

# радиоэлектроники

А.С. ГИЛМОР-МЛ.

Лампы  
с бегущей  
волной



ТЕХНОСФЕРА



*Специалисты радиозлектронного комплекса уже успели оценить серию книг «Мир радиозлектроники» за тщательный отбор научной и технической литературы по передовым направлениям развития науки и технологий радиозлектроники. Публикуемые в серии книги позволяют поддерживать современный уровень знаний, способствуя научно-техническому прогрессу в радиозлектронной промышленности, сокращению технологического отставания и подготовке необходимых кадров.*

*Директор Департамента радиозлектронной промышленности  
Минпромторга РФ  
А.С. Якунин*



**ТЕХНОСФЕРА**  
Рекламно-издательский центр

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

**Якунин Александр Сергеевич**, директор Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга РФ – председатель редсовета

### *Члены совета:*

**Авдонин Борис Николаевич**, ген. директор ОАО ЦНИИ «Электроника», д.т.н., профессор, г. Москва

**Акопян Иосиф Григорьевич**, ОАО «МНИИ «Агат», д.т.н., профессор, г. Москва

**Анцев Георгий Владимирович**, ген. директор ОАО «НПП «Радар ммс», г. Санкт-Петербург

**Бельий Юрий Иванович**, ген. директор НИИП им. В.В. Тихомирова, МО, г. Жуковский

**Беккиев Азрет Юсупович**, ген. директор ОАО «Концерн «Созвездие», д.т.н., профессор, г. Воронеж

**Боев Сергей Федотович**, ген. директор ОАО «РТИ», д.э.н., профессор, г. Москва

**Борисов Юрий Иванович**, заместитель Министра обороны РФ, д.т.н., профессор, г. Москва

**Букашкин Сергей Анатольевич**, ген. директор ОАО «Концерн «Автоматика», д.т.н., профессор, г. Москва

**Бушуев Николай Александрович**, ген. директор ОАО «НПП «Алмаз», д.э.н., профессор, к.ф.-м.н., г. Саратов

**Васильев Андрей Георгиевич**, ген. директор ОАО «МРТИ РАН», д.ф.-м.н., профессор, г. Москва

**Верба Владимир Степанович**, ген. директор ОАО «Концерн радиостроения «Вега», д.т.н., профессор, г. Москва

**Верник Петр Аркадьевич**, ген. директор компании «Золотой Шар», г. Москва

**Вилкова Надежда Николаевна**, ген. директор ЗАО «МНИТИ», к.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва

**Гаршин Вадим Вениаминович**, ген. директор ОАО «Мосэлектронпроект», г. Москва

**Гуляев Юрий Васильевич**, директор института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, академик РАН, г. Москва

**Козлов Геннадий Викторович**, советник ген. директора ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей», д.т.н., профессор, г. Москва

**Комяков Алексей Владимирович**, ген. директор ФНПЦ ОАО «НПП «Полет» г. Нижний Новгород

**Красников Геннадий Яковлевич**, ген. директор ОАО «НИИМЭ», академик РАН, г. Зеленоград

**Мальцев Петр Павлович**, директор Института СВЧ полупроводниковой электроники РАН, д.т.н., профессор, г. Москва

**Меньщиков Владислав Владимирович**, ген. директор ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей», г. Москва

**Минаев Владимир Николаевич**, д.т.н., профессор, г. Москва

**Муравьев Сергей Алексеевич**, советник директора Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, к.т.н., с.н.с., г. Москва

**Немудров Владимир Георгиевич**, ген. директор НИИМА «Прогресс», д.т.н., профессор, г. Москва

**Попов Владимир Васильевич**, ген. директор ОАО «Светлана», к.т.н., г. Санкт-Петербург

**Сигов Александр Сергеевич**, ректор Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета), академик РАН, г. Москва

**Турилов Валерий Александрович**, ген. директор ОАО «КНИИТМУ», к.т.н., доцент, г. Калуга

**Федоров Игорь Борисович**, президент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, академик РАН, г. Москва

**Чаплыгин Юрий Александрович**, ректор Московского государственного института электронной техники (ТУ МИЭТ), чл.-корр. РАН, г. Зеленоград

**Шахнович Илья Владимирович**, шеф-редактор РИЦ «Техносфера», г. Москва

**Шубарев Валерий Антонович**, ген. директор ОАО «Авангард», д.т.н., профессор, г. Санкт-Петербург



# МИР

## радиоэлектроники

А.С. Гилмор-мл.

Лампы с бегущей волной

Перевод с английского  
А.Г. Кудряшова

под редакцией  
д.э.н., проф., к.ф.-м.н.  
Н.А. Бушуева

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2013



*Издание осуществлено при поддержке  
ОАО «НПП «Алмаз»*

**УДК 621.385.6**

**ББК 32.851.1**

**Г47**

**Г47 Гилмор А.С.-мл.**

**Лампы с бегущей волной**

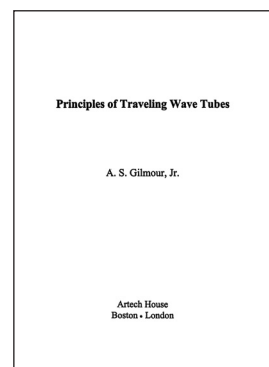
**Москва: Техносфера, 2013. – 616 с., ISBN 978-5-94836-359-2**

Книга основана на материалах лекций и семинаров по СВЧ-лампам, которые автор многократно проводил в ведущих фирмах и университетах США. В ней сосредоточены базовые знания по теории и технике наиболее востребованного в течение многих, в том числе последних, десятилетий прибора — лампы с бегущей волной (ЛБВ). Книга написана доступным для широкого круга читателей и образным языком, методически сбалансирована. Широко используемые цитаты из работ известных специалистов и обширная библиография способствуют более глубокому восприятию излагаемого материала.

Книга может быть полезна для подготовки как студентов старших курсов и аспирантов вузов, так и специалистов, занятых разработкой и применением ЛБВ в различных областях радиоэлектроники.

**УДК 621.385.6**

**ББК 32.851.1**



© 1994 ARTECH HOUSE, INC.

Перевод с английского:

All rights reserved.

© 2013, ЗАО «РИЦ «Техносфера», перевод на русский язык,  
оригинал-макет, оформление

**ISBN 978-5-94836-359-2**

**ISBN 0-89006-720-1 (англ.)**

# Содержание

Предисловие редактора перевода . . . . .	12
Предисловие . . . . .	13
<b>Глава 1. Введение . . . . .</b>	<b>14</b>
1.1. Ранняя история ЛБВ [1] . . . . .	14
1.2. Основные принципы работы ЛБВ . . . . .	18
1.3. Краткий обзор книги. . . . .	22
Литература. . . . .	23
<b>Глава 2. Статические поля, создаваемые электронами . . . . .</b>	<b>24</b>
2.1. Электрическое поле. . . . .	24
2.1.1. Уравнения Лапласа и Пуассона. . . . .	24
2.1.2. Закон Гаусса. . . . .	25
2.2. Магнитное поле . . . . .	27
<b>Глава 3. Движение электронов в статическом электрическом поле. . . . .</b>	<b>29</b>
3.1. Движение электронов параллельно электрическому полю. . . . .	29
3.2. Релятивистские поправки к скорости. . . . .	30
3.3. Движение электронов перпендикулярно постоянному электрическому полю . . . . .	33
3.4. Электронные линзы . . . . .	34
3.5. Универсальная кривая расширения пучка . . . . .	37
<b>Глава 4. Влияние магнитного поля на движение электронов . . . . .</b>	<b>44</b>
4.1. Движение электронов в статическом магнитном поле. . . . .	44
4.2. Движение электронов при совместном действии электрического и магнитного полей . . . . .	46
4.2.1. Взаимно перпендикулярные поля в декартовых координатах . . . . .	46
4.2.2. Аксиально-симметричные поля. . . . .	50
4.2.3. Теорема Буша. . . . .	52
<b>Глава 5. Катоды . . . . .</b>	<b>55</b>
5.1. Механизмы эмиссии . . . . .	57
5.1.1. Термоэмиссия [3, 4] . . . . .	57
5.1.2. Эффект Шоттки . . . . .	64
5.1.3. Полевая эмиссия . . . . .	68
5.1.4. Ограничение пространственным зарядом [6, 7] . . . . .	70

5.2. Эволюция термокатодов . . . . .	76
5.3. Работа импрегнированного пористого катода . . . . .	83
5.4. Срок службы . . . . .	88
5.5. Физика поверхности пористых катодов . . . . .	95
5.6. Подогреватели . . . . .	101
5.6.1. Устройство типичных подогревателей [25] . . . . .	101
5.6.2. Подогреватели с быстрым временем разогрева . . . . .	104
5.6.3. Проверка работы подогревателей . . . . .	106
5.6.4. Влияние магнитного поля нити накала . . . . .	107
Литература . . . . .	109
<b>Глава 6. Электронные пушки . . . . .</b>	<b>111</b>
6.1. Пушки Пирса . . . . .	111
6.1.1. Фокусирующие электроды для параллельного потока электронов . . . . .	112
6.1.2. Фокусирующие электроды для сходящегося потока электронов . . . . .	117
6.1.3. Расфокусирующее влияние анодного отверстия . . . . .	121
6.1.4. Определение минимального диаметра пучка . . . . .	127
6.1.5. Пример проектирования электронной пушки . . . . .	128
6.1.6. Сферическая абберация . . . . .	132
6.1.7. Влияние тепловых скоростей . . . . .	133
6.1.8. Эффекты неоднородной эмиссии и шероховатости катода . . . . .	139
6.2. Способы управления пучком . . . . .	140
6.2.1. Импульсная модуляция катода . . . . .	141
6.2.2. Управляющие фокусирующие электроды . . . . .	141
6.2.3. Модулирующий анод . . . . .	142
6.2.4. Сетки . . . . .	142
6.2.5. Краткий обзор характеристик электродов, предназначенных для управления пучком . . . . .	156
Литература . . . . .	156
<b>Глава 7. Электронные пучки . . . . .</b>	<b>158</b>
7.1. Краткий обзор фокусировки однородным магнитным полем. . . . .	159
7.1.1. Поток Бриллюэна . . . . .	161
7.1.2. Пульсации . . . . .	163
7.1.3. Магнитно-ограниченный поток . . . . .	166
7.2. Фокусировка однородным полем и ламинарный поток . . . . .	168
7.2.1. Уравнение пучка . . . . .	168
7.2.2. Поток Бриллюэна . . . . .	175
7.2.3. Магнитно-ограниченный поток . . . . .	181

7.3. Фокусировка однородным полем и неламинарный поток . . . .	187
7.4. Фокусировка периодической системой постоянных магнитов	190
7.4.1. Краткий обзор . . . . .	190
7.4.2. Ламинарный поток . . . . .	191
7.4.3. Неламинарный поток . . . . .	200
7.5. Ионные эффекты в электронных пучках [22] . . . . .	206
7.5.1. Поперечные колебания . . . . .	208
7.5.2. Радиальные колебания . . . . .	211
7.5.3. Низкочастотные неустойчивости . . . . .	214
Литература . . . . .	215
<b>Глава 8. Взаимодействие пучок—зазор.</b> . . . . .	<b>217</b>
8.1. Сеточные (плоские) зазоры . . . . .	217
8.1.1. Модуляция пучка . . . . .	217
8.1.2. Индукция тока . . . . .	221
8.2. Бессеточные зазоры [1] . . . . .	229
8.2.1. Модуляция пучка . . . . .	229
8.2.2. Индукция тока . . . . .	235
Литература . . . . .	235
<b>Глава 9. Группировка электронов</b> . . . . .	<b>236</b>
9.1. Баллистическая группировка . . . . .	236
9.2. Группировка при наличии сил пространственного заряда . . . .	241
9.2.1. Колебания электронной плазмы . . . . .	242
9.2.2. Качественный анализ волн пространственного заряда . .	246
9.2.3. Волны пространственного заряда в бесконечных пучках	248
9.2.4. Волны пространственного заряда в ограниченных	
пучках . . . . .	256
9.2.5. Волны пространственного заряда в бриллюэновском	
потоке . . . . .	261
9.3. Экспериментальная проверка. . . . .	266
Литература . . . . .	271
<b>Глава 10. Взаимодействие с бегущей волной.</b> . . . . .	<b>272</b>
10.1. Теория Пирса. . . . .	272
10.1.1. ВЧ-ток в пучке. . . . .	272
10.1.2. Уравнение линии . . . . .	273
10.1.3. Детерминантное уравнение. . . . .	275
10.1.4. Синхронное взаимодействие. . . . .	276
10.1.5. Несинхронное взаимодействие . . . . .	282
10.1.6. Влияние потерь в линии. . . . .	284
10.1.7. Влияние пространственного заряда. . . . .	286



10.2. Взаимодействие при большом сигнале . . . . .	292
10.2.1. Анализ процессов взаимодействия . . . . .	292
10.2.2. Оценки максимального КПД . . . . .	295
10.2.3. Компьютерное моделирование . . . . .	297
10.2.4. Изохронность (velocity tapering) . . . . .	298
Литература . . . . .	303
<b>Глава 11. Скорости волны и дисперсия . . . . .</b>	<b>304</b>
11.1. Групповая и фазовая скорости . . . . .	304
11.2. Дисперсия . . . . .	306
11.2.1. Коаксиальная линия передачи . . . . .	307
11.2.2. Прямоугольный волновод. . . . .	308
11.2.3. Периодически нагруженный волновод . . . . .	315
<b>Глава 12. Спиральные лампы с бегущей волной . . . . .</b>	<b>320</b>
12.1. Широкополосность спирали. . . . .	321
12.1.1. Дисперсия . . . . .	323
12.1.2. Управление дисперсией . . . . .	326
12.1.3. Колебания на обратной волне . . . . .	329
12.1.4. Подавление обратной волны. . . . .	330
12.2. Переходные участки. . . . .	332
12.3. Способы крепления спирали . . . . .	335
12.4. Поглотители и разрывы . . . . .	340
12.5. КПД системы [3] . . . . .	343
12.6. Двухрежимная работа. . . . .	348
12.7. Спиральные лампы с обратной волной (ЛОВ) . . . . .	349
12.8. ЛБВ с замедляющей системой кольцо—стержень. . . . .	351
Литература . . . . .	355
<b>Глава 13. ЛБВ на цепочке связанных резонаторов . . . . .</b>	<b>356</b>
13.1. Основные принципы работы. . . . .	357
13.2. $\omega - \beta$ -характеристики . . . . .	359
13.2.1. Волноводное приближение. . . . .	359
13.2.2. Подход Карноу—Гиттинса, основанный на методе эквивалентных схем. . . . .	363
13.2.3. Пример применения модели Карноу—Гиттинса . . . . .	366
13.3. Работа на основной обратной волне . . . . .	376
13.4. Работа на основной прямой волне . . . . .	384
13.5. Оконечные нагрузки и переходные участки. . . . .	388
Литература . . . . .	390

<b>Глава 14. Коллекторы с рекуперацией</b> . . . . .	391
14.1. Поток мощности . . . . .	391
14.2. Восстановление мощности при помощи коллектора с рекуперацией . . . . .	394
14.2.1. Распределение энергии электронов . . . . .	397
14.2.2. Мощность отработанного пучка . . . . .	401
14.2.3. Эффект тока корпуса лампы [2] . . . . .	403
14.3. Многоступенчатые коллекторы с рекуперацией . . . . .	403
14.4. Вторичные электроны в коллекторах с рекуперацией . . . . .	410
Литература . . . . .	413
<b>Глава 15. Шумы</b> . . . . .	414
15.1. Тепловой шум . . . . .	414
15.2. Коэффициент шума . . . . .	415
15.3. Обзор шумовых явлений в ЛБВ . . . . .	416
15.4. Шум в электронных пушках . . . . .	417
15.5. Генерация шумов на катоде . . . . .	419
15.5.1. Дробовой шум . . . . .	419
15.5.2. Скоростной шум . . . . .	420
15.5.3. Некоторые другие механизмы появления шумов . . . . .	420
15.6. Область минимума потенциала . . . . .	422
15.6.1. Инвариантность шума Рэка . . . . .	423
15.6.2. Уменьшение дробового шума . . . . .	424
15.6.3. Другие шумовые эффекты . . . . .	426
15.7. Область низкоскоростной корреляции . . . . .	427
15.8. Ускоряющая область с высоким напряжением . . . . .	430
15.8.1. Шумовые волны пространственного заряда . . . . .	430
15.8.2. Преобразование сопротивления в малошумящих лампах . . . . .	434
15.8.3. Линзовые эффекты . . . . .	436
15.9. Шумовые явления в высокочастотной секции лампы . . . . .	438
15.9.1. Потери в линии . . . . .	438
15.9.2. Шум токораспределения . . . . .	438
15.9.3. Вторичные электроны . . . . .	439
15.9.4. Усиление шума . . . . .	440
15.9.5. Подавление шумов магнитным полем . . . . .	441
15.10. Другие источники шумов . . . . .	442
15.11. Минимальный коэффициент шума ЛБВ . . . . .	443
Литература . . . . .	445

<b>Глава 16. Нелинейности и искажения [1]. . . . .</b>	<b>447</b>
16.1. Искажения, связанные с эффектами насыщения . . . . .	447
16.1.1. АМ-АМ-преобразование . . . . .	447
16.1.2. АМ-ФМ-преобразование . . . . .	449
16.1.3. Генерация гармоник. . . . .	450
16.1.4. Интермодуляционные искажения . . . . .	451
16.2. Изменение параметров ЛБВ при изменении частоты . . . . .	453
16.2.1. Широкополосные изменения усиления . . . . .	453
16.2.2. Узкополосные изменения усиления . . . . .	454
16.2.3. Фазовые нелинейности или искажения времени задержки . . . . .	455
16.3. Паразитная амплитудная и фазовая модуляция выходного сигнала. . . . .	456
Литература . . . . .	457
<b>Глава 17. Пробои в ЛБВ и защита от них . . . . .</b>	<b>458</b>
17.1. Усиление поля . . . . .	460
17.2. Пробой постоянного тока в газе [1—3] . . . . .	466
17.3. ВЧ-пробой в газе [2]. . . . .	473
17.4. Пробой постоянного тока в вакууме [5]. . . . .	485
17.5. ВЧ-пробой в вакууме . . . . .	495
17.6. Пробои в изоляторах . . . . .	496
Литература . . . . .	500
<b>Глава 18. Надежность . . . . .</b>	<b>502</b>
18.1. Срок службы и наработка на отказ . . . . .	502
18.2. Расчет МТBF, основанный на экспериментах с образцами . . . . .	505
18.3. Расчеты МТBF, основанные на MIL-HDBK-217F . . . . .	509
18.4. Недостатки MIL-HDBK-217F [9] . . . . .	513
18.5. Улучшение моделей . . . . .	517
18.6. Факторы надежности при конструировании и производстве ЛБВ. . . . .	519
18.6.1. Улучшенные катоды. . . . .	522
18.6.2. Улучшенные магниты. . . . .	523
18.6.3. Использование газопоглотителей . . . . .	523
18.6.4. Улучшение испытательного оборудования и методик тестирования . . . . .	523
18.6.5. Отбраковочные климатические испытания . . . . .	524
18.6.6. Прочность конструкции и использование функций потерь Тагути . . . . .	525
18.6.7. Системное управление качеством . . . . .	528

18.7. Факторы, влияющие на надежность ЛБВ в различных системах . . . . .	528
18.8. Срок годности . . . . .	530
18.9. Влияние закупок на надежность . . . . .	531
Литература . . . . .	533
<b>Приложение А. Полезные константы и преобразования.</b> . . . . .	534
Константы. . . . .	534
Преобразования. . . . .	534
<b>Приложение Б. Словарь терминов.</b> . . . . .	535
<b>Приложение В. Вакуумные технологии</b> . . . . .	550
В.1. Единицы измерения . . . . .	550
В.2. Рабочие диапазоны . . . . .	551
В.3. Вакуумные насосы . . . . .	553
В.3.1. Пластинчато-роторные насосы. . . . .	553
В.3.2. Диффузионный насос . . . . .	554
В.3.3. Турбомолекулярный насос . . . . .	557
В.3.4. Адсорбционный насос . . . . .	558
В.3.5. Ионный насос . . . . .	559
В.3.6. Газопоглотители (геттеры) . . . . .	563
В.4. Вакуумметры (вакуумные манометры) . . . . .	566
В.4.1. Термопарный вакуумметр . . . . .	566
В.4.2. Ионизационный вакуумметр . . . . .	566
В.5. Материалы, применяемые в микроволновых лампах. . . . .	567
В.6. Технологии производства . . . . .	573
В.7. Вакуумные течи [1, 5] . . . . .	578
В.7.1. Реальные течи . . . . .	578
В.7.2. Виртуальные течи . . . . .	580
Литература . . . . .	581
<b>Приложение Г. Магниты</b> . . . . .	582
Г.1. Параметры магнитного поля . . . . .	582
Г.2. Электромагниты . . . . .	583
Г.3. Ферромагнитные материалы . . . . .	587
Г.4. Постоянные магниты [2] . . . . .	591
Г.5. Магнитная периодическая фокусирующая система. . . . .	595
Литература . . . . .	598
Предметный указатель . . . . .	599
The Artech House Radar Library . . . . .	614

## Предисловие редактора перевода

Предлагаемая читателю книга А. Гилмора «Лампы с бегущей волной», несмотря на почтенный возраст (написана в 1994 г.), не потеряла своей значимости, прежде всего потому, что в ней сосредоточены базовые знания по теории и технике прибора, наиболее востребованного в течение многих, в том числе и последних, десятилетий, — лампы с бегущей волной. Они могут служить тем фундаментом, на базе которого может быть построена как подготовка студентов старших курсов и аспирантов вузов, так и специалистов, занятых разработкой и применением ЛБВ в различных областях радиоэлектроники. Книга написана доступным для широкого круга читателей и образным языком, методически сбалансирована, содержит подробную историю развития теории и техники ЛБВ и отвечает их современному уровню. Широко используемые цитаты из работ известных специалистов и обширная библиография способствуют более глубокому восприятию излагаемого материала.

*Генеральный директор ОАО «НПП «Алмаз»,  
д.э.н., профессор, к.ф.-м.н.  
Н.А. Бушув*

## Предисловие

Книга основана на материалах курсов лекций и семинаров по лампам с бегущей волной и СВЧ-лампам, которые я многократно предоставлял таким организациям, как Navy, Air Force, Army, Nasa, Varian Associates, Hughes Electron Dynamics Division, Teledyne Electronic Technologies, Northrop Defense, System Division, Texas Instruments, the French Ministry of Defense, университет в Лос-Анджелесе, Калифорния, университет в Буффало и в других городах. По этим материалам обучалось около 2000 студентов, начиная с третьего курса Navy electronic, при участии в преподавании экспертов по лампе с бегущей волной и заканчивая специалистами самого высокого научного уровня. Я в долгу перед многими участниками этого процесса, внесшими существенный вклад и ценные рекомендации в материалы курсов и этой книги.

В книге уделено внимание в равной степени теоретическим и экспериментальным материалам, и она будет полезна как начинающим свое знакомство с лампами с бегущей волной (ЛБВ), так и опытным инженерам и техническим специалистам. Каждая глава основана на выводах предыдущих глав, поэтому новичкам стоит начать изучение книги с самого начала. Для тех, кто уже имеет опыт работы с ЛБВ, большинство глав может быть использовано безотносительно к другим. Для тех, кто заинтересован в дальнейшем изучении и в исследовательской работе, приведены ссылки на книги и статьи более чем 200 авторов, датирующиеся годами начиная с изобретения ЛБВ и заканчивая настоящим временем.

Некоторые люди внесли особо значимый вклад в эту книгу. Это Eugene (Joe) Dutkowski из the Crane Division of the Naval Surface Warfare Center; Joe Christensen, James Hansen и Dr. Ivo Tammaru из the Hughes Electron Dynamics Division; David Zavidil, Phil Lally и Robert Dipple из Teledyne Electronic Technologies; Edward Jones и Bruce Dudley из Rome Laboratory; Dr. Richard True из Litton Electron Devices Division; George Miram из Varian Associates и Dr. Stanley Kaisel. И, наконец, я хотел бы поблагодарить жену за ее терпение и понимание на протяжении долгих ночей и выходных, потребовавшихся для написания и подготовки рукописи этой книги.

# ГЛАВА I

## ВВЕДЕНИЕ

**Лампа с бегущей волной (ЛБВ)** — один из двух основных типов СВЧ-приборов (второй — клистрон), известных как лампы с линейным пучком или лампы О-типа. Хотя было придумано много различных схем построения ЛБВ, две из них наиболее распространены:

- 1) спиральная, для широкополосных применений,
- 2) на цепочке связанных резонаторов, для применений на больших мощностях.

Другие схемы построения также упоминаются в данной книге, но наибольшее внимание уделяется именно спиральным ЛБВ и ЛБВ на цепочке связанных резонаторов.

Лампы с бегущей волной используются на частотах от 1 до 100 ГГц. Диапазон мощностей простирается от ватт до мегаватт. Ширина полосы частот спиральных ЛБВ может достигать двух октав и более. Полоса частот ЛБВ на цепочке связанных резонаторов обычно составляет 10—20%.

Более 50% объема продаж всех СВЧ-ламп принадлежат ЛБВ. Применения ЛБВ разнообразны. Они служат оконечным усилителем почти во всех спутниках связи. Во многих радиолокационных системах одна или большее количество ЛБВ используются в качестве усилителя высокой мощности, который создает зондирующий ВЧ-импульс. С другой стороны, ЛБВ может быть использована в качестве предоконечного усилителя в таком ВЧ-усилителе высокой мощности, как усилитель со скрещенными полями.

Наиболее широко ЛБВ используются в системах радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Принцип работы таких систем состоит в перехвате вражеского сигнала и передаче обратно ложного сигнала, усиленного на одной или нескольких ЛБВ.

### I.1. Ранняя история ЛБВ [1]

Возможность взаимодействия между электронным пучком и ВЧ-системой была обнаружена Гаевым [2, 3] в 1933 году. В патентах этого года Гаев описал лампы с отклонением электронного пучка, которые могут быть использованы в качестве детекторов или осциллографов и содержат в себе некоторые черты

спиральных ЛБВ. В устройствах Гаева ВЧ-сигнал, распространяющийся в спиральной структуре, был использован для отклонения полого электронного пучка. Скорость электронного пучка равнялась скорости распространения бегущей волны по спиральной структуре. Гаев не предположил, что при этом может произойти усиление волны.

В 1935 г. Постумус [4] впервые описал и сконструировал магнетронный генератор резонаторного типа. Он описал его работу как результат взаимодействия электронов с тангенциальной компонентой бегущей волны, вращающейся со скоростью, равной средней скорости электронов. В результате взаимодействия энергия электронов преобразуется в усиление ВЧ-волны.

В мае 1940 г. Линденблад [5] впервые описал спиральные усилители бегущей волны, которые были подобны спиральной лампе с бегущей волной. Он первым указал, что синхронное взаимодействие между электронным потоком и ВЧ-волной в спирали может создавать усиление сигнала. В образце лампы, описанной в патенте и схематически изображенной на рис. 1.1, Линденблад получил усиление сигнала в полосе частот более 30 МГц при несущей частоте 390 МГц.

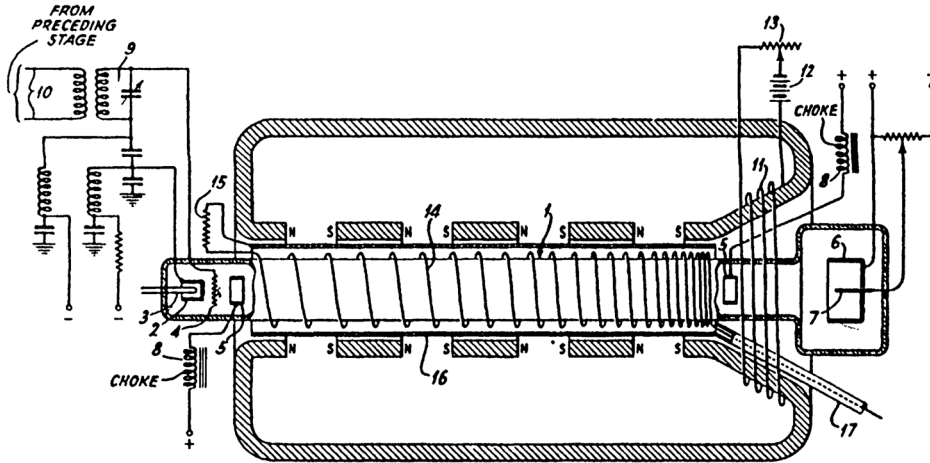


Рис. 1.1. Усилитель бегущей волны Линденблада; патент зарегистрирован в мае 1940 г.

Первая лампа Линденблада была, очевидно, модифицированной версией лампы Гаева с индуктивным выводом (которая в 1982 году стала называться клистродом). Линденблад удлинил стеклянную вакуумную оболочку лампы Гаева и заменил объемный резонатор спиралью. Спираль была навита на внешнюю сторону стеклянной оболочки с шагом, при котором аксиальная компонента скорости волны равнялась скорости электронного пучка внутри оболочки. Интересно отметить, что Линденблад определил изменение шага спирали, необходимое для поддержания синхронизма с электронным пучком,



скорость которого уменьшается из-за преобразования его энергии в усиление волны.

Кроме того, в своем патенте Линденблад описал использование спирального волновода для замедления волны. Он также утверждал, что спиральный проводник может быть размещен внутри оболочки лампы, окружая электронный пучок.

Компфнер [6—10], работавший в Англии, по-видимому, ничего не знал о более ранней работе Линденблада. Он сообщил, что в 1942 году (через 2 года после регистрации патента Линденблада) пришел к выводу, что основной принцип работы магнетрона можно использовать для усиления ВЧ-сигналов. Его целью было разработать усилитель, способный по уровню чувствительности и шумов соответствовать лучшим приемникам на кристаллах того времени. На рис. 1.2 изображен первый набросок лампы с бегущей волной, выполненный Компфнером.

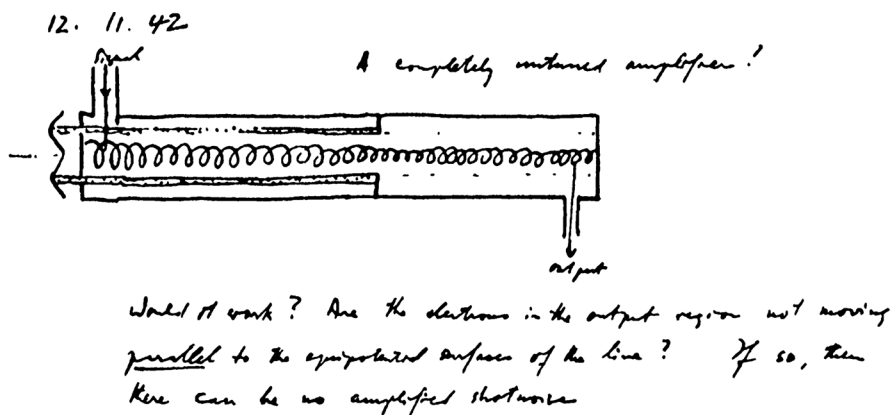


Рис. 1.2. Набросок лампы с бегущей волной из записей Компфнера. Из *The Invention of the Traveling Wave Tube* by R. Kompfner, copyright 1963 by San Francisco Press

Компфнер создал первую лампу с бегущей волной уже в 1943 году. Он описал работу лампы следующим образом:

«Когда я сравнил энергию, полученную из спирали с включенным электронным пучком, с энергией, полученной без пучка, оказалось, что при ускоряющем напряжении пучка в 2400 В наблюдалось увеличение сигнала на 49%, а при ускоряющем напряжении пучка в 2200 В — падение сигнала на 40%.»

После проведения всевозможных измерений и экспериментов Компфнер сконструировал и опробовал лампу, изображенную на рис. 1.3. При токе электронного пучка 110 мкА и напряжении 1830 В было достигнуто увеличение мощности в 6 раз на частоте 3,3 ГГц. Коэффициент шума составил 14 дБ

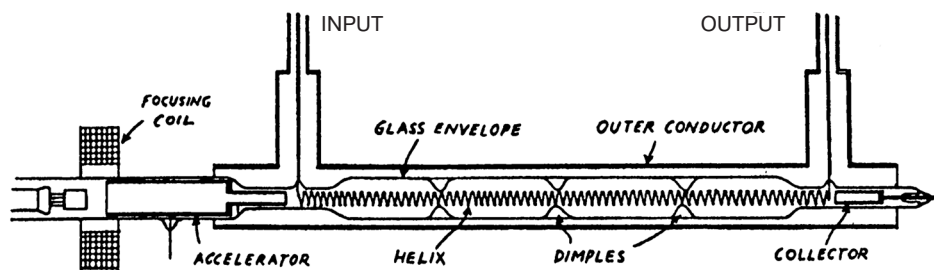


Рис. 1.3. Экспериментальный усилитель Компфнера на спирали. Из Rudolf Kompfner, *Proc. IRE*, February 1947. © 1947 IRE (now IEEE)

и зависел от доли тока, приходящей на коллектор. Дальнейшее улучшение конструкции лампы позволило достичь увеличения усиления мощности до 14 раз и уменьшения коэффициента шума до 11 дБ. К 1944 году Компфнер разработал первые теории по усилению мощности и коэффициенту шума. Важным результатом стало то, что волна нарастает экспоненциально с расстоянием вдоль линии передачи.

Первое публичное заявление о британской работе военного времени над лампой с бегущей волной было сделано на конференции в Йельском университете 27 и 28 июля 1946 года. На этой же конференции была представлена работа, выполненная в США Дж.Р. Пирсом и Л.М. Филдом. Позднее [11] они описали спиральную лампу с бегущей волной, подобную изображенной на рис. 1.4 (рисунок взят из патента Пирса 2602148 [12]). Одной из уникальных особенностей прибора, описанного Пирсом, было использование продольных изолирующих стержней для поддержания и точного размещения спирали. Другой особенностью было использование системы соленоидов, создающих постоянное магнитное поле для фокусировки электронного пучка. Пирс также описал методы введения потерь для подавления обратных бегущих волн и колебаний. В патенте Филда [13] описано подавление колебаний путем использования тонких слоев коллоидного графита, нанесенных на керамические поддерживающие спираль стержни. В средней части спирали проводимость слоя была увеличена

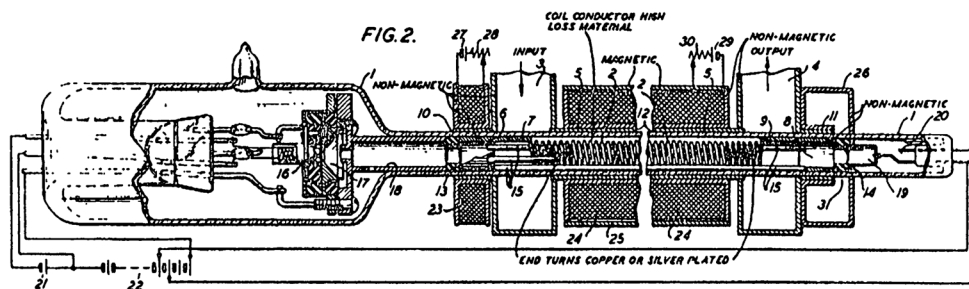


Рис. 1.4. Спиральный усилитель, представленный Пирсом в патенте 2 602 148 США

для обеспечения надлежащего рассеяния отраженной энергии при минимальном уменьшении усиления прямой нарастающей волны.

В послевоенные годы (1946—1950) началась деятельность по развитию адекватных теорий, описывающих работу ЛБВ. Кроме теоретической работы Пирса [14] заслуживают внимания работы Бланк-Лапира и Лапостолля [15, 16], выполненные во Франции в декабре 1946 года, в которых проведен анализ работы ЛБВ на цепочке связанных резонаторов с выровненными щелями.

Этот краткий обзор ранней истории ЛБВ следует закончить упоминанием публикации Пирсом книги «*Traveling wave tubes*» в 1950 г. [17]. Она обобщила и упорядочила теорию лампы с бегущей волной и с тех пор всегда использовалась как информационный справочник по теории этого прибора.

## 1.2. Основные принципы работы ЛБВ

Существует два основных типа ЛБВ. Спиральная ЛБВ, основные элементы которой изображены на рис. 1.5, является относительно маломощным (обычно от десятков до сотен ватт) широкополосным (возможен охват более двух октав) прибором. Мощность ЛБВ на цепочке связанных резонаторов достигает мегаватт, однако ширина полосы частот ограничена величиной примерно 10—20%. По существу электронная пушка, электронный пучок и коллектор одни и те же для всех ЛБВ. И, хотя имеются значительные различия в конструкции волноведущих структур, принципы работы одни и те же. Здесь обсудим работу спиральной ЛБВ.

Для анализа поведения ВЧ-волны в спиральной ЛБВ полезно вначале рассмотреть однопроводную линию передачи над заземленной плоскостью,

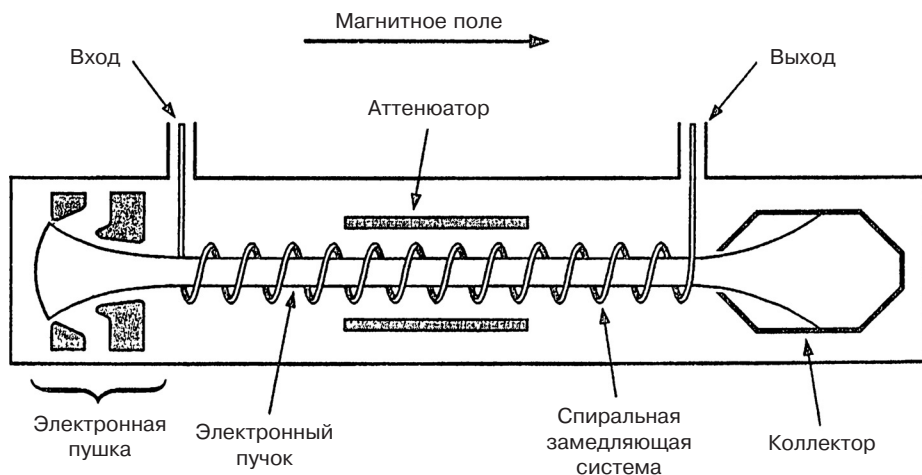


Рис. 1.5. Спиральная ЛБВ

изображенную на рис. 1.6. Заряды в линии передачи и силовые линии электрического поля в фиксированный момент времени представлены на рис. 1.6. Линии магнитного поля не изображены и далее не будут рассматриваться, так как магнитные силы, действующие на электронный пучок в лампе, несоизмеримо малы по сравнению с силами электрического поля. Если на рис. 1.6 источник находится на левом конце линии передачи, а согласованная нагрузка — на правом, то заряды и линии поля будут со временем двигаться вправо с постоянной амплитудой. Скорость распространения равна скорости света и не зависит от частоты, так как в линии передачи полностью отсутствует дисперсия.

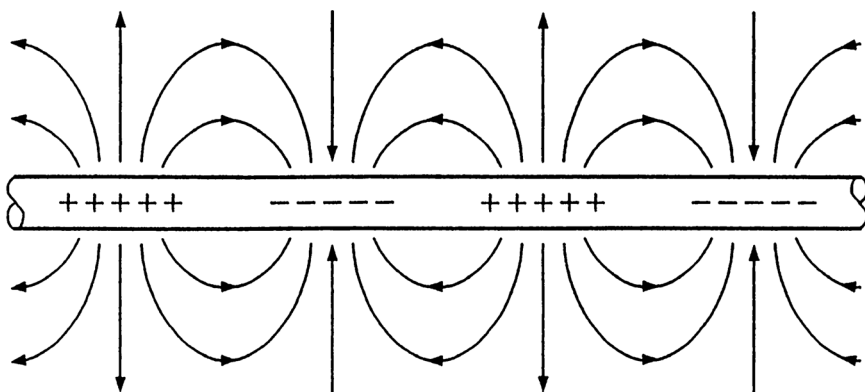


Рис. 1.6. ВЧ-заряд и силовые линии электрического поля в однопроводной линии передачи

Теперь предположим, что однопроводная линия передачи скручивается в спираль, как показано на рис. 1.7. Сигнал, поступивший на левый конец спирали, будет двигаться со скоростью, близкой к скорости света, по спиральному проводнику. Средняя скорость движения в аксиальном направлении будет меньше скорости движения по проводнику в соответствии с шагом спирали. Полярность сигнала будет меняться на противоположную на каждой половине длины волны вдоль спирального проводника. На рис. 1.7 два полных витка соответствуют каждой половине длины волны.

Линии электрического поля переходят из областей положительного заряда в области отрицательного заряда подобно тому, как показано для передающей линии на рис. 1.6. Кроме уменьшенной скорости, существует еще одно важное различие между картинами полей в спирали и в однопроводной линии передачи, которое состоит в наличии электрического поля со значительной аксиальной компонентой внутри спирали.

Когда электронный пучок направляется вдоль оси спирали, аксиальная компонента электрического поля ускоряет одни электроны и замедляет другие. Согласно рис. 1.7 на электроны будет действовать сила по направлению к обла-

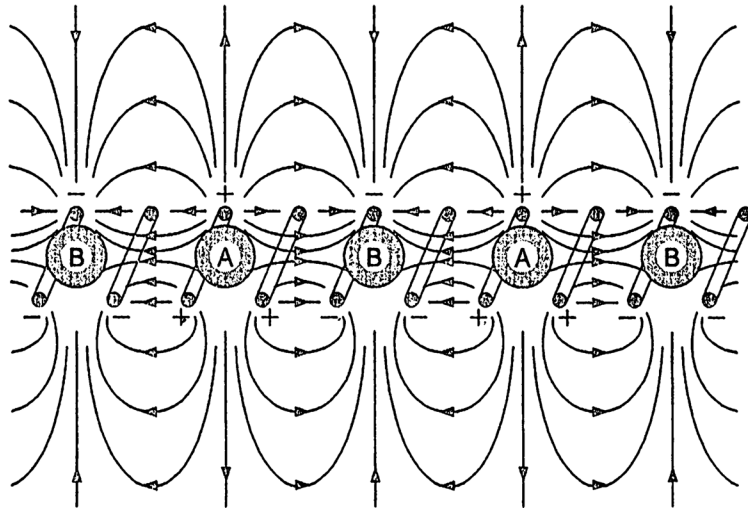


Рис. 1.7. ВЧ-заряд и силовые линии электрического поля в спирали

стям, обозначенным буквой А, и по направлению от областей, обозначенных буквой В. Распределение поля будет меняться синусоидально в аксиальном направлении, как показано на рис. 1.8. Если аксиальная скорость электрического поля совпадает со скоростью электронного пучка, то электроны будут испытывать действие постоянной силы по направлению к области А, в то время как пучок будет перемещаться по спирали. В результате, в области А начнет образовываться электронный сгусток (как показано на рис. 1.8а).

Поля, создаваемые сгустками электронов в пучке, будут заставлять электроны в спирали двигаться из области в окрестности точки А в сторону области В. Это приведет к двум изменениям поля в спирали:

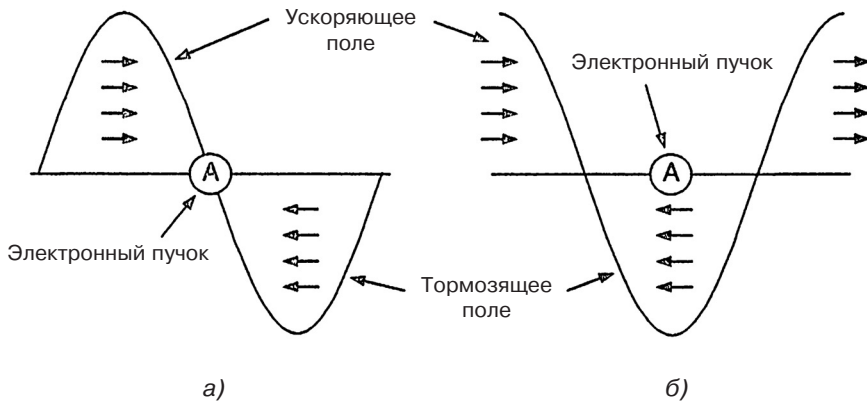


Рис. 1.8. Аксиальное поле, которое группирует электроны и извлекает энергию из пучка: а — на входе пучка в систему; б — после того, как возникло взаимодействие

1. Поток электронов, движущийся влево от области А, соответствует, конечно, обычному току, текущему вправо. Этот ток, в свою очередь, создает область положительного напряжения на спирали слева от А. Аналогично поток, движущийся вправо от области А, создает отрицательное напряжение справа от А. В результате форма волны наведенного напряжения сдвинута по фазе влево на  $90^\circ$  относительно начального напряжения.
2. По мере того как происходит взаимодействие пучка с волной, форма волны изменяется одновременно с ростом ее амплитуды.

В то время как форма волны напряжения сдвигается влево, зоны тормозящего поля передвигаются в места расположения сгустков электронов (рис. 1.8б). Энергия, которую теряют заторможенные электроны, переходит в поле линии, обеспечивая таким образом усиление этого поля. Взаимодействие между пучком и замедляющей системой приводит к экспоненциальному росту напряжения ВЧ-поля в линии (рис. 1.9).

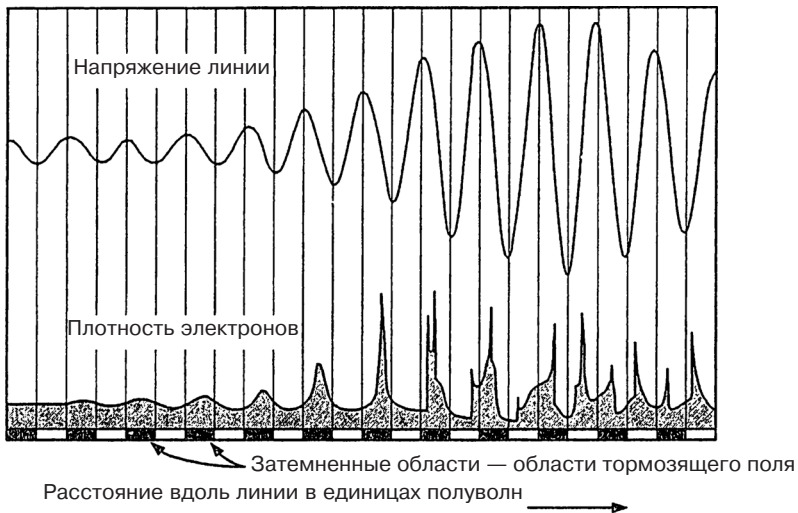


Рис. 1.9. Напряжение и плотность заряда в ЛБВ. Адаптировано из P.Hess, *Ph.D. Dissertation*, University of California at Berkeley, 1960

В процессе взаимодействия скорости электронов уменьшаются, а кулоновские силы пространственного заряда внутри электронных сгустков растут. В результате часть каждого сгустка тормозится по фазе настолько, что она переходит из зоны тормозящего поля в зону ускоряющего поля (см. кривые плотности электронов на рис. 1.9, внизу справа). Электроны, попавшие

в зону ускоряющего поля, начинают отбирать энергию у системы. В конечном счете энергия, отдаваемая системой, оказывается равной энергии, получаемой ею, и волна в системе перестает расти. В этот момент происходит так называемое насыщение. Для получения максимального усиления сигнал должен быть выведен из системы именно в этот момент.

### 1.3. Краткий обзор книги

При выборе материала для книги (и кратких курсов, на которых книга основана) была сделана попытка обсудить в ней по крайней мере основные технологии, необходимые для понимания принципов работы ламп с бегущей волной. Книга создавалась таким образом, чтобы читатель мог разобраться в работе ЛБВ, последовательно изучая книгу.

Поэтому после обзора динамики электронов обсуждаются источник электронов (катод) и узлы, обеспечивающие формирование электронного пучка (электронная пушка и фокусирующие устройства). Далее анализируется поведение электронного пучка, подвергшегося воздействию локализованного электрического ВЧ-поля. Затем следует анализ взаимодействия пучка с электрическим ВЧ-полем. Возможно, самый важный результат этого анализа — это значительное влияние относительных скоростей электронного пучка и ВЧ-поля бегущей волны на усиление. Это непосредственно ведет к общей дискуссии и к анализу изменения скорости с частотой (дисперсии) в замедляющих системах ЛБВ. Понимая важность дисперсионных характеристик, можно более подробно анализировать спиральные ЛБВ и ЛБВ на цепочке связанных резонаторов.

Остальная часть книги посвящена вопросам, не относящимся к процессам усиления в ЛБВ, но, тем не менее, важным для полного понимания работы прибора. Например, в некоторых современных ЛБВ используются сложные коллекторы, которые повышают КПД, но не влияют непосредственно на процесс взаимодействия пучка с системой. Коэффициенты шума, нелинейности и искажения важны в большинстве применений ЛБВ. Иногда причиной отказа оказывается ухудшение вакуума в лампе или сказываются некоторые другие факторы, поэтому в книге рассматриваются средства защиты от них. Наконец, с момента изобретения ЛБВ надежность является важным фактором. В главе, посвященной надежности прибора, изучаются различные виды отказов во всевозможных сферах его применения. В результате улучшений в технологии изготовления, а также умений потребителей и применения ими защитных средств надежность ЛБВ значительно повысилась и продолжает повышаться.