_2/2)/(D_2/2)], \quad (1.37)$$

где  $G_0 = I_0/V_0$  и  $D_2 = \omega d_2/V_0$ . Выражение для напряжения  $V_2$ , индуцированного во втором резонаторе (между концами зазора, находящимися на расстоянии  $d_2$ ), будет дано далее в подразделе 1.2.1.

### Движение электронов во втором резонаторе

Коэффициенты связи, например  $M_2$ , всегда меньше 1. Это отражает тот факт, что поле  $E_2 = -V_2 e^{j\omega t}/d_2$ , воздействующее на электрон, является функцией времени и изменяется, когда электрон проходит через зазор резонатора. В приведенных выше расчетах рассматривался идеальный зазор в виде воображаемой сетки [9]. Если теперь мы рассмотрим реальный зазор с электрическим полем, которое простирается в соседние пространства дрейфа, расположенные слева и справа, и изменяется в осевом и радиальном направлениях, то общее выражение для  $M_2$  будет иметь вид:

$$M_2 = \frac{1}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_2(z, 0) r dr dz} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_2(z, 0) e^{j\omega z/v} r dr dz, \quad (1.38)$$

где  $\int_{-\infty}^{\infty} E_2(z, 0) r dr dz = V_2$ .

Чем меньше ширина зазора  $d$  и радиусы  $a$  или  $b$ , тем ближе  $M_2$  к 1. Только когда  $D_2 \geq 1,2$  рад и  $\omega b/v_0 \geq 1$  рад, можно в значительной степени снизить величину  $M_2$ . Эти факторы определяют ширину зазора  $d_2$ , диаметр трубы дрейфа  $2b$  и диаметр пучка электронов  $2a$ , учитывая, что коэффициент заполнения  $a/b \approx 0,6$  и что  $b$  и  $d_2$  также связаны с величиной отношения  $R/Q$  резонатора.

Соотношение  $I_{22}/V_2$  является проводимостью нагрузки пучка  $Y_{\text{нагр.пучка}} = G_{\text{нагр.пучка}} + jB_{\text{нагр.пучка}}$ . Положительное значение  $G_{\text{нагр.пучка}}$  показывает, что модулированный электронный пучок отдает энергию, тогда как отрицательное значение свидетельствует, что энергия отдается электронному пучку. Величина  $G_{\text{нагр.пучка}}$  достигает максимума при  $D_2 = \pi$  и становится отрицательной после  $D_2 = 2\pi$ . Таким образом, если резонатор имеет зазор  $D_2 = (\omega d_2/v_0) > 2\pi$ , значение  $G_{\text{нагр.пучка}}$  будет отрицательным,  $G_{\text{нагр.пучка}} + G_c$  также может быть отрицательным, и могут наблюдаться колебания (так называемые «монотронные» колебания).  $G_c$  – это проводимость, характеризующая потери в резонаторе,  $\omega = 2\pi f$  связана не только с основной рабочей модой резонатора, но и с любым из многочисленных резонансов при высоких частотах.

Приведенные выше выражения определяют эквивалентную схему второго резонатора и подходят для любого из промежуточных резонаторов. Эта эквивалентная схема представляет собой колебательный контур, показанный на рис. 1.11, который возбуждается наведенным током  $I_{21}$ , его нагрузкой являются «потери» проводимости  $G_c$  и проводимость нагрузки пучка  $Y_{\text{нагр.пучка}}$ .

### Пространственный (объемный) заряд

До сих пор мы пренебрегали пространственным зарядом, т. е. отталкивающей силой между электронами, которая, естественно, стремится разделить их, препятствуя тем

самым группировке. Если мы нарушим электронный пучок в состоянии равновесия путем перемещения одного электрона относительно других, то этот электрон будет отталкиваться своими соседями, а затем возвращаться в положение равновесия, из которого снова будет вылетать, прежде чем перейдет обратно в равновесное положение, как качающийся маятник. Это движение имеет место в пределах пучка, движущегося со скоростью  $v_0$ . Частота таких колебаний (известная как плазменная частота  $f_{\text{плазм}} = \omega_{\text{плазм}}/2\pi$ ) задается согласно выражению  $\omega_{\text{плазм}}^2 = (e/m)(\rho_0/\epsilon_0)$ , где  $\rho_0 = J_0/v_0$  – плотность заряда пучка,  $J_0 \approx I_0/\pi a^2$  – плотность тока [10]. Тем не менее это выражение несколько неточно, поскольку при определении истинной плазменной частоты  $f_q$  нужно принимать во внимание параметры металлической или проводящей стенки трубы дрейфа.

С учетом объемного заряда изменяется второй член  $v(d, t)$  в выражении (1.34), который должен быть умножен на  $\cos(\omega_q z/v_0)$ . Кроме того, выражение (1.35) также приобретает другой вид при введении объемного заряда.  $X$  становится равным

$$X = M_1 (V_1/2V_0) \frac{\omega}{\omega_q} \cos\left(\frac{\omega_q z}{v_0}\right).$$

При  $\omega_q \Rightarrow 0$  это выражение принимает исходный вид.

### Переход электронов из второго резонатора в выходной резонатор

Ток  $I_2$  создает напряжение  $V_2 = Z_2(f)$ . Ток  $I_2$  проходит через зазор второго резонатора. Напряжение в свою очередь модулирует скорость электронов, причем эта модуляция необязательно происходит в фазе с предыдущими модуляциями, но значительно больше по величине. В трубе дрейфа между вторым и третьим резонаторами новые модуляции скорости преобразуются в свою очередь в модуляции плотности или модуляции тока (рис.1.10). Этот итерационный процесс продолжается до тех пор, пока каждый добавленный резонатор не будет оказывать влияния на модуляции [9].

Последний резонатор является выходным и характеризуется высокой степенью связи с внешней нагрузкой, то есть устройством пользователя, к которому подключена лампа. С практической точки зрения для этого соединения используются петли связи или диафрагмы (см. рис.1.8). Эквивалентная схема, представленная выше, относится ко всем резонаторам, в том числе и к последнему выходному, который подключен к нагрузке (рис.1.11, б и рис. 1.11, в). Если теперь предположить, что выражение для нагрузки пучка не имеет мнимой части ( $Y_{\text{нагр.пучка}} = 1/Z_{\text{нагр.пучка}} = G_{\text{нагр.пучка}}$ ), как и выражение для нагрузки ( $Y_L = 1/Z_L = G_L = 1/(R/Q)Q_L$ ), мы получаем

$$Y_N = (1 + 2 Q_N \Delta) / (R/Q) Q_N, \quad (1.39)$$

где  $\Delta \approx (\omega - \omega_0)/\omega_0 = (f - f_0)/f_0$  и  $1/Q_N = 1/Q_c + 1/Q_{\text{нагр.пучка}} + 1/Q_L$ .

Тогда

$$V = I_N/Y_N. \quad (1.40)$$

Таким образом, выходную мощность  $P_{\text{OUT}}$  можно записать в виде

$$P_{\text{OUT}} = 1/2 V_N^2 G_L = 1/2 I_N^2 G_L Q_N^2 (R/Q)^2 / (1 + 4 Q_N^2 \Delta^2). \quad (1.41)$$

Это выражение может быть использовано для получения усиления  $G = P_{\text{OUT}}/P_d$  и КПД взаимодействия  $\eta = P_{\text{OUT}}/V_0 I_0$ .

Методология, которую мы использовали в подразделе 1.2.1, показывает, как величину  $P_{\text{OUT}}$  можно вывести из  $P_d$  посредством формул (1.33)–(1.41). Однако важно иметь в виду, что эти выражения имеют место только для «слабых» полей или сигналов. Как

только  $P_d$  возрастает по абсолютной величине (т.е. увеличиваются модуляции), мы уже имеем дело не с линейной задачей и уравнением для  $P_{\text{OUT}}$ , как задано в (1.41), ситуация становится все более сложной и плохо поддается анализу. Нелинейности в основном появляются за счет сил группировки электронов и объемного заряда.

Для подобных случаев необходимы более полные и сложные расчеты, для которых обязательно потребуются расчетные мощности компьютера. Компьютер позволяет проанализировать значительно больше информации, чем просто нелинейные явления, а также учитывать радиальные движения (которыми мы пренебрегали в предыдущих расчетах), трехмерный характер определенных явлений, релятивистские эффекты и движение отраженных электронов. Образно говоря, такие возможности предполагают решение уравнения движения электрона для изменяющихся электромагнитных полей и полей пространственного заряда.

### Оптимизация выходной мощности

В настоящее время в основном применяются клитроны с четырьмя, пятью и шестью резонаторами. Эти резонаторы постепенно увеличивают силу СВЧ-тока пучка  $I_{\text{пучка}}$ , затем величины  $I_N$  и  $P_{\text{OUT}}$ , несмотря на силы объемного заряда, которые становятся все более действенными по мере увеличения  $I_{\text{пучка}}$ . В то же время для оптимизации  $P_{\text{OUT}}$  дисперсия скоростей должна быть низкой:  $(v - v_0)/v_0 \leq (10 - 20 \%)$ , чтобы избежать отражения электронов от выходного резонатора. Таким образом, частоты промежуточных резонаторов должны быть тщательно настроены, чтобы привести в соответствие напряжения на зазоре по амплитуде и фазе и в то же время для контроля СВЧ-тока пучка и дисперсии скоростей.

В некоторых клитронах используют резонатор, настроенный на вторую гармонику, который резонирует на частоте, немного меньшей, чем  $2f_0$ . Такой резонатор возбуждает вторую гармонику тока пучка и генерирует напряжение, которое усиливает группировку и повышает КПД. Этот резонатор обычно размещается после второго резонатора, где электроны уже сосредоточены в интервале фаз, меньшем или равном  $\pi$ .

В зависимости от значения импеданса  $Z_L$  абсолютная величина  $V_N = Z_N I_N$  может превышать  $V_0$ , которое представляет собой напряжение, соответствующее средней скорости электронов. Если  $V_N$  превышает  $V_0$ , электроны будут тормозиться, а некоторые даже отражаться обратно в направлении резонаторов и катода, который будет создавать перехват пучка, что может привести к нарушению работы клитрона или даже необратимым повреждениям.

При прохождении сильных сигналов выходной резонатор действует как генератор тока с внутренним сопротивлением  $R^*$  вблизи рабочей точки. Таким образом,  $P_{\text{OUT}}$  становится максимальной, когда  $Z_L = R^*$ . Поскольку диафрагма или петля связи преобразуют сопротивление нагрузки устройства пользователя (радиолокационная антенна или антенна передатчика, ускорители) в сопротивление нагрузки резонатора, эти устройства связи должны быть настроены так, чтобы  $Z_L = R^*$  для максимизации выходной мощности.

### Конструирование и технологии создания клитронов

Представление различных этапов взаимодействия электронов в клитроне позволяет нам понять его устройство, которое строится вокруг пучка электронов с одной стороны и резонаторов и пространств (трубок) дрейфа — с другой. С технологической точки зрения, как показано на рис. 1.8, составляющими элементами клитрона являются:

- электронная пушка Пирса с высоковольтным изолятором и катодом. Высоковольтный изолятор представляет собой цилиндр из алюминия, расположенный между анодом и катодом. Его размеры таковы, что напряженность постоянного электрического поля меньше предельного напряжения пробоя. Эмиссия электронов с тройной точки сведена к минимуму благодаря экрану, который называется кольцом-антикоронной. Анод заземлен по соображениям безопасности, поэтому на пушке и катоде, как правило, отрицательное напряжение;
- модулирующие резонаторы (обычно частота настраивается на заводе-изготовителе);
- последний, или выходной, резонатор связан с выходным волноводом петлей связи или диафрагмой;
- выходное окно (окна) расположено в волноводе (волноводах) и отделяет внешнюю атмосферу от внутреннего вакуума ( $\approx 10^{-8}$  тор) внутри лампы. Для усиления возбуждаемой мощности, как правило, ее вводят в первый резонатор через коаксиальное соединение, которое также герметично благодаря небольшому размеру окна ввода;
- коллектор, функция которого состоит в сборе электронов после их взаимодействия в последнем резонаторе и рассеяния их оставшейся энергии. Кроме того, он должен быть в состоянии рассеять всю энергию пучка электронов, когда  $P_d = 0$ , а затем  $P_{\text{OUT}} = 0$ . Следовательно, необходимо его эффективное охлаждение. Коллектор, как правило, имеет тот же потенциал, что и корпус или анод;
- магнитный контур, включая электромагнит, или постоянный магнит (магниты), и два полюсных наконечника, расположенных вблизи анода и между коллектором и выходным резонатором. Эти полюсные наконечники концентрируют магнитный поток, чтобы получить необходимое фокусирующее поле  $B_z$ , параллельное оси (значение  $B_R/B_z$  должно быть больше нескольких %).

Вакуум, как правило, поддерживается благодаря небольшому ионно-getterному насосу. Однако этот насос не всегда необходим, поскольку сам пучок выполняет откачивающие функции. Ускоренные электроны ионизируют остаточные газы. Тогда рожденные ионы электрически притягиваются к пучку и медленно перемещаются к катоду.

### 1.2.2. Многолучевые клистроны

#### Ограничения в увеличении выходной мощности $P_{\text{OUT}}$ в клистроне

Как было отмечено в подразделе 1.2.1, силы пространственного заряда препятствуют идеальной группировке электронов. Эти силы отталкивания проявляются в виде плазменной частоты  $\omega_q$  или  $\omega_{\text{плазм}}$ , которая пропорциональна квадратному корню из первеанса  $P$ .

В обычном клистроне первеанс пучка находится в интервале от 0,5 до  $2,5 \times 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{В}^{-3/2}$ . Значение первеанса  $P = 2,5 \times 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{В}^{-3/2}$  является практическим пределом, превысив который трудно сохранять цилиндрическую форму электронных пучков и фокусировать их без заметного токооседания. Когда первеанс высок, КПД низок. В то же время мгновенная полоса частот расширяется примерно до 5 % или более, вместо обычных 1–2 %. Этот факт объясняется высоким значением проводимости нагрузки пучка  $G_{\text{нагр.пучка}}$ , пропорциональной  $PV_0^{1/2}$ , которая затухает во всех резонаторах.

Напротив, первеанс  $P = 0,5 \times 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{В}^{-3/2}$  является практическим нижним пределом, меньше которого малая сила тока  $I_0$  диктует неприемлемо высокое напряжение пучка  $V_0$  и вызывает множество трудностей с изоляцией клистроны, а также все-

го передатчика или оборудования. Но низкий первеанс благоприятен для высокого КПД взаимодействия, поскольку можно добиться хорошей группировки электронов. В заключение следует сказать, что наибольшая выходная мощность может быть получена путем увеличения либо тока пучка  $I_0$ , либо напряжения  $V_0$ . В первом случае первеанс важен; однако КПД значительно снижается, а мгновенная ширина полосы частот увеличивается, и возникают трудности с управлением и фокусировкой пучка. Во втором случае первеанс сохраняется низким, КПД – высоким, но основные ограничения возникают из-за поломок и практического использования высокого напряжения.

### Многолучевые клистроны

Многолучевые клистроны (МЛК) позволяют достичь значительной выходной мощности с большим КПД и в то же время с приемлемо высоким напряжением пучка, несмотря на очень высокий первеанс. В обычных или однолучевых клистронах (ОЛК) используется только один пучок электронов, который перемещается вдоль общей оси лампы и магнита. В МЛК, наоборот, используется несколько ( $N$ ) электронных пучков, которые вместе проходят все резонаторы, но каждый – по своей трубе дрейфа (рис. 1.12).

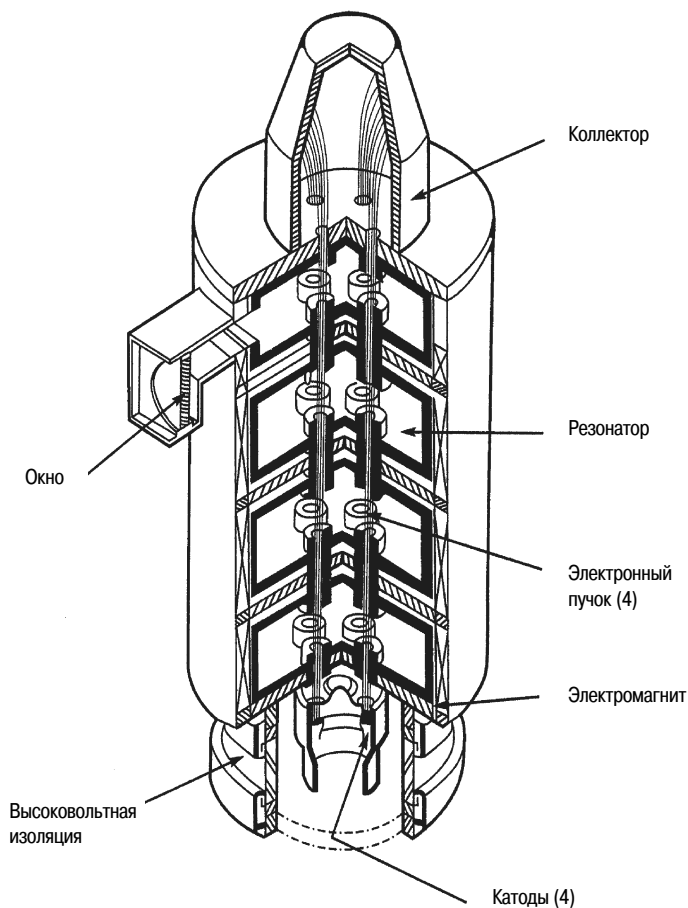


Рис. 1.12. Многолучевые клистроны (4 пучка)



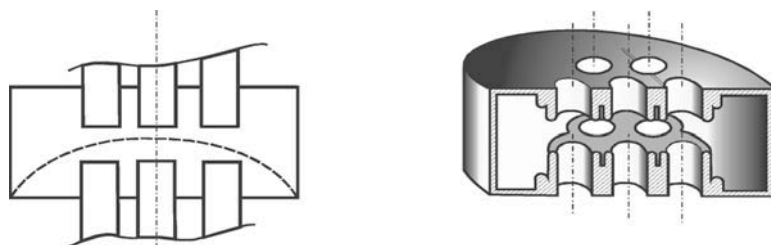


Рис. 1.13. Резонатор МЛК (7 пучков)

Таким образом, каждый электронный пучок имеет малый ток  $i_0$ , что дает высокий КПД. Принимается во внимание весь ток  $Ni_0$ , следовательно, при одной и той же выходной СВЧ-мощности  $P_{\text{OUT}} = V_0 \eta Ni_0$  напряжение на катоде является умеренным и даже низким. Например, рассмотрим клистрон с шестью или семью пучками (лучами). Первеанс одного пучка составляет около  $(0,5-0,6) \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{B}^{-3/2}$ , а общий первеанс  $P = Ni_0 V_0^{-3/2} \approx (3-4) \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{B}^{-3/2}$ . КПД взаимодействия примерно равен 65 %.

По сравнению с ОЛК напряжение на катоде  $V_0$ , как правило, уменьшается примерно на 40 %. Следовательно, напряженность электрических полей  $E_0$  снижается, произведение  $E_0 V_0$  ( $\text{kB}^2/\text{мм}$ ), которое интерпретируется как вероятность возникновения пробоя, также сокращается более чем на 50 %, что приводит к возможности гораздо более безопасной и надежной работы при более продолжительных импульсах или напряжении постоянного тока.

Резонаторы этих клистронов имеют цилиндрическую форму. Режим СВЧ-резонанса, как правило, является обычным –  $\text{TM}_{010}$ -волна, а трубки дрейфа, через которые проходят электронные пучки, сосредоточены вокруг оси [7], как показано на рис. 1.13. Структура СВЧ-поля дает возможность взаимодействия в фазе каждого электронного пучка, как и высокие коэффициенты связи  $M$  между электронами и электрическим СВЧ-полем  $E$ , несмотря на изменение величины  $E$  в зависимости от радиуса и возможного влияния магнитного ВЧ-поля, которыми нельзя пренебречь.

Суммарный высокий первеанс электронных пучков увеличивает проводимость нагрузки пучка в резонаторе. Следовательно, мгновенная полоса частот становится шире примерно в 5 раз. Наконец, конструкция резонаторов разработана таким образом, чтобы соседние моды (режимы) значительно отличались от моды, действующей в данный момент. Повод заключается в том, чтобы предотвратить монотронные колебания (см. подраздел 1.2.1), возбуждаемые большим общим током пучков  $Ni_0$ .

Пучок электронов достаточно трудно сфокусировать, поскольку его ось смещена и не совпадает с осью трубы дрейфа, создавая значительное радиальное магнитное поле  $B_R$ . Поэтому электромагнит оснащен несколькими полюсными наконечниками. Аксиальное поле остается почти постоянным, а относительная радиальная компонента  $B_R/B_z$  меньше, чем несколько процентов.

Короче говоря, основными характеристиками МЛК являются гораздо более низкое напряжение на катоде, большие КПД и/или широкая полоса частот. В результате мы получаем:

- небольшие габаритные размеры устройства и снижение электрической мощности источника питания;
- снижение риска пробоя или искрения, следовательно, более широкое использование высоковольтной изоляции в воздухе, чем в масле;
- меньше рентгеновских паразитных излучений;
- повышенную надежность.

Однако разработчики должны принимать во внимание следующие две проблемы:

- фокусировка и передача  $N$  пучков,  $N - 1$  из которых (по крайней мере) смещены относительно оси трубы дрейфа и магнитного поля;
- ликвидация или затухание паразитных колебаний в резонаторах, которые могут представлять множество мод высших порядков.

### 1.2.3. Лампы с индуктивным выходом (ИОТ)

В нижней части спектра частот, например около 500 МГц, в полосах для телевизионного вещания наземные передатчики обычно оснащены выходными каскадами на параллельно соединенных Si- и SiC-транзисторах. Однако выходная СВЧ-мощность ограничена несколькими сотнями ватт. Для достижения гораздо большей выходной мощности в диапазоне десятков киловатт уже в течение длительного времени используются вакуумные лампы благодаря своей надежности и высокой эффективности. Эти лампы могут быть представлены триодами, тетрами [11], клистроны, а теперь в основном лампами с индуктивным выходом (ИОТ).

Для триодов усиление мощности составляет от 13 до 15 дБ, у тетродов же усиление очень низкое. С другой стороны, большой размер и непрактичный способ настройки частоты в резонаторах ТВ-клистронов не очень привлекает производителей. Вот почему примерно 20 лет назад были разработаны гибридные ИОТ-лампы для основного использования в передатчиках, работающих в диапазоне 470–830 МГц, при мощности несколько десятков киловатт и усилении от 20 до 23 дБ, что совместимо с твердотельными генераторами.

Лампы с индуктивным выходом представляют собой модификацию, разработанную на основе обычных коаксиальных ламп с сеткой с линейным пучком, только с одним резонатором (рис. 1.14). Электронная пушка типа пушки Пирса со сфериче-

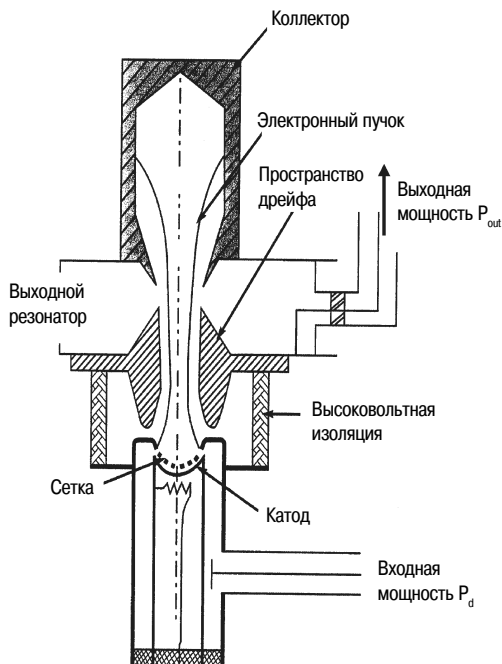


Рис. 1.14. Лампа с индуктивным выходом (ИОТ)

ским катодом и модулирующей сеткой  $G_1$  формирует сходящийся электронный пучок со средним током  $I_0$ , который модулируется периодическим напряжением  $V_G$  в ВЧ-диапазоне частот  $f$ .

Во избежание пробоев нельзя допускать никаких СВЧ-взаимодействий в ускоряющем пространстве между сеткой и анодом. Вот почему пушка разработана так, чтобы в этот промежуток не было доступа СВЧ-энергии. Такая энергия может подходить снаружи лампы или вследствие утечки из коаксиального зазора между катодом и сетчатым резонатором, а также из выходного резонатора через анод. Кроме того, в этом пространстве не должно возникать никаких колебаний, поэтому следует устранить все микроволновые резонансы.

Электронные ступки между сеткой и анодом ускоряются высоким напряжением  $V_A$ , которое достигает 30 кВ и выше, что значительно превышает 8–10 кВ – предельное напряжение триодов. После анода электронные пучки проходят через резонатор клистронного типа, где передают большую часть своей кинетической энергии волноводу или коаксиальному кабелю, чтобы дать выходную СВЧ-мощность  $P_{\text{OUT}}$ . Процесс происходит точно так же, как в выходном резонаторе обычных клистронов. Следует отметить, что слишком высокое напряжение торможения в резонаторе может отразить электроны к катоду и повредить лампу.

Наконец, оставшаяся энергия электронов рассеивается в коллекторе. Поскольку пучок короткий и не имеет цилиндрической формы, фокусировка упрощена, и просто необходимо установить постоянный магнит вокруг анода. С технологической точки зрения наиболее важной частью является сетка электронной пушки, и не только потому, что она расположена очень близко (на расстоянии примерно 1 мм) к горячему катоду, но и потому, что нужно инжектировать мощность возбуждения колебаний  $P_d$  в область пушки, которая имеет очень высокий потенциал  $V \approx -30$  кВ. Это реализовано с помощью петли связи и СВЧ-ловушек, конструкция которых трудна для изготовления. Кстати отметим, что в большинстве ламп анод заземлен из соображений электробезопасности, именно поэтому напряжения пушки и катода повышены до  $-V_A$ .

Перед тем как завершить этот подраздел, следует указать следующие особенности:

- наличие сетки рядом с горячим катодом и конструкция коаксиального резонатора ограничивают максимальные рабочие частоты до 1,5 ГГц;
- высокое напряжение  $V_A$  практически ограничено необходимостью использовать воздух, а не масло для изоляции пушки, в том числе резонатора катод–сетка.

Наконец, ИОТ-лампы являются очень удобными устройствами, работающими с частотами ниже 1,5 ГГц при высоком напряжении около 30 кВ. Усиление составляет примерно 22–23 дБ, КПД – 55 % при выходной ВЧ-мощности от 10 до 100 кВт.

### 1.3. Лампы бегущей волны (ЛБВ)

#### 1.3.1. Введение

Возвращаясь к началу XXI века и посмотрев на историю и эволюцию приборов СВЧ (как описано в подразделе 1.1.2), мы могли бы задаться вопросом, почему лампа бегущей волны (ЛБВ) (Линденблад, 1940 г.; Компфнер, 1942 г.), которая является явной реализацией принципа генерации микроволн в электронных лампах, была изобретена позже магнетрона (А. В. Халл, 1921 г.; К. Постумус, 1933 г.) и клистрона (Р.Г. и С.Э. Варианы, 1937 г.). Ограниченный обмен информацией в ходе войны, возможно, был причиной того, что о патенте США, выданном Линденбладу [12], не

**Таблица 1.1.** Выходная мощность и применение первых магнетронов С-диапазона, клистронов и ЛБВ в период начала промышленного производства ЛБВ. Данные взяты из [14–16] для магнетронов, клистронов и ЛБВ соответственно

Данные	Магнетроны	Клистроны	ЛБВ
Годы	1942	1949	1952
Производитель	Western Electric	Братья Варианы в Стэнфордском университете	STC
Тип	WE 718	Mark III	
Приложение	Радиолокационные станции	Линейные ускорители электронов	Телевидение, наземные станции связи
Частота	2,7–2,9 ГГц	2,85 ГГц	3,6–4,4 ГГц
Выходная мощность	193 кВт, импульсы	12 МВт, импульсы длительностью 1 мкс	2 Вт, непрерывные колебания

было известно доктору Рудольфу Компфнеру, австрийскому беженцу, который работал над СВЧ-устройствами для британского Адмиралтейства, и что прошли годы с момента подтвержденного документами изобретения принципа работы ЛБВ до опубликования работ Компфнера [13] в 1946 году.

В самом деле, ЛБВ имеет все необходимые элементы для генерации СВЧ-энергии, которые геометрически разделены в определенной, обоснованной физической форме. Эти элементы служат для формирования электронного пучка и его ускорения в электронной пушке, передачи мощности от электронного пучка усиливаемой СВЧ-волне в области взаимодействия и сбора электронов в коллекторе после их торможения. Дополнительными элементами являются входное и выходное устройства связи в начале и конце пространства взаимодействия и магнитная система фокусировки пучка.

В отличие от простого с физической точки зрения принципа работы ЛБВ для изготовления этих ламп используются самые сложные технологии среди приборов СВЧ. Необходимо сфокусировать электронный пучок с высокой плотностью мощности, чтобы он прошел через малоразмерные спирали, длина которых более чем в 100 раз больше их диаметра (от 0,3 мм (60 ГГц) до 4 мм (1,5 ГГц)), что требует изготовления устройства с очень малыми допусками между элементами, формирующими пучок, и магнитной фокусирующей системой. Хрупкие структуры замедляющих систем ограничивают достижимую ВЧ-мощность по сравнению с объемными резонаторами магнетронов или клистронов. Разница в уровне технологий и возможности получения мощности на момент появления ЛБВ представлена в таблице 1.1.

Хотя основное различие в возможности передачи мощности оставалось прежним на протяжении многих лет (см. рис. 1.1), разработка ЛБВ продолжалась из-за их высокой линейности и способности работать в широкой полосе частот, и сейчас они превратились в основные СВЧ-усилители, которые используются в наземных и особенно в космических телекоммуникационных системах. Другие области применения ЛБВ: источники когерентного СВЧ-излучения для обзорных радиолокаторов и систем наведения, спутники на основе наземных обзорных радиолокационных станций и широкополосные усилители для устройств радиоэлектронной защиты (подавления).

### 1.3.2. Конструкция и принцип работы ЛБВ

На рис. 1.15 представлена конструкция ЛБВ в разрезе, показывающем основные функциональные элементы, включая фокусирующие периодически расположенные постоянные магниты и четырехступенчатый электростатический коллектор.

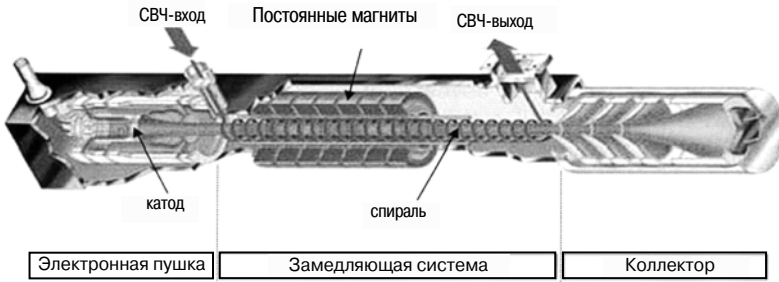


Рис. 1.15. Конструкция ЛБВ в разрезе, показывающем основные функциональные элементы: фокусирующие периодически расположенные постоянные магниты и электростатический четырехступенчатый коллектор

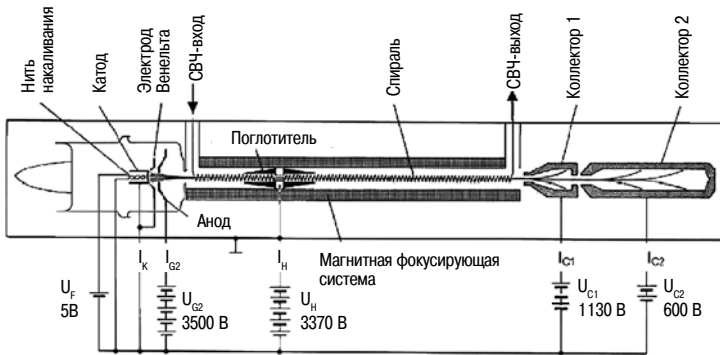


Рис. 1.16. Электрическая схема ЛБВ с двухступенчатым коллектором

На рис 1.16 показана электрическая цепь, необходимая для работы ЛБВ (с двухступенчатым коллектором). Вакуумная оболочка, содержащая электронную пушку, пространство ВЧ-взаимодействия и коллектор, откачана до давления  $10^{-9}$  Мбар. Для подвода электропитания к электронной пушке и коллектору, а также для герметизации окон и СВЧ-устройств ввода и вывода использована технология пайки металл/керамика. Далее мы рассмотрим движение электронов, начиная с их эмиссии до оседания в коллекторе.

### Электрическая цепь и электронная пушка

Для получения эмиссии электронного тока  $I_K$  с поверхности термокатода его нагревают до рабочей яркостной температуры  $T_C$ , равной примерно  $1000^\circ\text{C}$ , путем подведения к нити накала мощности питания, создаваемой напряжением  $V_F$  и током накала  $I_F$  при отрицательном потенциале катода  $V_K = -V_H$ . Приложение положительных потенциалов  $V_{G2}$ ,  $V_H$ ,  $V_{C1}$ ,  $V_{C2}$  заставляет электроны проходить через вакуум к соответствующим электродам, а оттуда по замкнутым цепям через соответствующие источники питания — обратно к катоду. При более подробном рассмотрении становится видно, что вначале формируется пучок ускоренных электронов, который фокусируется периодической системой постоянных магнитов. Пучок проходит через спираль пространства взаимодействия и в конечном итоге большая часть пучка собирается электродами коллектора. Кинетическая мощность пучка ускоренных электронов  $P_{\text{пучка}} = I_K V_H$ ,

входящих в пространство взаимодействия при заземляющем потенциале, переходит в потенциальную энергию, питающую различные электроды, при переходе отрицательно заряженных электронов от электродов с потенциалами  $V_{G2}$ ,  $V_H$ ,  $V_{C1}$ ,  $V_{C2}$  к отрицательно заряженному катоду  $V_K = -V_H$ . Таким образом, основными являются источники питания коллектора, поскольку анод и спираль пространства взаимодействия получают очень небольшую мощность  $P_{G2} = I_{G2} V_{G2}$  и  $P_H = I_H V_H$  из-за малых токов перехвата  $I_{G2}$  и  $I_H$ .

На входе в пространство взаимодействия оптическая система электронной пушки формирует электронный пучок с очень малым диаметром. Пучок характеризуется коэффициентом сходимости СФ, который является отношением площади поверхности катода к площади поперечного сечения пучка. Для различных ЛБВ коэффициент СФ может варьироваться в диапазоне 1–100. Для очень хорошей фокусировки пучка коэффициент СФ нужно поддерживать ниже примерно 30.

### Фокусирующая и замедляющая системы /область ВЧ-взаимодействия

Замедляющая система – это часть ЛБВ, где проходит основное взаимодействие в ЛБВ и поддерживается потенциал корпуса. В этом кроется определенное преимущество, поскольку величиной тока перехвата  $I_H$  электронного пучка, который нужно контролировать в безопасных эксплуатационных пределах, намного проще управлять при заземляющем потенциале. Здесь индекс «Н» указывает на «спираль» (англ. helix) пространства взаимодействия, которые используются во многих конструкциях ЛБВ. Чтобы избежать перехвата тока пучка замедляющей системой вследствие расталкивающих радиальных сил пространственного заряда в пучке, в фокусирующую систему вводят компенсирующую магнитную силу. Для этого используются постоянные осесимметричные магнитные поля, создаваемые соленоидами, или периодические поля, создаваемые несколькими постоянными магнитами. Достаточно подробная информация о концепции фокусировки представлена ниже в подразделе 1.3.2.

В пространстве взаимодействия ВЧ-мощность  $P_1$  подается через окно ВЧ-ввода. Она проходит по пространству взаимодействия с ограниченной фазовой скоростью  $v_p$ , приблизительно равной скорости электронов в пучке. Взаимодействуя с электронным пучком, СВЧ-волна усиливается по направлению к выходу до мощности  $P_2$ . Как правило, пространство взаимодействия разбивают на входную и выходную секции для ограничения усиления в каждой секции. В центральном разрыве пространства взаимодействия волна ослабляется, чтобы избежать отражений и паразитных колебаний в этих частях.

Максимальное усиление может быть получено, когда электроны движутся немного быстрее волны. При этом условии фазовая скорость равна скорости движущегося плотного сгустка электронов  $v_{\text{сгустка}}$ , который формируется в тормозящей фазе волны. Эта скорость равна скорости медленной волны пространственного заряда минус скорость электронного пучка, движущегося обратно,  $-v_{sc}$  или, если смотреть из точки, расположенной за пределами лампы, то скорость сгустка равна  $v_e - v_{sc}$ . Таким образом,

$$v_p = v_e - v_{sc} = v_{\text{сгустка}} \quad (1.42)$$

Это основное условие синхронизма в ЛБВ. Понимание этого взаимодействия и процесса СВЧ-усиления можно пояснить следующими наблюдениями. Предположим, что электроны, движущиеся в замедляющей и ускоряющей фазах СВЧ-поля, ведут себя как устойчивый поток машин, едущих по холмистой дороге. При подъеме автомобиля замедляются, и их плотность увеличивается. Противоположная картина наблюдается при спуске с холма. Таким образом, мы создаем «сгустки» автомобилей на

подъеме, которые могут существовать постоянно, несмотря на то, что отдельные машины давно уже съехали с холма. Для нашей электронной системы это означает, что электронный сгусток существует и увеличивается определенное время в тормозящей фазе по отношению к волне. В связи с торможением электронов сгустка, которое приводит к росту плотности пространственного заряда и соответственно росту СВЧ-тока, максимальное количество кинетической энергии электронов при условии синхронизма расходуется на усиление волны. Таким образом, при идеальном синхронизме мы получаем максимальное усиление мощности ЛБВ. Количественное рассмотрение взаимодействия электронного пучка и СВЧ-волны дано Пирсом в подразделе 1.3.3.

В конце замедляющей системы мы наблюдаем следующие процессы: а) передачу мощности  $P_2$  усиленной СВЧ-волны через вывод энергии на нагрузку, б) замедление пучка с широким спектром скоростей отдельных электронов. В зависимости от КПД взаимодействия пучок отдает от 65 % до 95 % его первоначальной кинетической энергии, которая восстанавливается в коллекторе электронов примерно до 80 %.

Для понимания физики взаимодействия следует отметить, что линейный ускоритель (LINAC), который передает энергию от распространяющейся волны потоку заряженных частиц (например электронов), можно понимать как устройство, действующее по принципу, обратному ЛБВ. Для оптимального ускорения и группировки электронов в растущий сгусток необходима связь СВЧ-волны с быстро растущим пространственным зарядом пучка частиц, следовательно, условие синхронизма LINAC можно представить в виде

$$v_p = v_e + v_{sc} = v_{\text{сгустка}} \quad (1.43)$$

Это означает, что в LINAC СВЧ-волны должны двигаться быстрее, чем заряженные частицы (например электроны) в целях поддержания синхронизма с растущим сгустком во время ускорения отдельных частиц в сгустке. Другими словами, фронт волны в ускоряющей фазе уплотняет медленно движущиеся одиночные частицы в растущем сгустке, который движется с фазовой скоростью.

Имея в виду эту инверсию, мы могли бы задаться вопросом, почему ЛБВ была изобретена только в 1942 году, несмотря на то, что принцип линейного ускорителя был описан еще в 1924 году Густавом Изингом, шведским физиком, и построен уже в 1928 году норвежским инженером Рольфом Видере.

### Коллектор

Первые коллекторы для ЛБВ имели одну ступень, как и коллекторы клистронов с потенциалом земли ( $V_c = V_H$ ). В заземленном электроде коллектора токовая петля связи была закрыта для большей части  $I_C$  током электронного пучка  $I_{\text{пучка}}$ . Так как рассеянный электронный пучок при входе в коллектор несет еще много кинетической энергии, эта энергия термически рассеивается, когда электроны ударяются о стенки коллектора. Теперь мы можем определить рассеиваемую мощность  $P_{\text{С.расс}}$ .

Предполагая, что генерация СВЧ-мощности  $P_2$  определяется только электронами, входящими в коллектор, вследствие сохранения энергии мы можем записать для рассеиваемой мощности в одноступенчатом коллекторе

$$P_{\text{С.расс}} = I_C V_C - P_2, \quad (1.44)$$

где  $P_2$  – СВЧ-мощность (основная и относящаяся к гармоникам), созданная в пространстве замедления.

Целью разработчиков ЛБВ является сокращение всех потерь, особенно потерь в коллекторах. Согласно (1.44) для заданной выходной мощности  $P_2$  это можно сделать двумя способами: во-первых, за счет снижения тока пучка и, следовательно, тока коллектора  $I_C$ , необходимых для получения выходной мощности  $P_2$ , для чего следует улучшить взаимодействие пучка и СВЧ-волны в замедляющей системе; во-вторых, за счет снижения напряжения  $V_C$  коллектора по сравнению с катодом. Это уменьшение напряжения коллектора возможно до тех пор, пока самые медленные электроны рассеянного пучка при входе в коллектор имеют достаточную кинетическую энергию  $E_{\text{кин},\text{мин}}$ , чтобы достичь электрического потенциала на поверхности коллектора:

$$E_{\text{кин},\text{мин}} > |e(V_H - V_C)|, \quad (1.45)$$

где  $e$  — элементарный заряд электрона.

В современных космических системах снижение напряжения в ЛБВ составляет до  $(V_H - V_C)/V_H = 0,55$ . Поскольку для постоянного шага спирали КПД взаимодействия пучка  $\eta_0$  составляет около 13 %, Г. Фолькштейн произвел научный прорыв, когда в 1958 году добился КПД 30 % для ЛБВ с пониженным напряжением на одноступенчатом коллекторе.

Аналогичные выводы могут быть сделаны, когда вводятся  $i$  ступеней коллектора с последовательно понижаемым напряжением для дальнейшего замедления быстрых электронов. В формуле (1.44) слагаемое  $I_C V_C$  является электрической мощностью источника питания одной ступени, его можно заменить суммой мощностей источников питания  $i$  ступеней гораздо меньшей величины, тогда мощность, необходимая для рассеивания энергии электронов, будет иметь вид

$$P_{\text{С,расс}} = \sum_i I_{Ci} V_{Ci} - P_2, \quad (1.46)$$

$$E_{i,\text{р,кин}} > |e(V_{Ci} - V_{Ci-i})|. \quad (1.47)$$

В (1.47) входные условия для остаточной кинетической энергии электронов для ступени  $i$  связаны с увеличением потенциальной энергии электронов, входящих в ступень  $i + 1$ . Оригинальную конструкцию коллектора с 10 ступенями снижения напряжения создали Нойгебауер и Мигран [18] в 1972 году. Она позволила повысить КПД данного клистрона с 54 % (одна ступень) до 70,9 %. В современных ЛБВ для космического применения наилучшим компромиссом между повышением КПД и сложностью конструкции являются коллекторы с 3–5 ступенями снижения напряжения в зависимости от спектра скоростей замедленных электронов пучка. В таких ЛБВ с четырехступенчатым коллектором может быть получен общий КПД 74 %.

### 1.3.3. Физические основы работы ЛБВ

После качественного описания концепции ЛБВ и общих принципов работы ниже приведены основные физические закономерности и более подробное рассмотрение ее отдельных компонентов. Для детального изучения необходимы дополнительные учебники. Среди прочего мы рекомендуем три книги на английском языке [6, 19, 20].

#### Электронная пушка Пирса для создания электронного пучка, ограниченного пространственным зарядом

Электронная пушка Пирса формирует пучок электронов с поверхности катода, поперечное сечение которого больше поперечного сечения конечного пучка. Это необходи-



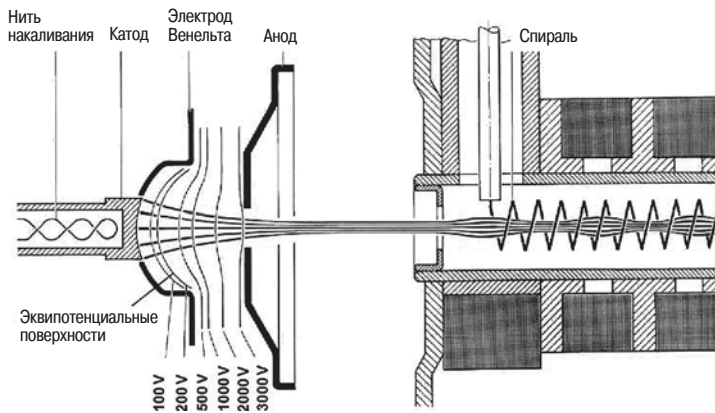


Рис. 1.17. Формирование электронного пучка в модифицированной оптической электронной пушке Пирса

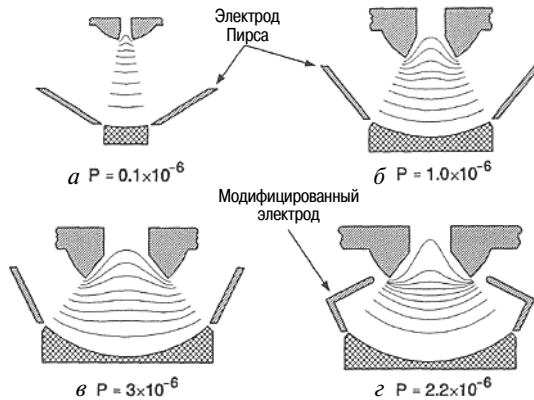


Рис. 1.18. Первеанс  $P$  электродов различной конфигурации в относительных единицах,  $A/B^{-3/2}$ . Электрод Венельта (Пирса) сохраняет потенциал катода во всех случаях. Первеанс увеличивается с уменьшением расстояния между катодом и анодом и увеличением угла полуконуса  $\theta$  (шириной катода)

мо для того, чтобы поддерживать плотность тока на катоде в пределах нескольких ампер на квадратный сантиметр, поэтому температуру катода следует сохранять как можно более низкой. Как видно из рис. 1.17, эти условия могут быть достигнуты при использовании вогнутой сферической поверхности катода. Эквипотенциальные линии имеют концентрическую форму, а траектории электронов перпендикулярны поверхности катода.

Первеанс такой пушки Пирса можно аналитически представить в виде модели конической части сферического диода, рассчитанного Ленгмюром—Блуджеттом [21]. Здесь мы ограничимся зависимостью первеанса пушки от геометрических параметров, представленных на рис. 1.18.

Сегодня компьютерные программы позволяют рассчитывать первеанс и траектории электронов для любых геометрических модификаций электронных пушек

### Фокусировка электронного пучка по всей длине пространства взаимодействия

Перед рассмотрением внешних сил, используемых для фокусировки электронного пучка, обратимся к внутренним силам, действующим в самом пучке вследствие его заряда и плотности тока.

*Расталкивающие силы пространственного заряда и магнитные силы притяжения в пучке*

Для создания однородного цилиндрического пучка с равномерным распределением осевой скорости  $v$  радиальные силы, действующие на заряженные частицы в области с радиусом  $r$ , должны быть заданы следующими выражениями:

$$F_{sc} = Qe / (2\pi r \epsilon_0) \quad \text{внешняя радиальная сила пространственного заряда;} \quad (1.48)$$

$$F_m = Qe\mu_0 v^2 / (2\pi r) \quad \text{внутренняя радиальная магнитная сила,} \quad (1.49)$$

где  $Q$  – полный заряд на единицу длины в пределах области с радиусом  $r$ .

Подставляя выражение для физической идентичности  $\epsilon_0\mu_0 = 1/c^2$  в отношение обеих собственных сил, несложно получить

$$F_{sc}/F_m = c^2 / v^2. \quad (1.50)$$

Приведенные выше уравнения имеют два интересных следствия:

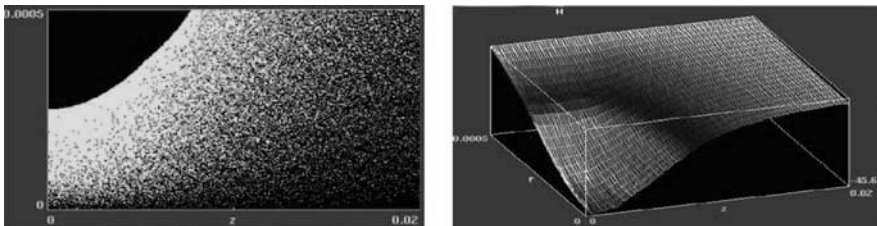
- внешняя радиальная сила пространственного заряда доминирует над эффектом взаимного притяжения электронов при всех скоростях пучка, так как  $v < c$ . Однако есть исключение для положительно заряженных ионов, которые нейтрализуют пространственный заряд пучка электронов, что может привести к преобладанию внутренней сжимающей силы. (Пример: вакуумные выключатели, где этот разрушительный эффект нейтрализуется применением аксиального магнитного поля);
- на внутренней границе цилиндрических полых пучков внутренний заряд  $Q$  равен нулю, таким образом, электроны внутри полого пучка не испытывают радиальной силы пространственного заряда!

*Общее распределение пучка электронов*

На рис. 1.19 мы представили распределение электронов в пучке и снижение потенциала для типичного нефокусированного пучка, необходимых для ЛБВ мощностью 200 Вт, работающей в Ку-диапазоне, с замедляющей системой диаметром 1 мм и длиной 20 мм. Мы видим, что на отрезке длиной 1 см пучок будет расширяться, достигая внутреннего диаметра спирали. Снижение потенциала в начале координат составляет  $-45,6$  В, а затем уменьшается из-за расширения пучка.

*Магнитная фокусировка*

Вводя пучок в аксиальное постоянное магнитное поле с амплитудой  $B_z = 0,33$  Тл, которое способен создавать соленоид, получим пучок с небольшой волнистостью, как



**Рис. 1.19.** Моделирование распределения электронов и потенциала пространственного заряда с помощью объектно-ориентированного 2,5-мерного кода ХООРПС, разработанного в Университете Беркли в Калифорнии. Параметры моделирования:  $I_{\text{пучка}} = 110$  мА,  $V_{\text{пучка}} = 7,5$  кВ, радиус пучка  $r_{\text{пучка}} = 0,25$  мм, внутренний радиус корпуса замедляющей системы  $r_{\text{трубки}} = 0,5$  мм (см. цв. вклейку)

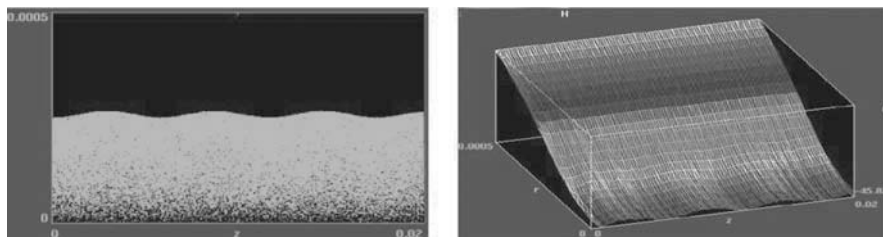


Рис. 1.20. Моделирование движения электронного пучка с током 110 мА, напряжением 7,5 кВ, радиусом 0,25 мм в канале радиусом 0,5 мм в однородном магнитном поле с  $B_z = 0,33$  Тл. Для моделирования использован объектно-ориентированный код ХООРИС (см. цв. вклейку)

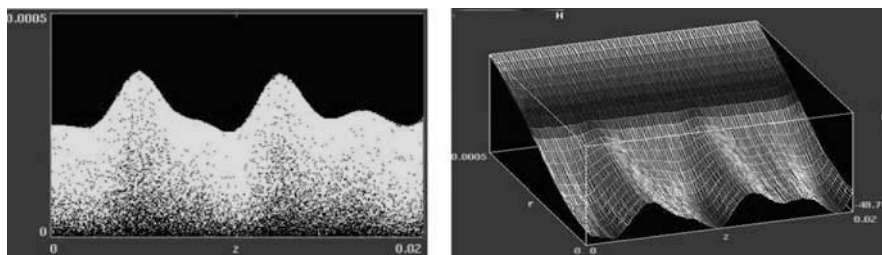


Рис. 1.21. Моделирование движения электронного пучка с током 110 мА, напряжением 7,5 кВ, радиусом 0,25 мм в канале радиусом 0,5 мм в магнитном поле, создаваемом периодически расположенными постоянными магнитами, с пиковым значением поля 0,33 Тл. Для моделирования использован объектно-ориентированный код ХООРИС (см. цв. вклейку)

показано на рис. 1.20. Снижение потенциала теперь практически равномерно и составляет 45,8 В.

На рис. 1.21 показано наложение волнистости и пульсаций пучка под действием периодически расположенных постоянных магнитов (ширина магнита 7 мм) с пиковым значением поля 0,33 Тл. Мы видим, что по сравнению с однородным магнитным полем волнистость пучка гораздо сильнее выражена из-за наложения пульсаций и периодического изменения магнитного поля в сочетании со значительным изменением потенциала от 16 до 3 В вдоль оси соответственно. *Примечание:* ловушки потенциала, расположенные вдоль оси, могут вызывать колебания ионов, образованных путем ионизации остаточного газа в ЛБВ. В практических конструкциях некоторые недостатки системы периодически расположенных постоянных магнитов более чем компенсируются значительной экономией по массе, мощности, надежности и сложности настройки.

### Поток Бриллюэна

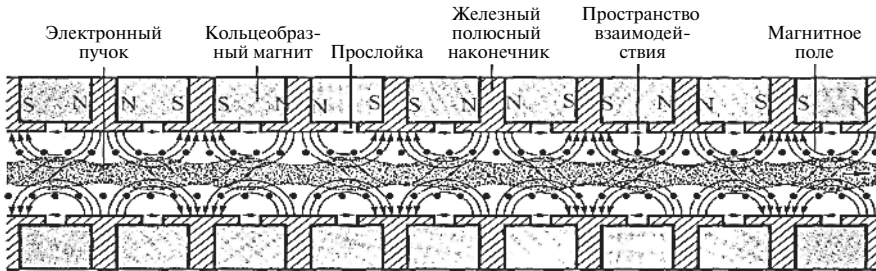
Существует один частный случай электронных пучков, известный как поток Бриллюэна, который не приводит к появлению волнистости пучка или потенциала. Простой вывод из теоремы Буша дает выражение для поля потока Бриллюэна  $B_{zBr}$  как функции тока пучка  $I$ , напряжения пучка  $V$  или скорости электрона  $v_e$  и радиуса пучка  $a$ :

$$B_{zBr} = \sqrt{\frac{2I}{\epsilon_0 \pi a^2 v_e} \frac{m_e}{e}}, \quad (1.51)$$

$$\frac{B_{zBr}}{Bc / \text{см}^2} = 8,3 \times 10^{-6} \frac{(I / F)^{1/2}}{\left(\frac{a}{\text{см}}\right) \left(\frac{B}{B}\right)^{1/4}}.$$



**Рис. 1.22.** Форма электронного пучка с «идеальной траекторией», проходящего от поверхности катода через магнитную периодическую фокусирующую систему в области пространства взаимодействия, для типичной ЛБВ Ку-диапазона. Параметры пушки Пирса:  $I = 150$  мА,  $V = 7,5$  кВ, диаметр канала 1 мм, заземленная трубка,  $B_{\text{пик}} = 0,325$  Тл. (Моделирование проведено с помощью программы моделирования пушки в двумерном приближении, визуализация – с помощью условно-бесплатного программного обеспечения создания виртуальной реальности. Исполнитель В. Швертфегер, TED, Ulm. Используются различные коэффициенты относительного масштабирования  $r = 8 \times z$ )



**Рис. 1.23.** Набор периодически расположенных постоянных магнитов с железными полюсными наконечниками и немагнитными вставками, жестко прикрепленными к герметичной вакуумной оболочке

Уравнение (1.51) используется в качестве проектной нормы при конструировании магнитных систем ЛБВ: пиковое магнитное поле должно быть в 1,2–2 раза больше поля Бриллюэна, чтобы гарантировать сохранение фокусировки электронного пучка по всей длине пространства взаимодействия в ЛБВ. Согласно другому конструкторскому правилу, требование стабильности фокусировки по всей длине магнитного поля должно обеспечиваться длиной периода  $l_m$  расположения постоянных магнитов:

$$l_m \leq 418 \frac{V}{B_{zBr}^2} \frac{m_e}{e}. \quad (1.52)$$

На рис. 1.22 показано волнообразное движение электронов в пучке, сфокусированном системой периодически расположенных постоянных магнитов. Техническая реализация фокусирующей системы периодически расположенных постоянных магнитов представлена на рис. 1.23.

### Замедляющая система и СВЧ-взаимодействие

#### Типы замедляющих систем

В зависимости от уровня мощности используется несколько типов замедляющих систем:

- Спиральные – низкое энергопотребление, очень широкая полоса усиливаемых частот (до нескольких октав), необходима поддержка спирали керамическими стержнями.

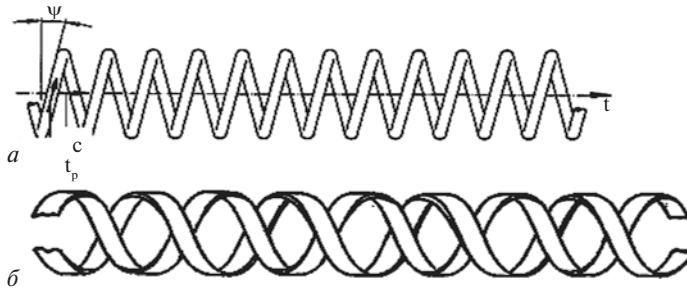


Рис. 1.24. *a* – спиральная замедляющая система: угол наклона спирали  $\psi$  определяет фазовую скорость  $v_p = c \tan \psi = c 2\pi a/p$ , где  $c$  – скорость света,  $p$  – шаг спирали; *б* – замедляющая система «двойная спираль»

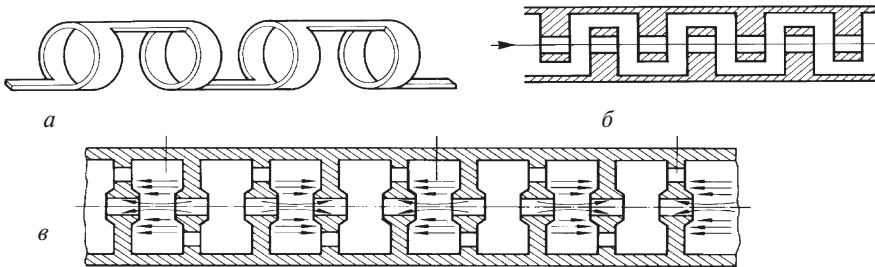


Рис. 1.25. Замедляющие системы: *a* – кольцо-стержень; *б* – штыревая или гребенчатая; *в* – цепочка связанных резонаторов

- Двойная спираль с обратной навивкой – подавляет колебания обратной волны (из-за механической сложности мало используется), нуждается в поддержке керамическими стержнями.
- Система «кольцо-стержень» – подавляет колебания обратной волны, нуждается в поддержке керамическими стержнями.
- Штыревая система – надежная и компактная система замедления для ЛБВ с высокой СВЧ-мощностью, снижает ширину полосы.
- Цепочка связанных резонаторов – узкая полоса частот, высокая мощность.

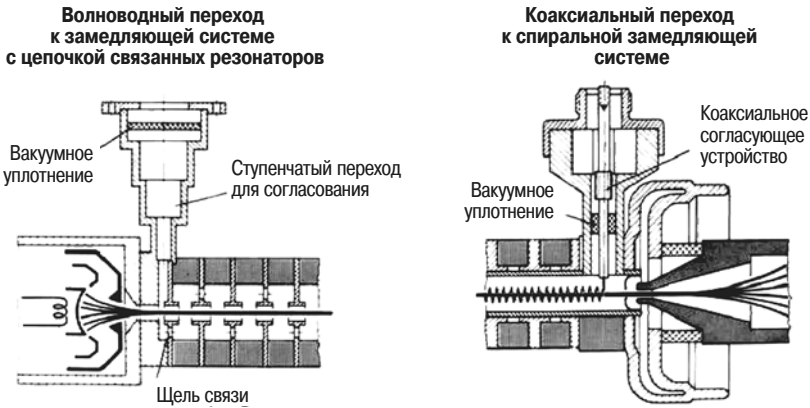
На рис. 1.24 и 1.25 представлены основные типы замедляющих систем.

### СВЧ-устройства ввода и вывода

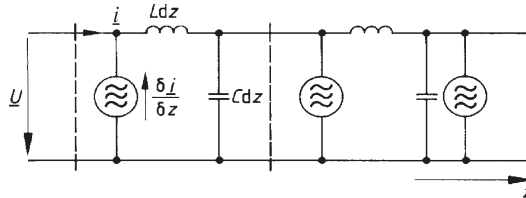
В зависимости от концепции замедляющей системы используется несколько конструкций СВЧ-устройств ввода и вывода энергии. На рис. 1.26 представлены только два примера волноводных переходов, используемых, например, для пространства взаимодействия с сопряженным входным резонатором, и коаксиальный переход, который часто применяется для устройств ввода и вывода спиральных замедляющих систем маломощных ЛБВ.

### Теория малого сигнала (теория Пирса)

Когда Пирс разрабатывал теоретические принципы работы ЛБВ, подход Эйлера представлял собой единственную успешную перспективу. Он рассматривал электронный



**Рис. 1.26.** Слева: волноводный входной переход со ступенчатым преобразователем Чебышева для точного согласования. Справа: коаксиальный выходной переход от спиральной замедляющей системы с коаксиальным согласующим устройством и  $\lambda/4$ -волновые керамические окна для вакуумного уплотнения



**Рис. 1.27.** Эквивалентная модель линии передачи для спиральной замедляющей системы

пучок как заряженную среду, которая характеризуется током  $I$  со скоростью пучка (потока)  $v_0$  или напряжением пучка  $V_0$  и сгустками пространственного заряда, поскольку переменный ток  $i$  распространяется с той же частотой, что и СВЧ-волны. Как указывалось ранее, этот подход ограничивается прохождением малого сигнала в ЛБВ, поскольку эффект насыщения не возникает. В своей гениальной концепции Пирс учел эту точку зрения Эйлера на поведение электронного пучка, но заменил пространство замедления на модель эквивалентной линии передачи, состоящей из распределенных индуктивностей  $L$  и емкостей  $C$ , как показано на рис. 1.27.

В результате он получил уравнение четвертой степени для постоянной распространения (замедления) волны  $\beta$ , известное как характеристическое уравнение

$$0 = 1 + \frac{\beta_e}{(\beta - \beta_e)^3} \frac{\beta^2 \beta_c}{\beta^2 - \beta_c^2} 2C^3, \tag{1.53}$$

$$C^3 = \frac{IZ}{4V_0}, \tag{1.54}$$

где  $C$  – параметр Пирса.

Уравнение имеет четыре корня, соответствующих (1.55) – (1.57):

$$\beta_{1,2} = \beta_e + \beta_c C/2 \pm j\sqrt{3}\beta_c C/2 \quad \text{решения для экспоненциально нарастающих и убывающих медленных волн;} \tag{1.55}$$

$$\beta_3 = \beta_e (1 - C) \quad \text{решение для быстрой бегущей волны с постоянной амплитудой;} \tag{1.56}$$

$$\beta_4 = \beta_e (C^3/4 - 1) \quad \text{решение для быстрой обратной волны с постоянной амплитудой.} \tag{1.57}$$

Смысл решений становится ясен, если вспомнить, что волны изменяются пропорционально  $e^{i(\omega t - \beta z)}$ . На рис. 1.28 представлены зависимости для четырех решений. Учитывая только решение с экспоненциальным возрастанием, мы получаем из (1.55) линейное усиление мощности  $G$  на протяжении  $N$  длин волн ЛБВ в децибелах

$$G = 10 \log 10 e^{\sqrt{3}\pi CN} = 47,3 \cdot CN. \quad (1.58)$$

Для выполнения граничных условий при запуске четырех волн на входе в лампу можно получить дополнительные так называемые распределенные потери, тогда выражение (1.58) приобретает вид

$$G = -9,54 + 47,3 CN, \quad (1.59)$$

оно является выражением для общего линейного усиления мощности лампы с учетом распределенных потерь. Следует отметить, что эти решения не ограничиваются спиральными замедляющими системами и действительны для всех типов замедляющих систем при введении соответствующих параметров цепи.

#### Пучок Катлера и характеристика СВЧ-сигнала вплоть до насыщения

Большой шаг вперед в понимании нелинейных характеристик ЛБВ был сделан, когда Катлер [22] опубликовал свои результаты теста СВЧ-напряжения цепи (пунктирная линия), скорости пучка (сплошная линия) и тока пучка (заштрихованная область) на выходе ЛБВ относительно неискаженной фазы сигнала как функции уровня входного сигнала (рис. 1.29). Его результаты для 15 уровней входного сигнала, начиная с уровня  $-22$  дБ до  $+9$  дБ относительно сигнала, соответствующего максимальной выходной мощности, можно интерпретировать следующим образом. Для напряжения цепи можно определить зоны ускорения и замедления пучка электронов. В связи с ускорением или замедлением находят относительную скорость электронов  $v_r$ , которая увеличивается при переходе из зоны ускорения в зону замедления, а на других участках ее значение меньше нуля. Кроме того, мы видим, что значения  $v_r$  начинают становиться двузначными для уровней сигнала  $-14$  дБ, поскольку некоторые электроны отражаются из зоны замедления в зону ускорения. Ток пучка (заштрихованная область) больше в зоне замедления до насыщения, где электронный сгусток в зоне ускорения становится примерно однородным из-за замедленных электронов, влетающих в эту зону. Присутствие двух сгустков в одном периоде означает, что в цепи была создана волна с частотой гармоника. Она достигает своего максимума после насыщения. При более высоких уровнях входного сигнала электроны более равномерно распределяются по относительной фазе. Если сделать вертикальный разрез распределения скоростей электронов и проинтегрировать по различным относительным фазам, можно получить спектр скоростей электронов на выходе лампы в зависимости от уровня сигнала. Электроны с таким выходным спектром скоростей входят в коллектор, поэтому данный спектр играет важную роль в определении общего КПД ЛБВ, что мы уви-

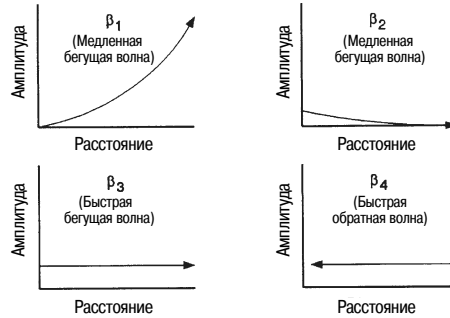


Рис. 1.28. Четыре волны, распространяющиеся вдоль пространства взаимодействия ЛБВ

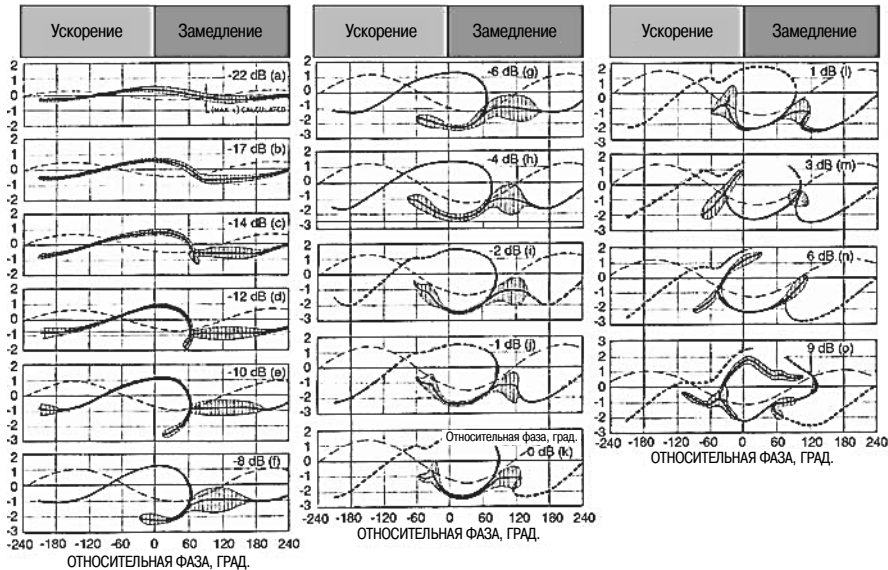


Рис. 1.29. Результаты эксперимента Катлера в 1956 году

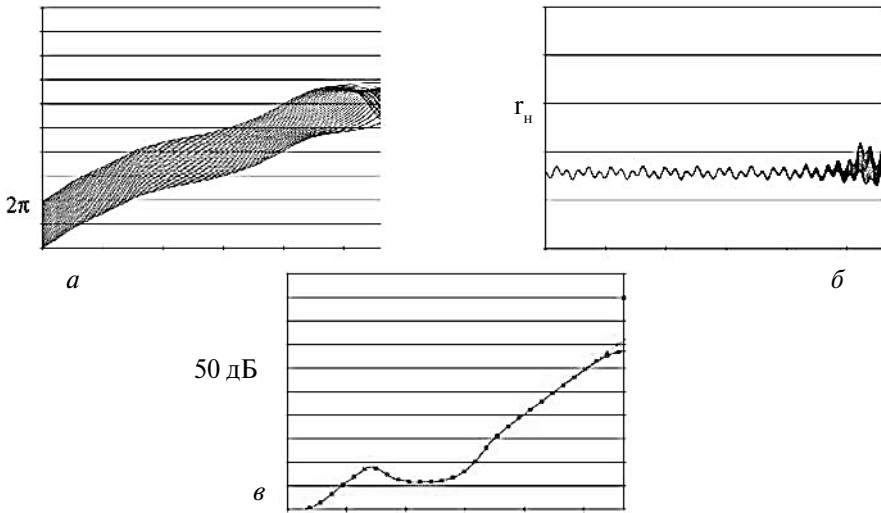
дим в следующем подразделе. Здесь можно резюмировать, что большинство электронов замедляется, а лишь немногие из них ускоряются по сравнению с начальной скоростью  $v_0$ .

#### Теория больших сигналов (Роу) и результаты моделирования

Объем книги не позволяет описать все теоретические подходы, в которых рассматривались нелинейные эффекты, возникающие в ЛБВ ближе к насыщению или даже к перенасыщению. Вполне достаточно отослать читателя к сборнику Роу [23], а также сказать, что не существует аналитических решений для работы ЛБВ с большими сигналами. Теоретические подходы основаны главным образом на концепции Лагранжа, которая рассматривает электроны как частицы и дает многозначное распределение скоростей электронов в данном пространстве или в фазе. Даже сегодня полностью трехмерное численное моделирование является слишком трудной проектной задачей. Множество 2,5-мерных объектно-ориентированных кодов (2-мерное моделирование осесимметричных электрических и магнитных полей и 3-мерное моделирование движения частиц, представляющих электроны, слои и оболочки электронов или статистически распределенные «тяжелые электроны») обеспечивают надежную проектную информацию об усилении, выходной мощности, нелинейном сдвиге фаз и даже интермодуляционных искажениях в зависимости от входного сигнала и частоты, а также представление траекторий электронов в реальном и фазовом пространстве. Для моделирования пространства взаимодействия необходимо ввести в код следующие параметры: сопротивление связи  $K(f, r, z)$  как функцию частоты, радиуса и координат, фазовую скорость  $v_p(f, z)$  как функцию частоты  $f$  и осевого положения, затухание СВЧ-колебаний  $\alpha(f, z)$  как функцию частоты  $f$  и осевой координаты.

Для моделирования электронного пучка необходимо ввести информацию о пространственном заряде  $\rho(r, z_0)$  и плотности тока  $\mathbf{j}(r, z_0)$  на входе в пространство взаимодействия с продольной координатой  $z_0$ . Для современной ЛБВ, используемой в космических системах в Ку-диапазоне, на рис. 1.30 представлено моделирование относительной фазы электронов, равномерно распределенных в течение  $2\pi$  на входе в





**Рис. 1.30.** Моделирование электронного пучка в ЛБВ: *a* – диаграмма движения электронов Эпплгейта (зависимость относительной фазы СВЧ-волны); *б* – наружный диаметр пучка электронов внутри пространства взаимодействия; *в* – усиление малого сигнала (крестики) и насыщения (кружки) вдоль оси лампы

пространство взаимодействия, наружного диаметра электронного пучка, малого сигнала и уровня усиления насыщения по всей длине пространства взаимодействия.

На рис. 1.30, *a* можно отметить пересечение траекторий электронов при приближении к насыщению на самых последних сантиметрах перед выходом из пространства взаимодействия. На рис. 1.30, *б* мы снова видим пульсации и умеренное увеличение радиуса пучка по мере того, как скорость электронов замедляется с приближением к выходу. На рис. 1.30, *в* показаны потери на входе в пространство взаимодействия, обширные разорванные участки в местах, где СВЧ-мощность переносится электронным пучком, и различие между усилением малого сигнала и насыщения величиной менее чем 5 дБ, что является важным фактором при получении отличных линейных характеристик лампы.

### Коллектор электронного пучка

#### *Сбор электронов пучка с распределенными скоростями*

На рис. 1.31 показан типичный спектр скоростей электронов в ЛБВ для космических систем с высоким КПД и работой в Ку-диапазоне при возбуждении насыщения в качестве интегральной функции распределения электронов. По оси ординат откладываются значения соотношения токов  $I/I_0$  части пучка, имеющей более высокую осевую скорость, чем скорости той части пучка, которая соответствует ускоряющему напряжению, представленному на оси абсцисс. Изначальное распределение скоростей электронов при нулевом возбуждении соответствует прямоугольным графикам (все электроны имеют равную скорость, соответствующую напряжению спирали 6250 В). Затененная область означает мощность  $P_{\text{восст}}$  восстановленную в коллекторе, если соответствующие токи собраны на постепенно уменьшающихся потенциалах многоступенчатого коллектора.

### Снижение потенциала в идеально сфокусированном цилиндрическом пучке

Пусть идеально сфокусированный цилиндрический пучок с током  $I = 110$  мА проходит в металлической трубке с потенциалом  $\phi(b) = 0$  при моноэнергетическом напряжении пучка, соответствующем отрицательному потенциалу катода  $\phi_c = -7500$  В, как показано на рис. 1.32. При скорости пучка

$$v_z = (2\eta(\phi_b - \phi_c))^{1/2} \quad (1.60)$$

запишем приближенно аналитические формулы для снижения потенциала пучка:

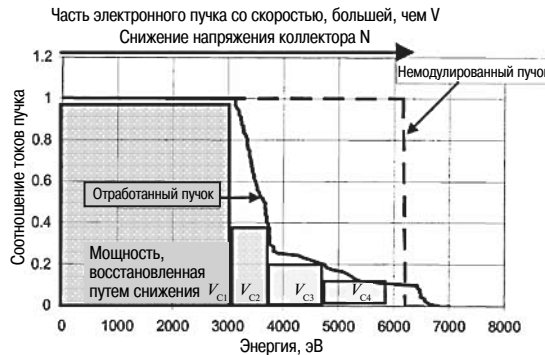
$$\phi(a) = \phi(b) - I \ln(b/a) / 2\pi\epsilon_0 v_z \quad \text{потенциал на краю пучка;} \quad (1.61)$$

$$\phi(0) = \phi(b) - I(\ln(b/a) + 1/2) / 2\pi\epsilon_0 v_z \quad \text{потенциал в центре пучка.} \quad (1.62)$$

Вполне достаточно, чтобы результаты для снижения потенциала на краю и в центре пучка  $\phi(a) = -26,7$  В и  $\phi(0) = -45,9$  В согласовались с теми значениями, которые были получены при моделировании с помощью кодов объектно-ориентированного программирования ХООРИС (см. рис. 1.19 – 1.21), где мы использовали те же параметры:  $I = 110$  мА,  $\phi(b) = 0$ ,  $\phi_c = -7500$  В и  $b = 2a = 0,5$  мм.

### Ограничение тока коллектора под действием пространственного заряда

Предположим, что электронный пучок, изображенный на рис. 1.32, приближается ко входу в диафрагму коллектора при пониженном потенциале, как показано на рис. 1.33.



**Рис. 1.31.** Типичный спектр распределения скоростей / энергий замедленного пучка электронов на входе в коллектор и отношение восстановленной мощности (заштрихованная область) для ЛБВ в Ку-диапазоне с  $V_H = 6250$  В,  $V_{C1} = 3250$  В,  $V_{C2} = 2500$  В,  $V_{C3} = 1750$  В и  $V_{C4} = 450$  В по отношению к катоду. КПД коллектора представлен отношением площади затененной области к площади всей области, находящейся ниже кривой распределения скоростей замедленного пучка



**Рис. 1.32.** Цилиндрический пучок электронов в канале с радиусом  $b$  и потенциалами  $\phi(0)$  в центре пучка,  $\phi(a)$  на краю пучка и  $\phi(b)$  на замедляющей системе

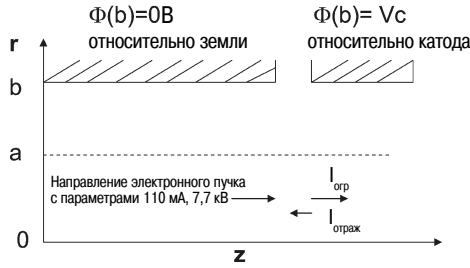


Рис. 1.33. Сфокусированный пучок при напряжении  $\phi$ , входящий в диафрагму коллектора при пониженном потенциале коллектора  $V_C$

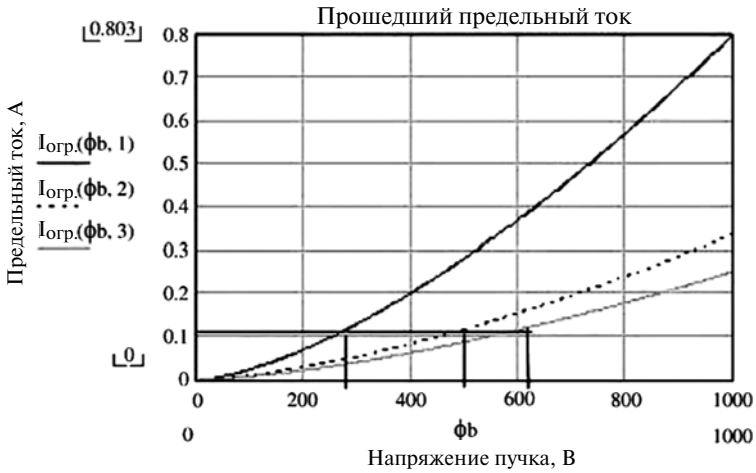


Рис. 1.34. Зависимость величины предельного тока от напряжения коллектора для трех значений отношения радиусов канала коллектора и пучка  $b/a = 1, 2$  и  $3$ . Как мы видим на примере пучка с током  $110$  мА, снижение напряжения коллектора может быть достигнуто, если пучок равномерно заполняет его канал ( $b/a = 1$ )

Возникает вопрос по поводу предельного тока пучка  $I_{огр}$ , который может пройти без отражения в область коллектора при пониженном потенциале коллектора  $V_C$ . Примечание:  $V_C$  измеряется относительно потенциала катода. Как будет видно из уравнения (1.63), приведенного ниже, максимальный ток зависит от отношения  $b/a$  радиуса канала коллектора к радиусу конкретного пучка, уменьшенного, чтобы избежать отражения части пучка, и отношения радиуса входа в коллектор  $b$  к радиусу пучка  $a$  (рис. 1.34):

$$I_{огр}(b/a) = 4\pi\epsilon_0 \sqrt{e/m_0} \frac{1}{1+2\ln(b/a)} \left[ \frac{2}{3} (\phi_{пучка} - V_C) \right]^{3/2}. \quad (1.63)$$

Уравнение (1.63) снова имеет вид первеанса или приведенного здесь выражения  $I_{огр} = A(b/a) \cdot (V_C)^{3/2}$ , следовательно, вполне применимы законы подобия (масштабирования) (см. таблицу 1.2).

Результаты предполагают теоретический предел КПД коллектора. В зависимости от ширины спектра распределения скоростей электронов коллектор с 3–5 степенями является оптимальным компромиссом между получением удовлетворительного общего КПД лампы и сложностью системы. Выделяют две категории коллекторов: электростатические коллекторы и коллекторы с магнитной фокусировкой.