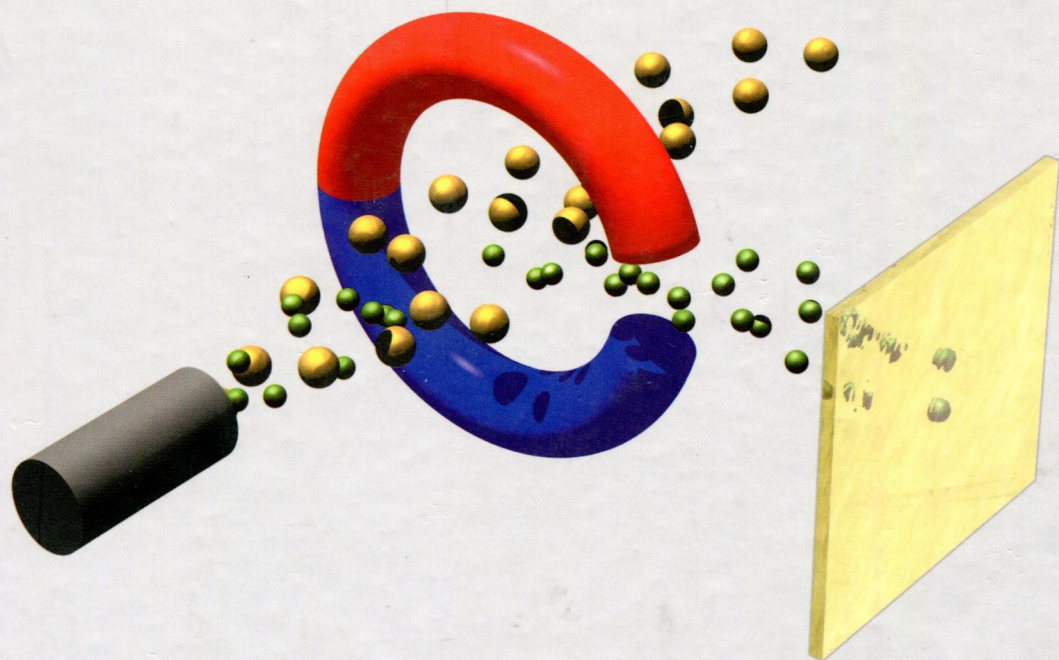


А. Д. СУШКОВ

ВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ



А. Д. СУШКОВ

ВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ

Учебное пособие

*Рекомендовано УМО по образованию в области
радиотехники, электроники, биомедицинской техники
и автоматизации для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлениям подготовки бакалавров,
магистров и дипломированных специалистов
«Электроника и микроэлектроника»*



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ · МОСКВА · КРАСНОДАР
2018

ББК 32.85
С 89

Сушков А. Д.

С 89 Вакуумная электроника: Физико-технические основы: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2018. — 464 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 5-8114-0530-8

В пособии изложены физико-технические основы вакуумной электроники, составляющие ее научный базис и определяющие с единых позиций принципы действия вакуумных электронных приборов и устройств различного назначения. Книга является учебным пособием для студентов высших учебных заведений, обучающихся по электронным специальностям, закрепленным за направлением подготовки дипломированных специалистов, бакалавров и магистров «Электроника и микροэлектроника».

Книга может быть также полезна инженерно-техническим работникам, специализирующимся в области исследования, проектирования и конструирования современных приборов и устройств вакуумной электроники.

ББК 32.85

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

д. т. н. проф. О. П. GERMAHOBIЧ,
д. т. н. проф. Г. Г. СОМИНСКИЙ

Оформление обложки:

С. ШАПИРО, А. ЛАПШИН

*Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона будут
преследоваться в судебном порядке.*

© А. Д. Сушков, 2018
© Издательство «Лань», 2018
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5

Глава первая

ВАКУУМНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА, ИХ ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ	12
1.1. Основные группы электронных приборов и устройств	12
1.2. Принципы действия электронных ламп и ламповых усилителей	13
1.3. Принципы действия электронно-лучевых, фотоэлектронных и рентгеновских приборов	23
1.4. Принцип действия электронно-лучевой сварочной установки	28
1.5. Систематизация физических процессов и обобщение принципов действия электронных приборов и устройств	29

Глава вторая

ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ. КАТОДЫ	36
2.1. Виды эмиссий заряженных частиц	36
2.2. Энергия электронов в твердом теле	37
2.3. Поверхностный потенциальный барьер и работа выхода электронов	41
2.4. Контактная разность потенциалов	45
2.5. Термоэлектронная эмиссия	47
2.6. Термоэлектронные катоды	56
2.7. Автоэлектронная и взрывная электронная эмиссии	71
2.8. Фотоэлектронная эмиссия	76
2.9. Вторичная электронная эмиссия	86

Глава третья

ОТБОР КАТОДНОГО ТОКА. ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ	95
3.1. Источники полей в вакуумных электронных приборах	95
3.2. Отбор катодного тока в диоде с термокатодом	96
3.3. Закон степени трех вторых для диода	100
3.4. Законы отбора катодного тока в диоде, учитывающие начальные скорости термоэлектронов	108
3.5. Отбор катодного тока в триодных и многоэлектродных системах	112
3.6. Отбор катодного тока в триоде с диафрагмой	130
3.7. Распределение катодного тока в триодных и многоэлектродных системах	133
3.8. Влияние пространственного заряда на токораспределение в электронных системах	139
3.9. Динаatronный эффект и способы его подавления	146
3.10. Электронный поток и его физические модели	149

Глава четвертая

ФОРМИРОВАНИЕ НЕИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЖЕКТОРЫ	154
4.1. Оптико-механическая аналогия	154
4.2. Аксиально-симметричные электрические и магнитные поля	160
4.3. Уравнения движения параксиальных электронов	165

4.4. Методы расчета траекторий электронов	169
4.5. Аксиально-симметричные электронные линзы	172
4.6. Цилиндрические и квадрупольные электронные линзы	197
4.7. Движение электронов в скрещенных однородных электрических и магнитных полях	202
4.8. Типы электронных прожекторов	205

Глава пятая

ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУШКИ	214
5.1. Интенсивные электронные пучки	214
5.2. Начальное формирование ленточных электронных пучков	216
5.3. Начальное формирование сплошных аксиально-симметричных электронных пучков	220
5.4. Начальное формирование полых (трубчатых) аксиально-симметричных электронных пучков	226
5.5. Формирование электронных пучков в скрещенных электрических и магнитных полях	228
5.6. Электронные пушки с управляющими электродами	233
5.7. Собственные поля электронных пучков	239
5.8. Движение интенсивных электронных пучков в свободном пространстве	244
5.9. Потенциал пространства, занятого электронным пучком	251
5.10. Влияние положительных ионов на распространение электронных пучков	252

Глава шестая

СИСТЕМЫ ОГРАНИЧЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

6.1. Проблема ограничения поперечных размеров электронных пучков	256
6.2. Системы однородного продольного магнитного поля	257
6.3. Однородная магнитная система поперечного ограничения аксиально-симметричного электронного пучка	260
6.4. Однородная магнитная система поперечного ограничения ленточного электронного пучка	269
6.5. Однородная магнитная система поперечного ограничения полого (трубчатого) электронного пучка	272
6.6. Устройство систем, создающих однородное магнитное поле	275
6.7. Ограничение поперечных размеров электронных пучков периодическими магнитными полями	276
6.8. Электростатические системы поперечного ограничения сплошных, аксиально-симметричных электронных пучков	282
6.9. Электростатические системы поперечного ограничения полых аксиально-симметричных электронных пучков	291
6.10. Электростатические системы поперечного ограничения ленточных электронных пучков	294

Глава седьмая

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПОТОКАМИ. УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА	296
7.1. Способы управления электронными потоками	296
7.2. Способы получения переменного конвекционного тока	299
7.3. Характеристики и параметры управления электронным потоком	301
7.4. Квазиэлектростатический способ управления плотностью катодного тока	302
7.5. Режимы управления катодным током	306
7.6. Квазиэлектростатический способ управления токопрохождением	310
7.7. Каскадный квазиэлектростатический способ управления	311
7.8. Управление плотностью катодного тока высокочастотным электрическим полем	312
7.9. Движение электронов в пространстве высокочастотного взаимодействия	317
7.10. Квазистатические способы модуляции направления движения электронного пучка	321

7.11. Скоростная модуляция электронного пучка и его группирование в дрейфовом пространстве. Клистронное управляющее устройство	326
7.12. Каскадный клистронный способ управления электронным пучком	343
7.13. Скоростная модуляция и группирование электронов в продольном поле бегущей волны	347
7.14. Скоростная модуляция и группирование электронов в поле бегущей волны при наличии постоянных скрещенных полей	354

Глава восьмая

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В ЭНЕРГИЮ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА.	
ПРЕОБРАЗУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА	360
8.1. Способы преобразования энергии электронного потока	360
8.2. Энергетический эффект взаимодействия электронного потока с переменным электрическим полем.	361
8.3. Наведенные заряды и токи во внешней цепи преобразующего устройства	364
8.4. Наведенные токи в триодных системах	368
8.5. Полный ток в цепи преобразующего устройства	370
8.6. Преобразование энергии модулированного электронного потока в устройстве с колебательным контуром	371
8.7. Преобразование энергии модулированного электронного потока в устройстве с замедляющей системой	376
8.8. Преобразование энергии модулированного электронного пучка в устройстве со скрещенными полями	384
8.9. Рекуперация энергии электронного пучка	387

Глава десятая

ОБЩЕННЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ПРИНЦИПАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ. МИКРОВОЛНОВЫЕ ПРИБОРЫ	393
9.1. Основные положения обобщенного подхода	393
9.2. Построение принципиальных конструкций каскадных управляющих устройств	395
9.3. Построение принципиальных конструкций микроволновых приборов с линейным электронным пучком (типа О)	397
9.4. Микроволновые приборы с квазиэлектростатическим управлением плотностью электронного пучка	400
9.5. Клистроны	406
9.6. Лампы бегущей волны типа О	414
9.7. Многорезонаторный магнетрон	423
9.8. Микроволновые усилители М-типа	435
9.9. Гиротроны	438
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	447
Колебательные системы электронных приборов и устройств	447
Резонансный контур с сосредоточенными постоянными	447
Объемный (полюй) резонатор	448
Замедляющие системы	450
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	455
Частотные диапазоны в современной радиоэлектронике	455
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	455
Основные физические константы	455
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	456
ЛИТЕРАТУРА	458