

С. Г. БЛАНТЕР

**РАДИОТЕХНИКА
И
ЭЛЕКТРОНИКА**

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

С. Г. БЛАНТЕР

РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1960 ЛЕНИНГРАД

В книге изложены теоретические основы работы электронных, ионных и других электровакуумных приборов, а также полупроводниковых приборов и описаны физические явления в них.

Рассмотрены электронные усилители и генераторы, выпрямительные и стабилизирующие устройства, вопросы радиосвязи и радиоизмерений.

Соломон Григорьевич Блантер

РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Редактор С. Ф. Корндорф

Техн. редактор Н. И. Борунов

Сдано в набор 23/II 1960 г.

Подписано к печати 18/V 1960 г.

Т-05376 Бумага 84×108^{1/32}

21,32 печ. л.

Уч.-изд. л. 23,5

Тираж 27 000 экз.

Цена 12 р. 75 к.

Зак. 2105

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга написана в качестве учебного пособия для вузов по курсу «Радиотехника и электроника», читаемому студентам специальности «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых».

Она соответствует программе этого курса.

Необходимость дать весь материал, предусмотренный программой, в ограниченном объеме книги определила достаточно сжатое изложение.

При описании основных приборов наряду с рассмотрением их рабочих свойств и областей применения уделялось внимание изложению сущности физических явлений, лежащих в основе их работы.

Гл. 3 написана автором совместно с К. П. Жадиным, гл. 7 написана Л. Р. Цвангом.

Автор

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	7
Глава первая. Электровакуумные приборы	10
1-1. Принцип действия электронных ламп	10
1-2. Виды электронной эмиссии	12
1-3. Основные конструктивные элементы ламп	14
1-4. Двухэлектродные лампы	21
1-5. Трехэлектродные лампы	26
1-6. Четырехэлектродные лампы	37
1-7. Пятиэлектродные лампы	40
1-8. Лучевой тетрод	45
1-9. Комбинированные лампы	47
1-10. Электронный индикатор	47
1-11. Электрометрические лампы	49
1-12. Собственные шумы ламп	51
1-13. Работа электронных ламп на сверхвысоких частотах	53
1-14. Электронно-лучевые трубки	54
1-15. Маркировка и технические данные приемно-усилительных ламп и электронно-лучевых трубок	59
1-16. Общая характеристика процессов в ионных приборах	62
1-17. Тиратроны	66
1-18. Приборы тлеющего разряда	73
1-19. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом	75
1-20. Бареттеры	81
Глава вторая. Полупроводниковые приборы	82
2-1. Электропроводность полупроводников	82
2-2. Свойства <i>p-n</i> -перехода	88
2-3. Селеновые и меднозакисные вентили	91
2-4. Германиевые и кремниевые диоды	96
2-5. Германиевые триоды	101
Глава третья. Электронные усилители	114
3-1. Принцип действия усилителя	114
3-2. Классификация электронных усилителей	116
3-3. Важнейшие характеристики усилителей	117
3-4. Классы усиления	123
3-5. Входное сопротивление усилительной лампы	125
3-6. Методы получения отрицательного напряжения смещения для управляющей сетки лампы	128
3-7. Ламповые усилители на сопротивлениях	129

3-8. Трансформаторные усилители напряжения	139
3-9. Усилители напряжения на полупроводниковых триодах	144
3-10. Обратная связь в усилителях	146
3-11. Коррекция частотных характеристик	154
3-12. Ламповые усилители постоянного напряжения	156
3-13. Избирательные усилители напряжения	161
3-14. Аперiodические усилители мощности	168
Глава четвертая. Электронные генераторы	181
4-1. Генераторы гармонических колебаний типа <i>LC</i>	181
4-2. Самовозбуждение генераторов типа <i>LC</i>	192
4-3. Стабилизация частоты	199
4-4. Преобразование частоты	206
4-5. Генераторы низкой частоты на биениях	213
4-6. Генераторы гармонических колебаний типа <i>RC</i>	214
4-7. Камертонный генератор	219
4-8. Формирование импульсов	221
4-9. Мульти vibratorы	225
4-10. Блокинг-генераторы	234
4-11. Генераторы пилообразного напряжения	237
Глава пятая. Выпрямительные и стабилизирующие устройства	242
5-1. Принцип действия выпрямительного устройства	242
5-2. Однополупериодные выпрямители	243
5-3. Двухполупериодные выпрямители	248
5-4. Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения	251
5-5. Выпрямители с умножением напряжения	255
5-6. Назначение стабилизирующих устройств	257
5-7. Стабилизаторы постоянного напряжения	258
5-8. Стабилизаторы тока	266
Глава шестая. Радиосвязь	269
6-1. Основные положения	269
6-2. Структурная схема радиопередатчика	272
6-3. Амплитудная модуляция	274
6-4. Понятие о частотной и фазовой модуляции	286
6-5. Манипуляция	289
6-6. Излучение электромагнитной энергии	292
6-7. Распределение электромагнитной энергии	299
6-8. Распределение напряжения и тока вдоль антенны, настройка ее	307
6-9. Влияние неравномерного распределения тока вдоль антенны и влияние земли на мощность излучения	314
6-10. Заземление и противовес	316
6-11. Обратимость передающих и приемных антенн	317
6-12. Некоторые типы антенн	318
6-13. Классификация и основные показатели радиоприемников	325
6-14. Входное устройство и усиление колебаний высокой частоты	327
6-15. Детектирование	331
6-16. Преобразование частоты и усиление колебаний промежуточной частоты в супергетеродинных приемниках	344
6-17. Усиление колебаний низкой частоты и оконечные устройства приемников	347

6-18. Автоматическая регулировка усиления	351
6-19. Радиопомехи	354
6-20. Приемник типа „Огонек“ и приемно-передающие радиостанции типа У	358
Глава седьмая. Радиотехнические измерения	364
7-1. Измерения напряжений и токов звуковых и радиочастот	364
7-2. Измерение частоты	376
7-3. Измерение параметров цепей с сосредоточенными постоянными	382
7-4. Электронный осциллограф	390
7-5. Измерительные генераторы	399
7-6. Некоторые специальные измерения	401
Литература	408
Алфавитный указатель	409

ВВЕДЕНИЕ

Радиотехникой называют науку, посвященную использованию электромагнитных колебаний для передачи сообщений, определения местоположения объектов, управления на расстоянии, осуществляемых без проводов при помощи излучаемых электромагнитных волн.

Радиотехника возникла как средство связи, но в процессе развития области ее применения неизмеримо расширились. Основоположителем радиотехники является А. С. Попов, продемонстрировавший 7 мая 1895 г. первый в мире приемник электромагнитных волн.

В радиотехнике приходится иметь дело со следующими основными проблемами:

- а) генерацией токов высокой частоты и управлением этими токами;
- б) излучением электромагнитной энергии;
- в) распространением электромагнитной энергии;
- г) приемом электромагнитных волн;
- д) усилением электрических колебаний;
- е) выделением передаваемых сигналов.

Высокочастотные электромагнитные колебания, используемые в радиотехнике, лежат в диапазоне 10^4 — 10^{11} гц, называемом обычно диапазоном радиочастот.

В табл. 0-1 приведены данные о радиочастотах и соответствующих этим частотам длинах волн.

Современные радиотехнические устройства, связанные с генерацией и усилением колебаний, управлением этими колебаниями и их преобразованием, основываются на применении электроники.

Электроника занимается вопросами создания и практического применения устройств, содержащих в качестве основных элементов электронные, ионные и полупроводниковые приборы, действующие на основе электриче-

ских явлений в вакууме, разреженных газах и полупроводниках. Электроника, зародившаяся и получившая первоначальное развитие как отрасль радиотехники, в настоящее время приобрела самостоятельное значение.

Одновременно с электроникой, подчиненной задачам радиотехники и определившей ее гигантские успехи, большое развитие получила так называемая промышленная электроника, на базе которой строятся многочисленные системы автоматического управления и измерения, а также системы преобразования тока.

Радиотехника и электроника широко применяются во многих отраслях науки и техники. Электронные приборы универсальны и практически безынерционны. С их помощью легко решаются задачи дистанционного и автоматического управления, дистанционного измерения и контроля.

Появление в последние годы полупроводниковых приборов, заменяющих электронные выпрямительные и усилительные лампы и имеющих в десятки раз меньшие габариты и вес, открывает новые богатые перспективы в развитии электроники.

В качестве одного из примеров применения электроники можно указать на создание быстродействующих счетных машин, работающих с высокой степенью точности. Каждая из них заменяет сотни вычислителей. Такие машины выполняют десятки тысяч математических операций в секунду.

Радиотехнике и электронике обязаны своим возникновением новые области науки: радиофизика, радиоастрономия, радиометеорология и др.

Таблица 0-1

Частота, гц	Длина волны, м	Название волн	Примечание
$\leq 10^5$ $10^5 - 15 \cdot 10^5$ $15 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^7$	≥ 3000 $3000 - 200$ $200 - 10$	Длинные Средние Короткие	Из этого поддиапазона выделяют волны 60—200 м, называемые промежуточными
$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$ $3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$ $3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$ $3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$	10—1 1—0,1 0,1—0,01 0,01—0,001	Метровые Дециметровые Сантиметровые Миллиметровые	Ультракороткие волны

Радиотехника и электроника сыграли решающую роль в создании искусственных спутников Земли, космических ракет, управляемых межпланетных станций.

В геофизических методах поисков и разведки полезных ископаемых радиотехника и электроника занимают очень важное место. Основными методами геофизических исследований являются: сейсморазведка, электроразведка, радиометрия, магниторазведка, гравиметрия. В работе полевых сейсморазведочных станций большую роль играют электронные усилители. В этих станциях применяются электронные генераторы, выпрямители.

В настоящее время ставится задача создания аппаратуры с использованием электронных счетно-решающих устройств, которая должна обеспечить получение результатов разведки в виде готовых данных о геологическом разрезе. Разрабатываются методы записи сейсмических колебаний на магнитную пленку с последующим многократным воспроизведением ее. С помощью фотоэлементов и электронных схем начинают проводить гармонический анализ кривых, представляющих собой запись колебаний почвы. В сейсморазведке используются приемно-передающие радиостанции для местной связи, а также для передачи по радио на сейсмостанцию отметок времени взрыва.

В полевых станциях электроразведки находят широкое применение электронные потенциметрические измерительные схемы, выпрямительные устройства, электронные осциллографы, электронные реле и другие устройства.

Исследование скважин при помощи измерения интенсивности радиации γ -фотонов целиком построено на применении электронной аппаратуры. Разнообразные электронные устройства, в том числе схемы для усиления и измерения весьма малых токов (электрометрические схемы), находят применение при поисках и разведке залежей радиоактивных элементов и пр.

Методы радиоволнового просвечивания в геофизической разведке строятся на использовании средств, аналогичных средствам радиосвязи: радиопередающих и радиоприемных устройств, исследовании распространения радиоволн в разных средах.

Приведенные здесь примеры, конечно, не исчерпывают всего арсенала средств радиотехники и электроники, поставленного на службу геофизическим исследованиям для поисков и разведки полезных ископаемых.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

1-1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП

Электрические приборы, действие которых основывается на электрических явлениях в пространстве, отделенном от окружающей среды и эвакуированном либо заполненном после удаления воздуха газом, называются электровакуумными приборами.

Различают две основные разновидности электровакуумных приборов:

а) электронные приборы, в которых электрический ток, протекающий через вакуум, создается только перемещением электронов;

б) ионные (газоразрядные) приборы, в которых электрический ток, протекающий в газовой среде, создается перемещением как электронов, так и ионов.

К электровакуумным приборам относят также приборы, в которых ток протекает по металлическим проводникам, находящимся в эвакуированном баллоне или баллоне, наполненном газом, например обычные осветительные лампы накаливания.

Самую обширную группу электронных приборов составляют электронные лампы. Наиболее простой электронной лампой является двухэлектродная (рис. 1-1,а), состоящая из эвакуированного баллона 1 с введенными в него двумя электродами.

Для того чтобы через лампу мог протекать ток, в вакуум должны вводиться свободные заряженные частицы. Это достигается благодаря электронной эмиссии (испусканию электронов) с поверхности металла одного из электродов. Электрод 2, испускающий электроны, называют катодом лампы. Для обеспечения эмиссии катод на-

гревают до высокой температуры, пропуская через него электрический ток от вспомогательного источника, например батареи накала *БН* (рис. 1-1,б).

Другим электродом лампы является анод 3, получающий по отношению к катоду положительный потенциал от внешнего источника электрического напряжения *БА*. На анод в результате действия возникающего между ним и катодом электрического поля направляются электроны, движущиеся в этом поле.

В баллоне электронной лампы поддерживается высокий вакуум (давление не превышает 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст.). В результате этого длина свободного пробега электрона, т. е. среднее расстояние, пробегаемое им от одного столкновения с молекулами газа до другого, в 10^3 — 10^4 раз больше расстояния между электродами лампы. Поэтому электроны движутся, почти не сталкиваясь с молекулами газа,

и ионизация газа практически отсутствует. Внутри лампы электроны движутся от катода к аноду, и в соответствии с техническим направлением электрического тока следует считать, что через лампу протекает ток i_a от анода к катоду (рис. 1-1,б).

При отрицательном потенциале анода относительно катода электрическое поле в лампе направляет электроны, вылетевшие из катода, обратно к катоду, и поэтому ток через лампу не протекает.

Одностороннюю проводимость лампы, т. е. способность лампы пропускать ток только в одном направлении, называют вентильным действием, а лампу — электронным вентилем.

Более сложные лампы, кроме катода и анода, содержат еще дополнительные электроды, позволяющие управлять величиной анодного тока.

Определим время, необходимое для пробега электронного расстояния между электродами лампы. При этом сделаем два допущения:

а) Поле между электродами лампы считаем равномерным.

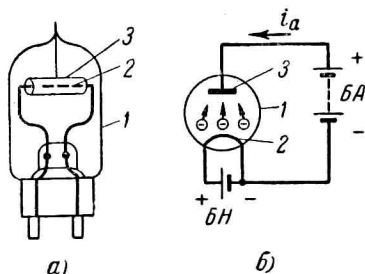


Рис. 1-1. Двухэлектродная лампа.

а — схема устройства; б — схема включения.

б) Начальную скорость электронов при выходе их из катода считаем равной нулю.

По мере приближения к аноду скорость электрона и его кинетическая энергия увеличиваются. Они определяются работой сил поля, затраченной на перемещение электрона от катода в рассматриваемую точку.

Обозначим через:

u_x — разность потенциалов между катодом и рассматриваемой точкой, *в*;

e — заряд электрона, *к*;

m_e — массу электрона, *кг*;

v — скорость электрона в рассматриваемой точке, *км/сек*.

Равенство работы, совершенной силами поля, и кинетической энергии, полученной электроном, записывается в виде

$$eu_x = \frac{m_e v^2}{2}, \quad (1-1)$$

откуда

$$v = \sqrt{2 \frac{e}{m_e} u_x}.$$

После подстановки $\frac{e}{m_e} = 1,77 \cdot 10^{11}$ *к/кг* получим

$$v \approx 600 \sqrt{u_x}. \quad (1-2)$$

Часто энергию электрона выражают условно в электронвольтах, учитывая связь между v и u_x , выраженную формулой (1-2).

При напряжении между электродами лампы, равном, например, 150 *в*, скорость электрона вблизи анода составит около 7 000 *км/сек*. Время пробега электроном расстояния между анодом и катодом (1—2 *см*) можно оценить величиной порядка 10^{-8} — 10^{-9} *сек*. Это позволяет во многих случаях считать электронную лампу безынерционным прибором. В дальнейшем будут указаны случаи, в которых необходимо учитывать время пролета электронов.

1-2. ВИДЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Как известно, молекулы металлических проводников образуют кристаллическую решетку, в узлах которой расположены ионы, а между узлами непрерывно перемещаются валентные электроны. При температуре абсолютного

Нуля электроны внутри металла обладают кинетической энергией, наибольшие значения которой W_i составляют в зависимости от рода металла величины 2—10 эв. С повышением температуры некоторое количество электронов получает энергию, большую W_i . Чем больше превышение энергии электрона над W_i , тем меньше число электронов, обладающих такой энергией. Без больших погрешностей можно наибольшую кинетическую энергию электронов в металлах при температурах порядка 20°С считать равной W_i .

Электроны, перемещающиеся свободно внутри металла, за редкими исключениями не в состоянии выйти за его пределы без подведения извне дополнительной энергии. Выходу электронов за пределы металла препятствуют: а) наличие двойного электрического слоя на его поверхности; б) появляющиеся при выходе электронов из металла силы притяжения, обусловленные положительными зарядами внутри металла.

Двойной электрический слой появляется в результате того, что электронные оболочки атомов поверхностного слоя металлов, выступая за пределы металла, и положительные заряды этого слоя, находясь внутри металла, создают электрическое поле, силы которого противодействуют выходу электронов из металла.

Положительный заряд внутри металла возникает в результате уноса отрицательных зарядов выходящими из металла электронами, что эквивалентно появлению в металле положительных зарядов.

На рис. 1-2 представлена кривая, характеризующая рост потенциальной энергии W электрона при выходе его из металла. Соответственно росту потенциальной энергии электрона убывает его кинетическая энергия. Потенциал точки, находящейся на расстоянии x от поверхности металла, определяется делением соответствующей ей энергии W на заряд электрона e .

Значение x_1 соответствует толщине двойного электрического слоя, в пределах которого потенциальная энергия

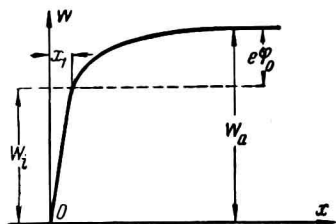


Рис. 1-2. Изменение потенциальной энергии электрона при выходе его из металла.

электрона быстро возрастает. За пределами этого слоя изменение потенциала замедляется и обусловлено только преодолением электроном действия сил положительного заряда металла. При выходе из металла электрон совершает работу W_a .

Энергия $e\phi_0$, которая должна быть подведена к электрону извне для того, чтобы он мог преодолеть противодействующие силы и покинуть пределы металла, называется работой выхода:

$$e\phi_0 = W_a - W_i, \quad (1-3)$$

а соответствующая ей разность потенциалов — потенциальным барьером:

$$\phi_0 = \frac{W_a - W_i}{e}. \quad (1-4)$$

Для чистого вольфрама работа выхода составляет 4,54, тантала — 4,07, цезия — 1,81 эв.

В зависимости от способа сообщения электронам добавочной энергии, необходимой для их выхода за пределы металла, различают следующие виды электронной эмиссии:

а) термоэлектронную или тепловую эмиссию, при которой дополнительная энергия сообщается электронам в результате нагрева катода;

б) вторичную эмиссию, при которой поверхность металла бомбардируется внешними электронами или ионами, отдающими свою энергию электронам металла;

в) фотоэлектронную эмиссию, при которой поверхность металла облучается светом и проникающие в металл кванты лучистой энергии повышают энергию электронов;

г) холодную или автоэлектронную эмиссию, при которой сильное электрическое поле у поверхности катода создает силы, способствующие выходу электронов за пределы металла.

В электронных лампах используется термоэлектронная эмиссия.

1-3. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЛАМП

В зависимости от способа нагрева катода электрическим током различают катоды прямого накала и катоды косвенного накала (подогревные).

Катод прямого накала представляет собой нить из тугоплавкого металла, нагреваемую непосредственно проходящим по ней током накала. В простейших лампах

с цилиндрическим анодом нить натягивается между двумя металлическими держателями, через которые к ней подводится ток. При плоском аноде и необходимости иметь нить большой длины ее подвешивают в виде нескольких зигзагов на спиральных пружинках, устраняющих провисание от нагрева (рис. 1-3,а).

При нагреве нити переменным током мгновенное значение количества тепла, выделяемого в ней, изменяется вслед за изменением мгновенного значения тока. В результате этого температура тонкой нити, обладающей малой тепловой инерцией, колеблется, что вызывает недопустимые колебания электронной эмиссии. Это явление практически не сказывается на работе мощных ламп с толстой нитью, обладающей большой тепловой инерцией.

У катодов прямого накала протекание тока накала создает изменение потенциала по длине катода, особенно заметное при больших напряжениях накала. Это изменение потенциала влияет на движение электронов в лампе.

Катод косвенного накала лишен указанных недостатков. В нем ток накала проходит по проволочному элементу, который служит лишь для подогрева катода. На рис. 1-3,б показана конструкция одного из современных катодов косвенного накала. Спираль 1 из тугоплавкой проволоки (вольфрамовой), изолированная алундом (окислами алюминия), помещена в виде петли внутри никелевого цилиндра, покрытого снаружи тонким слоем металла 2, с поверхности которого происходит эмиссия электронов. Подогреватель и поверхностный металлический слой, изолированные друг от друга, имеют отдельные выводы для подключения к внешним цепям. При такой конструкции катода все точки его поверхности имеют одинаковый электрический потенциал. Ввиду значительной тепловой инерции катода работа лампы с таким катодом начинается лишь через некоторое время после включения цепи ее накала, необходимое для прогрева катода.

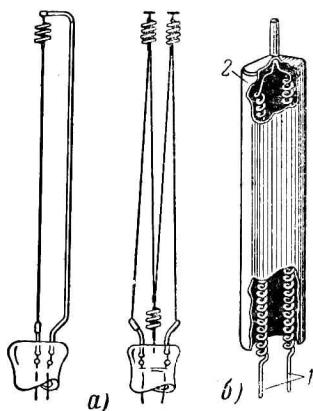


Рис. 1-3. Конструкции катодов.

а — прямого канала; б — косвенного канала.

Экономичность катода оценивается по величине его эффективности H , под которой понимают отношение тока эмиссии i_e к величине мощности, затрачиваемой на нагрев катода P_n :

$$H = \frac{i_e}{P_n}. \quad (1-5)$$

Обычно эффективность катодов выражают в *ма/вт*.

Эффективность катода растет с увеличением его температуры. Однако увеличение рабочей температуры катода вызывает сокращение его срока службы. Сроком службы катода называют время, в течение которого ток эмиссии уменьшается на 20% по отношению к его номинальному значению.

Покрытием одного металла мономолекулярным слоем другого металла, имеющего положительный контактный потенциал относительно первого, можно значительно снизить работу выхода электронов. Например, покрытие чистого вольфрама одноатомным слоем бария снижает работу выхода с 4,52 до 1,44 эв.

Катоды такого типа называют активированными, металлическое покрытие — активным слоем, а основной металл — подкладкой. Активированные катоды обладают большей эффективностью, чем монометаллические.

Наиболее часто в приемно-усилительных лампах используют следующие виды катодов: а) вольфрамовые; б) оксидные и в) бариевые.

Вольфрамовые катоды используются в лампах средней и малой мощности. Они обычно являются катодами прямого накала и конструктивно выполняются в виде нити, которой придается форма петли или зигзага. Преимуществами вольфрамовых катодов являются постоянство эмиссии при изменении рабочих условий, способность противостоять бомбардировке положительных ионов, которые всегда хотя бы в небольшом количестве присутствуют в лампах. Последнее обстоятельство весьма важно при высоких напряжениях между анодом и катодом. Поэтому вольфрамовые катоды применяются в лампах с анодным напряжением выше 3 500 в.

Рабочая температура вольфрамовых катодов 2 300° С, срок службы — более 1 000 ч, эффективность 2—10 *ма/вт* (самая низкая по сравнению с эффективностью других катодов).