

渔业电子技术丛书



颜兆鹏 编

海洋出版社

无线电基础

渔业电子技术丛书

无线电基础

颜兆鹏 编

海洋出版社

1991年·北京

内 容 简 介

本书是“渔业电子技术丛书”之一，系统介绍了电子管、晶体管等主要电子器件和各种基本电子线路的基础知识。本书通俗易懂，实用性极强，书末附录中给出的电子管、晶体管场效应管等的结构图、电路符号及特性表为电路设计和仪器修维人员提供了必要的资料。

本书适于从事电子电路的技术人员阅读，特别适合于作为中专的教材及自学参考书。

责任编辑 陈泽卿

责任校对 刘兴昌

无 线 电 基 础

颜 兆 鹏 编

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街 1 号）

新华书店北京发行所发行 北京海淀吴海印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：30.875 字数：600 千字 插页：1

1991 年 4 月第一版 1991 年 4 月第一次印刷

印数：1—2300

ISBN 7-5027-0847-2/TN·9

定价：20.00 元

前 言

为了尽快提高广大渔业电信技术人员的理论水平和使用维修电子设备的实际技能，使之适应渔业生产发展和实现渔业科学管理的要求，我们组织水产系统的有关院校、科研单位、企业及行政管理部門的部分教师和工程技术人员编写了《渔业电子技术丛书》，拟作为水产系统培训中等电子技术专业人员的教材，并作为对从事通信、助渔、导航等技术人员进行技术考试和考核的统一参考资料。

众所周知，近代电子技术不仅在工业、农业、科学技术和国防方面获得了广泛应用，而且已深入到水产业的许多领域，并有日益发展的趋势。电子技术的发展及其在水产业各个领域的广泛应用，已成为水产业技术发展和科学管理的重要标志。为了加快水产系统科学技术发展的进程，普及电子技术是十分重要的。

电子技术包含的内容十分广泛，该丛书根据水产系统应用电子技术的现状，结合发展应用新技术的重点编写，力求实用。该丛书由《电工基础》、《无线电基础》、《无线电收发信原理》、《单边带通信原理》、《天线与电波传播》、《电源》、《无线电通信设备维修》、《助渔仪器及其维修技术》、《无线电导航仪器》等九个分册组成。

该丛书主要针对具有中等文化程度的电子技术人员，力求内容系统全面，且理论联系实际，以提高理论水平和使用维修电子设备的实际技能为目的，而着重叙述电路的基本工作原理、物理概念和基本计算方法，并在此基础上介绍电子设备的测试、使用和维修的方法。为了学好这套教材，读者应具有初中以上程度的物理、数学和电工原理知识，在系统学习基础部分后，根据自己所从事的工作，选学有关的各个分册。在学习过程中，希望读者尽可能将学到的理论与实际结合起来，学以致用。

我们组织编写这套丛书是初步尝试，由于该丛书涉及面广，加上经验不足，时间仓促，不当之处难免，欢迎读者提出指正。

该丛书在编写过程中，得到了上海交通大学、福建省电子研究所、福建省广播电视厅、上海海运局、上海无线电二厂，以及水产系统有关同志的大力支持。在此，我们对所有为该丛书出版付出辛勤劳动的同志一并致以谢意。

农牧渔业部渔政渔港监督管理局

一九八六年一月 北京

目 录

第一篇 电子管部分

第一章 电子管	(3)
第一节 概述	(3)
一、电子管的定义	(3)
二、电子管的种类	(3)
三、电子管的用途	(3)
第二节 二极管	(3)
一、二极管的诞生过程	(3)
二、二极管的构造与基本特性	(4)
第三节 三极管	(6)
一、三极管的构造及符号	(6)
二、栅极的作用	(7)
三、三极管的线路联接	(7)
四、三极管的静特性曲线	(7)
五、三极管的参数	(8)
六、三极管的应用	(11)
第四节 四极管	(11)
一、三极管的主要缺点和四极管的构造	(11)
二、帘栅旁路电容器的作用和四极管的线路联接	(12)
三、四极管的缺点	(12)
第五节 五极管	(13)
一、五极管的构造和符号	(13)
二、五极管的特性曲线和参数	(13)
三、锐截止式和遥截止式电子管	(14)
四、束射四极管	(15)
五、复合管	(16)
第六节 特种用途电子管	(16)
一、气体的电离与离子管(充气管)	(16)
二、冷阴极充气管	(17)
三、热阴极充气管(汞气整流管)	(18)
四、调谐指示管(猫眼管)	(18)
第七节 电子管的应用	(19)
一、怎样正确使用电子管	(19)
二、电子管管脚排列	(22)
三、常用国产电真空器件型号命名方法	(22)

第二章 电子管低频放大器	(26)
第一节 基本概念	(26)
第二节 电子管低频电压放大器的基本原理	(26)
一、简单的电压放大器和基本工作原理	(26)
二、工作过程	(27)
第三节 放大器的基本分析方法	(29)
一、放大器的图解分析法	(29)
二、放大器的等效电路分析法	(35)
三、两种分析方法的比较	(38)
第四节 放大器的分类和主要性能指标	(39)
一、放大器的分类	(39)
二、放大器的主要性能指标	(40)
第五节 栅偏压的作用和栅偏压电路	(46)
一、栅偏压的作用	(46)
二、栅偏压电路	(47)
第六节 放大器的输入阻抗和输出阻抗	(48)
一、放大器的输入阻抗	(48)
二、放大器的输出阻抗	(50)
第七节 低频电压放大器	(51)
一、阻容耦合放大器	(51)
二、变压器耦合电压放大器	(63)
第八节 低频功率放大器	(67)
一、单边功率放大器	(67)
二、推挽功率放大器	(72)
第九节 低频放大器中的反馈	(78)
一、反馈的基本原理	(78)
二、负反馈对放大器性能的改善	(80)
三、负反馈对放大器输入阻抗及输出阻抗的影响	(83)
四、阴极输出器	(84)
五、寄生反馈及其抑制方法	(87)
第三章 电子管高频放大器	(91)
第一节 电子管高频电压放大器	(91)
一、直接耦合高频放大器	(91)
二、变压器耦合高频放大器	(94)
三、自耦变压器耦合高频放大器	(97)
四、调谐放大器的最大稳定增益	(99)
第二节 电子管高频功率放大器	(102)
一、高频功率放大器的基本工作原理	(102)
二、高频功率放大器余弦脉冲电流的分析与通角 θ 的选择	(107)
三、高频功率放大器最佳工作状态的选择与负载特性	(114)
四、高频功率放大器的馈电与调谐	(121)

第四章 电子管振荡器	(131)
第一节 振荡器的工作原理	(131)
一、振荡的产生和维持	(131)
二、振荡的振幅	(137)
三、稳频原理	(143)
第二节 振荡器电路介绍和分析	(145)
一、回路振荡器	(145)
二、石英晶体振荡器	(151)
三、音频振荡器	(157)
四、负阻振荡器	(161)
第三节 频率合成技术	(164)
一、直接合成法	(165)
二、锁相环路法	(166)

第二篇 晶体管部分

第五章 半导体基础知识和晶体二极管	(175)
第一节 半导体基础	(175)
一、半导体的电导率	(175)
二、半导体的内部结构	(176)
三、半导体的本征激发和载流子	(177)
四、N 型半导体和P型半导体	(178)
第二节 PN 结和晶体二极管	(179)
一、PN 结的形成——扩散运动和漂移运动.....	(180)
二、PN 结的单向导电特性.....	(181)
三、PN 结电容.....	(182)
四、二极管的特性曲线和参数.....	(182)
五、二极管的分类和测试方法.....	(184)
第六章 晶体三极管	(186)
第一节 晶体三极管的基本结构	(186)
第二节 晶体三极管的电源联接和导电情况	(186)
第三节 晶体三极管的电流分配和放大作用	(188)
第四节 晶体三极管的参数	(188)
第五节 晶体三极管的特性曲线	(190)
一、输入特性曲线.....	(190)
二、输出特性曲线.....	(191)
第六节 晶体三极管的粗测	(192)
一、晶体管的识别.....	(192)
二、三极管的简易测试.....	(194)
第七节 场效应管	(198)
一、场效应管的基本导电规律.....	(198)
二、结型场效应管的特性及其放大作用.....	(199)

三、绝缘栅场效应管	(203)
四、场效应管的主要参数和使用注意事项	(205)
五、场效应管和晶体管的比较	(208)
第八节 晶体管、场效应管应用须知	(209)
一、晶体管应用须知	(209)
二、场效应管应用须知	(210)
第七章 晶体管低频放大器	(212)
第一节 单管低频小信号放大器	(212)
一、基本工作原理	(212)
二、放大倍数的计算	(213)
三、放大器的三种基本电路	(217)
四、放大电路供电	(220)
五、负载线与工作点	(221)
六、偏置电路	(223)
第二节 多级放大器	(229)
一、耦合与匹配	(229)
二、阻容耦合放大器	(230)
三、变压器耦合放大器	(232)
第三节 低频功率放大器	(233)
一、单管甲类功率放大器	(235)
二、乙类推挽功率放大器	(237)
三、正确处理功率放大器的几个关系	(239)
四、功率放大器的调整	(240)
第四节 无输出变压器和互补推挽功率放大器	(242)
一、无输出变压器的推挽功率放大器	(242)
二、互补推挽功率放大电路	(244)
三、复合互补电路	(246)
第五节 放大器中的负反馈	(247)
一、负反馈的基本概念	(247)
二、反馈方式	(248)
三、常用负反馈放大电路举例	(249)
四、关于负反馈电路中的一些其他问题	(253)
第六节 场效应管放大器	(253)
一、静态工作点	(254)
二、场效应管的微变等效电路	(256)
三、放大倍数和输入、输出电阻	(256)
四、源极输出器	(258)
第八章 直流放大器	(261)
第一节 直接耦合放大器	(261)
第二节 差动放大器	(262)
一、差动放大器的工作原理	(262)
二、几种差动放大电路	(263)

三、差动放大器的估算与调试	(264)
第九章 晶体三极管的网络参数和等效电路	(266)
第一节 四端网络的概念	(266)
第二节 h 参数 (混杂参数) 及其等效电路	(267)
一、 h 参数的定义及其物理意义	(267)
二、 h 参数的等效电路	(271)
第三节 h 参数各种接法的转换	(273)
一、从共基极 h 参数转换为共发射极 h 参数	(273)
二、从共发射极 h 参数转换为共集电极 h 参数	(276)
第四节 Z 参数 (开路阻抗参数)	(279)
第五节 Y 参数 (短路导纳参数)	(280)
第十章 晶体管高频放大器	(282)
第一节 晶体管的高频特性	(282)
一、电流放大系数与频率的关系	(282)
二、频率特性参数	(283)
第二节 晶体管高频等效电路	(285)
一、形式等效电路	(285)
二、混合 Π 型等效电路	(287)
三、混合 π 参数与 Y 参数的互换	(290)
第三节 利用 Y 参数分析放大器的基本方法	(292)
一、输入导纳 Y_i	(292)
二、输出导纳 Y_o	(293)
三、电压增益 K_u	(293)
第四节 并联谐振回路的主要参数	(294)
一、谐振频率和谐振导纳	(294)
二、品质因数	(295)
三、通频带	(295)
第五节 单管单调谐高频放大器	(297)
一、等效电路	(297)
二、增益与匹配	(298)
三、选择性	(300)
四、级间耦合网络	(301)
第六节 高频放大器的稳定性	(303)
一、内反馈对放大器性能的影响	(303)
二、稳定性系数	(304)
第七节 级联单调谐高频放大器	(306)
一、单管高频放大器存在的问题	(306)
二、共发-共基级联高频放大器	(307)
三、其他级联放大器	(310)
第八节 场效应管高频放大器	(312)
一、场效应管的小信号等效电路	(312)

二、场效应管高频放大器.....	(312)
第九节 晶体管大电流特性和安全工作.....	(314)
一、晶体管的击穿电压.....	(314)
二、晶体管的二次击穿现象.....	(317)
三、晶体管的散热.....	(318)
四、晶体管的安全工作区.....	(320)
五、有关的几点说明.....	(320)
第十节 晶体管高频功率放大器.....	(323)
一、高频功率放大器的基本工作原理.....	(323)
二、高频功率放大器的工作状态.....	(331)
三、集电极电流脉冲的分析.....	(336)
四、高频功率放大器的负载特性.....	(339)
五、高频功率放大器的馈电电路.....	(342)
第十一章 晶体管振荡器.....	(348)
第一节 振荡器的基本工作原理.....	(348)
一、自激振荡的产生和维持.....	(348)
二、自激振荡的建立与振幅的稳定.....	(349)
三、振荡器电路参数的变化对振幅的影响.....	(351)
第二节 LC 自激振荡电路和 LC 振荡器.....	(352)
一、变压器反馈振荡电路.....	(352)
二、电感反馈振荡电路(电感三点式).....	(354)
三、电容反馈振荡电路(电容三点式).....	(355)
第三节 RC 自激振荡器.....	(357)
一、电桥振荡电路的工作原理.....	(357)
二、 RC 相移式振荡器.....	(359)
第四节 石英晶体振荡器.....	(360)
第十二章 脉冲电路.....	(362)
第一节 RC 电路及其暂态分析法.....	(363)
一、电容器的基本性质.....	(363)
二、 RC 电路的暂态分析法.....	(364)
三、时间常数和指数曲线.....	(366)
四、 RC 微分电路.....	(368)
五、 RC 积分电路.....	(370)
第二节 晶体管的开关特性.....	(372)
一、二极管的开关作用.....	(372)
二、三极管的开关作用.....	(373)
三、三极管倒相器.....	(375)
四、三极管开关的转换过程.....	(375)
第三节 门电路.....	(377)
一、二极管“与”门电路.....	(377)
二、二极管“或”门电路.....	(379)
三、三极管“非”门电路.....	(380)

四、“与”门和“非”门的关系.....	(381)
五、“与非”门和“或非”门电路.....	(381)
第四节 双稳态触发器.....	(383)
一、双稳态触发器的两个稳定状态.....	(383)
二、双稳态的翻转.....	(385)
三、双稳态触发器的工作条件.....	(386)
四、双稳态触发器的触发方法.....	(389)
五、自给偏压双稳态触发器.....	(393)
六、双稳态电路的调测和故障检查.....	(394)
第五节 单稳态触发器.....	(395)
一、集电极-基极耦合单稳态触发器.....	(395)
二、射极耦合单稳态触发器.....	(398)
第六节 自激多谐振荡器.....	(401)
第七节 锯齿波电路.....	(405)
一、简单的锯齿波电路.....	(405)
二、以三极管作恒流源的锯齿波电路.....	(407)
附录.....	(409)
一、电子管的外形、结构、材料和符号.....	(409)
二、一般常用电子管特性表.....	(411)
三、常用国产电子管与外国同类电子管等效对照表.....	(415)
四、晶体管和场效应管的结构图、电路符号及参数举例选录.....	(419)
五、常用晶体管电极引线接续图与型号对照表.....	(422)
六、常用半导体二极管特性表.....	(425)
七、常用晶体三极管特性表.....	(441)
八、常用场效应管特性表.....	(474)
九、部分新、旧及部、厂标型号对照表.....	(476)
十、晶体管外型图(部标).....	(479)

第一篇 电子管部分

1948

第一章 电子管

第一节 概 述

电子管是现代无线电设备中不可缺少的元件之一，它是各种电子管无线电设备的“心脏”。即使在半导体元件蓬勃发展的今天，它依然充满着顽强的生命力，以其所具备的特有的性能，诸如稳定可靠、功率巨大等，而不能为其他半导体元件所替代。

一、电子管的定义

电子管就是把若干电极——某种金属丝或金属片，封闭在真空或装有稀有气体的容器中，利用某一电极——阴极（如涂钍钨丝）放射电子，而用其他电极控制电子和吸引电子的一种装置。

二、电子管的种类

1) 热电子管：热电子管包括高真空热电子管和充气管两种。

1. 二极管、三极管、四极管、五极管、束射管、多极管、复合管等属于高真空热电子管。

2. 汞气整流管、钨氩整流管、闸流管等属于充气管。

2) 光电管：高真空光电管，充气光电管等。

3) 汞弧整流管。

4) 气体冷阴极管：稳压管、霓虹管等。

5) 阴极射线管。

6) 特殊超短波及微波管：调速管、磁控管、行波管等。

三、电子管的用途

可用于无线电收发信机、无线电广播和有线电广播的增音站、载波机务站、电视、传真、自动控制、遥控设备（如鱼雷和水雷引爆、火炮指挥、安全系统等），以及雷达、天文无线电望远镜，定向仪、海底测深仪等其他探测仪器。电子管的种类很多，读者欲更深入地了解可参阅有关电子管方面的专著。由于篇幅有限，以下我们仅对普通电子管——高真空热电子管的基本构造和原理加以介绍。

第二节 二 极 管

一、二极管的诞生过程

1883年，爱迪生在试验钨丝灯泡时，发现了一个新奇的现象，他把一金属片装进灯泡，在这金属片与灯丝两端之间接上正电压，就有电流从金属片到灯丝流过，在电流计上有一定

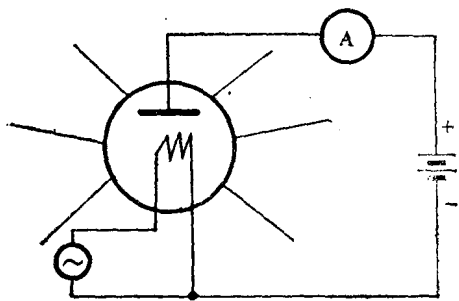


图 1.1 爱迪生效应

的读数,这种现象当时人们称之为“爱迪生效应”。直到 1899 年才由发现电子的汤姆生对这种现象作了初步解释,他对“爱迪生效应”的解释是:由于炽热的灯丝发射电子(参考一),因而被带正电的金属所吸收。随后不久,1904 年佛莱民利用了“爱迪生效应”的原理,制造了二极管。实际上爱迪生试验的灯泡,就是一只最原始的二极管,如图 1.1所示。直到目前为止,二极管的基本构造仍与上述基本相同。

二、二极管的构造与基本特性

1. 构造与符号 在真空的或充有少量惰性气体的玻璃泡或金属泡内密封进二个电极,一个叫阴极(也就是灯丝),是用来发射电子的,另一个叫阳极,是用来吸收电子的。二极管的符号如图 1.2 所示。

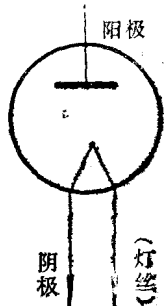


图 1.2 二极管的符号

2. 基本特性 二极管的阴极是用涂有氧化物的金属制成的,当加热后,金属中的自由电子因受热而运动速度加快,在温度增加到一定程度时,自由电子就克服金属表面的阻力而飞逸于空间(这也就是所谓热电放射现象),积聚在阴极附近形成电子云。阳极是套在阴极外面的金属圆筒,如果在阳极和阴间接上一个电压,当阳极为正时,则吸收电子,有电流流过,接上电流表可以读出电流数值;当阳极为负时,则排斥电子,电路中没有电流流过,电流表中指示的数值为零。从上述情况可以看出,二极管具有这样一个特性:当阳极为正时导电,为负时关闭。也就是具有单向导电的特性,相当于一个电子开关,我们可以利用这一特性,作为整流或检波之用。

3. 阴极与阳极材料 对阴极材料的要求是能耐高温,能放射大量的电子,能长期连续工作,经得起残余气体离子的撞击。阳极材料通常是用镍、钨、石墨、钽做成的,为了散热在用钨制成的阳极上涂一层钍粉,若是镍制成的,则涂一层碳粉。

4. 灯丝类别 一般来说,灯丝可分为两种类别。直热式:灯丝就是阴极,其特点是加热快、效率高,但其电子放射量随电压高低的变化而变化,故不适合用交流电源加热,否则要产生嗡嗡的交流声。其代表符号如图 1.2 所示。

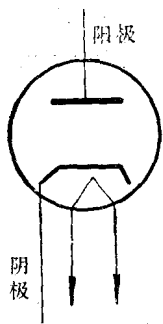


图 1.3 旁热式灯丝符号

旁热式:灯丝和阴极分开,灯丝专供加热之用,阴极只承当放射电子,与直热式相比,加热时间较长,效率较低,但其优点是能使用交流和直流电源,同时结构比直热式坚固,一般收音机的电子管都属于这一类。旁热式灯丝的符号如图 1.3 所示。

5. 二极管的线路联接和特性曲线 二极管线路共分两个回路:

- 1) 灯丝回路——灯丝电压高低决定灯丝电流的大小。
- 2) 阳极回路——阳极电压高低决定阳极电流的大小。

现在我们根据图 1.4 做一次实验,在灯丝两端接上一个固

定的电压，假定为 1 伏特(由灯丝电位器调节后固定不动)，使灯丝烧热，阴极放射电子。这时阳极的电压接正，并逐渐升高，电流表中的电流数值也逐渐加大，但加大到一定的程度后，尽管阳极电压再继续升高很多，可是电流增加却很少，甚至几乎不变。这是因为灯丝电压一定，温度不变，当阳极电压升高到某一数值时，阴极所发射的电子已全部被吸引到阳极，虽然阳极电压继续增加，但阳极电流不会加大。这种由于温度使电子放射受到限制而造成的阳极电流饱和，称为温度饱和，如图 1.5 所示。如欲使阳极电流再继续加大，只有增加灯丝电压，使温度升高，这样阴极才能放射更多的电子。倘若我们把阳极电压固定于某一数值，例如 45 伏，并不断升高灯丝电压，可以看到电流表中的电流也不断加大，当增加到一定数值时，阳极电流也不再继续上升。这是因为阳极吸收电子的能力已达到饱和状态，尽管阴极放射电子越来越多，但阳极不能吸收，这些未被吸收的电子积聚成电

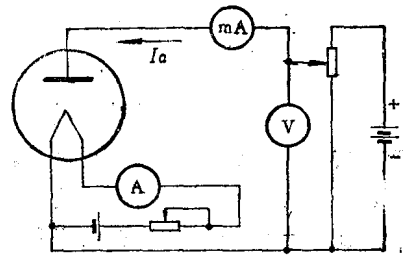


图 1.4 二极管特性实验电路

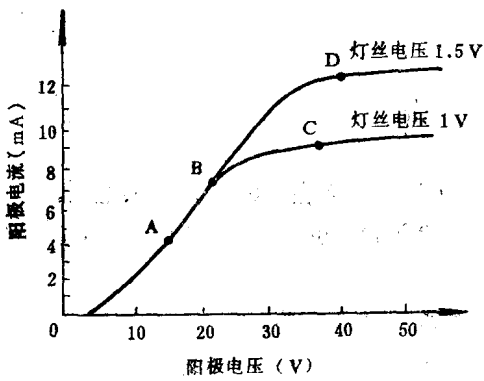


图 1.5 温度饱和

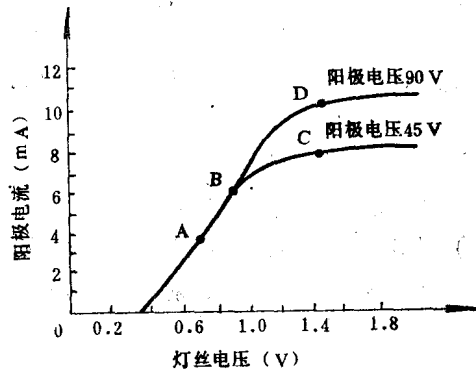


图 1.6 阳极电压饱和

子云。这种阳极电流饱和的现象，称之为阳极电压饱和，如图 1.6 所示。若要使阳极电流继续加大，只有升高阳极电压。

在二极管中，阴极的电子飞往阳极相当于阳极的正电荷驰往阴极。因正电荷移动的方向表示电流的方向，所以阳极电流的方向与电子流的方向相反。阳极电流的方向是由阳极到阴极(如图 1.4 中的 I_a 所示)，而且只能由阳极到阴极，因此二极管具有单向导电的特性。

参考一：电子放射

电子放射现象不仅仅是导体受热能而放射，若给予其他能量如光、强电场等，也能产生电子放射。

1. 热电放射 金属中自由电子的热骚动，在一般情况下受到原子核的束缚，不能脱离本体，但若给予加热使动能增加，则电子热运动加快，当温度升高到一定程度时，高速的电子就冲破阻碍飞逸于空中。这种对金属加热使其放射电子的现象，称为热电放射。放射电子数目多少与温度、金属材料有关，不同的金属材料，放射电子数目不同，温度越高，放射电子的数目也越多。

2. 光电发射 利用普通光线中的辐射能量,照射钾、铯等碱金属,使其向外发射电子,如电影放映机中的光电管。

3. 强电场发射 利用电极产生强电场使导体内的电子受强大的引力而逸出体外。如冷阴极充气管,霓虹管,稳压管之类。

4. 二次放射 高速运动的电子撞击在导体上,被撞击导体内的自由电子吸收了动能而发射,称为二次放射,其发射电子数目的多少取决于开始撞击的电子数目及其速度,且与被撞体的材料和表面组织等状况有关。

参考二: 阴极材料

1. 纯钨

(1) 耐高温,约 2500°K ($^{\circ}\text{K}=\text{C}+273^{\circ}\text{C}$)。

(2) 经得起正离子的冲击。

(3) 寿命在 2000 小时以上。

(4) 适用于大功率机器,阳极电压在 5000 伏,总功率在 1 千瓦以上。

(5) 放射效率是每瓦大约放射 2 至 10 毫安的电子。

2. 涂钍钨丝——在钨上面涂以少量的氧化钍

(1) 工作温度较低,约 1900°K 。

(2) 同纯钨相比,则较为脆弱,经不起离子的冲击。

(3) 寿命较长,在 5000 小时以上。

(4) 适用于中功率机器,阳极电压在 750—5000 伏,功率在 100—1000 瓦范围。

(5) 放射效率是每瓦约放射 5—100 毫安(旁热式)和 10—200 毫安(直热式)的电子。

子。

3. 涂氧化物灯丝——以镍合金做芯子,外涂钨或铯的氧化物

(1) 耐温更低,约 1000°K 。

(2) 更经不起离子冲击。

(3) 寿命在 8000 小时以上。

(4) 用途广泛,可作为接收机的电子管、小型发射管及部分中型管,阳极电压 500 伏,功率在 100 瓦以下。

(5) 放射效率每瓦约 200—1000 微安的电子。

第三节 三极管

二极管的诞生,虽然为电子工业开辟了广阔的新天地,但是其用途还仅仅局限于整流和检波,为了进一步扩大电子管的使用范围,如用来放大信号或产生信号等等。因此在二极管的基础上进一步研制而成三极管。

一、三极管的构造及符号

在二极管的阳极与阴极之间加进了一个金属丝绕成栅网状的电极,叫栅极,便构成了三极管,其符号如图 1.7 所示。图 1.7(a) 为旁热式三极管,图 1.7(b) 为直热式三极管。图 1.7 中, a 表示阳极, k 表示阴极, g 表示栅极, f 代表灯丝。