

中等专业学校交流讲义

电子技术基础和电子仪表

哈尔滨电工学院电工仪表教研室編



中国工业出版社

中等专业学校交流讲义



电子技术基础和电子仪表

哈尔滨电工学院电工仪表教研室編

中国工业出版社

本书是根据1959年中等专业学校电工仪表制造专业〔电子技术基础和电子仪表〕的教学大纲编写的。

本书内容可分为四部分：第一部分着重各种电子管和离子管的原理、特性、参数等论述。第二部分对各种基本的电子电路：放大、振荡、调制与检波、整流和稳压电路作了较广泛的论述，而对低频电压和功率放大器化了较多的篇幅，这是因为它得到了日益广泛应用的缘故。第三部分介绍了脉冲技术、半导体和光电器件等新技术。最后一部分阐述了最常用的电子仪表的线路，并讲明了它们的使用方法。

本书可供中等专业学校〔电工仪表制造专业〕的学生作为教材，也可作为有关工程技术人员参考书。

电子技术基础和电子仪表

哈尔滨电工学院电工仪表教研室编

*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

8787×1092 1/16·印张11 1/2·插页1·字数200,000

1961年8月北京第一版·1961年8月北京

印数0001—3,033·定价(9-4)1.15

统一书号: 15165·549(一机-94)

緒 論

近几十年来，电子学有了非常大的发展。除了在无綫电通訊技术里利用电子学获得巨大的成就以外，电子学在各科学技术部門中也有了寬广的应用。最近，苏联成功地发射了第一个載人的宇宙飞船，正是集中地說明了在无比优越的社会主义制度下，电子学及其他科学高度发展的标志。关于电子学的广泛应用与成就，在許多文献中都可以找到丰富的資料，我們在这里就不贅述了。

像其他部門一样，电子学对电气测量技术及仪表制造工业也有着越来越显著的影响。这是由于利用了电子学可以达到快速、高准确度和高效率，同时还能达到极高的灵敏度。

例如，利用电子管檢流計，可以测量小到 10^{-17} 安和 10^{-10} 伏的微小电流和电压，而利用一般檢流計，只能测量 10^{-11} 安和 10^{-7} 伏的电流和电压。

测量弱小的交流电流和电压，在过去，是比较困难而且甚至于是不可能的，这是因为一般的交流仪表其耗用功率都是比較大的。由于采用了电子管把弱小的交流电流或电压加以放大并进行檢波，現在就能利用性能良好的磁电式仪表来指示之。

在实验室里进行精密测量时，經常需要高稳定度的电源，現在已經完全有可能以电压稳定、体积甚小和使用方便的电子管穩压器来代替体积龐大、維護复杂且价格昂貴的原始化学电源——干電池和蓄電池。

高频电在工业上的应用，开辟了材料加工的新途徑，有力地推动了生产的发展，对仪表工业來說亦然。例如，由于采用高频电热的熔化和热处理，現在就有可能生产出各种高质量的鉄磁材料，为制成高准确度仪表創造了有利条件。

瓦时計的檢驗是一項較為复杂的工作。由于利用了电子学，現在已經有可能使之自动化，从而把人們从繁瑣的劳动中解放出来。

非电量的电测技术已經在测量技术的領域里发展成为一个前途寬广的独立分支，这是因为电测法比起其他方法来，有着許多无可比拟的优越性，而电子学在其中更起着重大的作用。电子管放大器能把微小的电量（訊号）加以放大，于是配合了各种变换器，遂使各种非电量的测量提高到过去所不能达到的水平；而最重要的还在于应用了电子学就能使生产过程自动化。

例如，采用电子自动控制仪器，能以 $\pm 0.005^{\circ}\text{C}$ 的准确度将炉子或浴槽的温度保持在 100°C 下；而以热电偶等作变换器的各种电子温度测量仪器，在温度测量中更是应用得极为广泛。

利用电子测微仪，能够发现仅达一埃（ 10^{-8} 厘米）的位移；而测量 10^{-5} 厘米的机械位移的电子仪器在实际的精密测量中也广泛地被使用着，而且它們并不是很复杂的。

凡此种种，足以說明电子学对一个从事测量和仪表制造工作的技术人員的重要意义。在电工仪表制造专业教学計劃中設置本課程的目的也在于此。

本书是按照中等专业学校电工仪表制造专业〔电子技术基础和电子仪表〕的教学大綱編写的。

考虑到电子技术的基础在于使用各种电子管和离子管，所以在本书的第一部分仅着重于它们的原理、特性、参数等的论述，而对理论性问题探讨得较少。

第二部分中，对各种基本的电子电路：放大、振荡、调制与检波，整流与稳压电路等作了广泛的论述，但以放大电路为主。而在放大电路中，则以低频电压和功率放大器为重点，这是因为它们还是较为常用的。

由于脉冲技术、半导体和光电器件等新技术也得到日益增长的发展和应⽤，因此本书中也列入了这些材料，但力求避免繁瑣深奥的数学分析，而致力于基本电路的介绍和物理概念的建立上。

最后一部分是电子仪表，其目的不仅在于使学者掌握最常用的电子仪表的使用，还应通过典型线路的分析来进一步提高对电子线路的分析能力。

本书是以哈尔滨电工学院中专部几年来使用的「电子技术基础和电子仪表」课程的讲义为基础，并吸取了各兄弟学校的丰富教学经验编写而成的。由于编者还是初次尝试编写工作，加之水平有限，书中不免会有遗漏或不妥之处，还希望各方面加以批评和指正。

編者

1961.4

目次

緒論	3	第七节 閘流管	39
第一章 电子发射	7	第八节 汞弧管	41
第一节 金属中的电子逸出功	7	第六章 放大器概論	43
第二节 电子发射的方式	7	第一节 放大器的作用原理及其分析	43
第三节 热电子发射公式	8	第二节 放大器的基本电路和类型	46
第四节 热阴极的主要参数	8	第三节 放大器的特性	48
第五节 阴极的类型	9	第四节 放大器的畸变	48
第六节 阴极的结构	10	第五节 放大器中电子管的工作状态	51
第二章 二极管	11	第六节 放大器的供电电路	51
第一节 二极管的结构与电路	11	第七章 低频功率放大器	53
第二节 二极管的空间电荷	11	第一节 功率放大器的工作指标	53
第三节 二极管的特性曲线和二分之三次方定律	14	第二节 单边式三极管功率放大级	54
第四节 二极管的参数	15	第三节 变压器功率放大级的频率特性	56
第五节 小功率二极管的主要类型	16	第四节 单边式束射四极管和五极管功率放大级	59
第三章 三极管	17	第五节 推挽电路	60
第一节 三极管的结构和符号	17	第六节 末级放大级的计算	63
第二节 控制栅的作用	17	第八章 低频电压放大器	66
第三节 三极管的极间电容	18	第一节 电压放大器的工作指标	66
第四节 等效电压	19	第二节 电阻放大级	66
第五节 栅极电流	20	第三节 电阻放大级的计算	70
第六节 三极管的静态特性曲线	21	第四节 变压器电压放大级	72
第七节 三极管的静态参数	23	第五节 扼流圈放大级	75
第八节 三极管的动态特性和参数	25	第九章 放大器的反馈	77
第九节 三极管的主要类型	26	第一节 放大器中的反馈	77
第四章 多栅管	27	第二节 负反馈的应用	78
第一节 四极管的结构和工作原理	27	第三节 放大器中的负反馈电路	79
第二节 四极管的特性曲线	29	第四节 反馈放大器中电子管的等效参数	81
第三节 四极管的参数	30	第五节 放大器中的寄生正反馈: 去耦滤波器	82
第四节 五极管的抑制栅极	31	第六节 阴极负载放大级	83
第五节 五极管的特性曲线、参数和应用	31	第七节 倒相电路	84
第六节 束射四极管	33	第十章 直流放大器	87
第五章 充气管	35	第一节 引言	87
第一节 概述	35	第二节 直流放大器的耦合电路	87
第二节 充气管中气体的主要物理过程	35	第三节 高稳定度的直流放大器线路	89
第三节 气体放电及其伏安特性	36	第十一章 选择性放大器	92
第四节 稳压管	37	第一节 引言	92
第五节 热阴极汞汽二极管	37	第二节 振荡回路	92
第六节 氬气二极管	39		

第三节 谐振放大器.....94	第六节 双稳态触发电路.....138
第四节 频带放大器.....96	第七节 单稳态触发电路.....141
第十二章 电子管振荡器.....97	第八节 自激多谐振荡器.....144
第一节 电子管振荡器的自激振荡.....97	第九节 间歇振荡器.....144
第二节 LC 振荡器的自激条件.....98	第十节 锯齿波发生器.....146
第三节 LC 自激振荡器的线路.....99	第十一节 锯齿波发生器的线路.....148
第四节 RC 振荡器.....101	第十二节 脉冲放大器.....150
第十三章 调制与检波.....104	第十八章 电子示波器.....154
第一节 调制.....104	第一节 引言.....154
第二节 调幅电路.....105	第二节 电子射线管.....154
第三节 检波.....107	第三节 交流电压波形的观测.....157
第四节 线性二极管检波器.....107	第四节 李沙育图样.....157
第五节 板极检波和栅极检波.....109	第五节 非周期性过程和脉冲过程的显示.....159
第十四章 整流和稳压.....111	第六节 示波器的典型方框图.....160
第一节 整流电路.....111	第七节 SBK-5型电子示波器.....161
第二节 整流电路的计算要点.....112	第八节 同时观察几个波形.....164
第三节 平滑滤波器.....115	第十九章 电子管伏特表.....166
第四节 稳压器.....116	第一节 电子管伏特表的基本特性.....166
第五节 输入端控制的电子稳压器.....117	第二节 C类电子管伏特表的作用原理和 基本特性.....166
第六节 输出端控制的电子稳压器.....118	第三节 GB-1型电子管万能表.....167
第十五章 晶体管和晶体管电路.....120	第四节 GB-2型电子管毫伏表.....169
第一节 导体、绝缘体和半导体.....120	第二十章 频率的测量和频率表.....171
第二节 半导体的基本原理.....121	第一节 频率的划分.....171
第三节 P-N结.....122	第二节 音频的测量.....171
第四节 晶体二极管.....123	第三节 利用电容器充电和放电的方法来 测量频率和电子管频率表.....172
第五节 晶体三极管.....124	第四节 射频的测量和谐振式波长表.....175
第六节 晶体管放大器.....126	第五节 用比较法测量射频和外差式频 率表.....176
第十六章 光电器件.....130	第二十一章 测量用振荡器.....178
第一节 外部光电效应的光电管.....130	第一节 对振荡器提出的基本要求.....178
第二节 光电倍增器.....131	第二节 音频1-甲型音频振荡器.....178
第三节 光电继电器.....132	第三节 标准高频讯号发生器.....183
第十七章 脉冲技术.....133	第二十二章 Q表.....185
第一节 引言.....133	主要参考书名.....186
第二节 限幅器.....133	
第三节 二极管限幅器.....134	
第四节 多极管限幅器.....136	
第五节 微分电路的原理和应用.....137	

第一章 电子发射

第一节 金属中的电子逸出功

金属中含有极多的自由电子，经常在各原子间作漫无定向的不规则运动。即使在绝对零度的温度下，这种不规则运动仍不停止。

自由电子在金属内虽然可以自由运动，但在寻常温度下很少能离开金属表面而向外脱走，这是因为深处于金属内的自由电子周围均匀分布有带正电的原子核，则其所受各方面正电荷的吸引力大致平衡而没有偏大偏小的趋势。但处于金属表面上的自由电子，仅受到表面以内带正电的原子核的吸引力，并没有其他向外的力以抵消之，所以金属的自由电子受其表面所束缚而不能脱走，好像金属表面发生一个电位壁垒，将自由电子阻住而不使其外逸，如图 1-1 所示的情形。

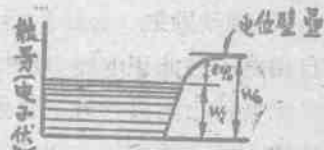


图 1-1 金属的能量图。

图 1-1 中的 W_i 代表速度最快的自由电子（在绝对零度下）所具有的动能， W_a 为自由电子逸出电位壁垒所需的全部动能，由于 W_a 大于 W_i ，所以自由电子如果要从金属中逸出，必须由外界供给一项能量：

$$e\varphi_0 = W_a - W_i \text{ (电子伏特)}, \quad (1-1)$$

这项能量 $e\varphi_0$ 称为电子的逸出功，以电子伏特为单位。而 φ_0 等于

$$\varphi_0 = \frac{W_a - W_i}{e}, \quad (1-2)$$

即逸出功的等价电位，为了简便也常称为逸出功。

各种金属的逸出功是并不相同的。现在把几种金属与炭的逸出功列于表 1-1 内，以供参考。

表 1-1

金 属	$e\varphi_0$ (电子伏特)	金 属	$e\varphi_0$ (电子伏特)	金 属	$e\varphi_0$ (电子伏特)
钨	4.63	钽	4.20	敷钨的镍	1.0
钼	4.16	铜	4.87	铯	3.60
钽	4.10	汞	4.52	铷	1.81
铂	5.32	钪	3.38	碳	4.34
铁	4.77	敷钽的钨	2.63		
镍	5.03	钡	2.52		

第二节 电子发射的方式

上节曾讲到，金属中的自由电子要想逸出其表面时，必须具有足以冲出表面上电位壁垒的充分能量 W_a 。而在寻常温度下，即使速度最快的自由电子，它所具有的动能亦不能达到上述程度。但是如果用适当方式由外界供给能量，使一部分自由电子的动能增加到这一需要的程度，则大量电子就可以由金属逸出，这种现象称为电子发射。

金屬的电子发射可依照其所需能量的来源而分为下列四种方式:

1. 热电子发射。金屬由外界供給热量, 使其温度充分升高而大量发射电子时, 称为热电子发射。大多数金屬加热到二千多度的绝对温度时, 即可发射大量电子。

2. 光电发射。金屬接受光线中的辐射能而发射电子的, 称为光电发射。鉀、铯等逸出功較低的金屬, 受普通光线照射时, 即可发生光电发射。

3. 二次发射。金屬或其他固体物质受高速电子或其他质点撞击的亦可发射电子, 这称为二次发射, 撞击的高速电子称为一次电子。

除利用二次发射的特种电子管外, 普通电子管均应防止二次发射。电子管内阴极以外的其他各电极, 通常加塗石墨或鍍以薄层的金、鉑等以抑制其二次发射。

4. 場致发射。金屬附近如果置一正电极使金屬表面上发生强大的正电场, 以致金屬内的自由电子被此正电场力所拉出, 这种电子发射称为場致发射。

除特种冷阴极管外, 普通电子管都不需要这种場致发射。所以各电极均应避免有薄銳的边緣与細小的尖端, 以避免发生尖端效应而致电力綫集中于极小区域, 造成場致发射。

第三节 热电子发射公式

除光电管与冷阴极管外, 其他电子管均利用热电子发射以产生电子。

当金屬加热至相当温度时, 它的一部分自由电子的速度与动能将增加到充分程度, 足以克服表面电位壁垒的阻碍而向外发射。金屬的温度愈高, 能冲出电位壁垒的电子数量将愈多, 所以发射电流亦愈大。

金屬的热电子发射对于温度的变化关系, 可由下列李查孙-道舒曼公式表示:

$$I_e = SAT^3 e^{-\frac{b_0}{T}} \quad (1-3)$$

式中 I_e ——发射电流;

S ——阴极的工作表面面积;

T ——阴极加热温度, $^{\circ}\text{K}$ (绝对温度);

e ——2.718, 自然对数的底;

A ——常数, 各种純金屬的 A 值大多等于 60 左右;

b_0 ——常数, 等于 11610ϕ (ϕ 即为逸出功)。

第四节 热阴极的主要参数

阴极的性能通常用单位面积的阴极表面上所发射出来的电流即发射率来表征。式 (1-3) 内的 A 与 b_0 两项常数都随着金屬的种类而异。所以, 不同金屬加热到同样温度时, 将发生不同程度的发射率。要想获得强大的电子发射率, 阴极必須用系数 A 值較大而指数 b_0 值較小的金屬, 其中尤以指数 b_0 对于发射率的关系远較系数 A 为重要。由于 b_0 值是与逸出功成正比, 所以阴极需采用逸出功較低的金屬。但是金屬的熔点是更为重要的一项决定因素, 因为只有远在熔点以下就可以大量发射电子的金屬, 才能保持其坚强的机械性能。从表 1-1 可見, 鉍的逸出功为最低, 但因熔点甚低 (仅达 26°C) 而不能热至充分温度, 所以不适用于热电子发射的阴极。鎢、钼、鉬三种高熔点金屬为最适用的阴极材料, 其中鎢的

逸出功虽然大于钽和钼，但是熔点达3655°K，高于钽和钼，所以钨为纯金属阴极中最广泛应用的材料。

热电子式电子管的阴极所担负的任务是利用阴极电源供给的电能转变为热能以进行热电子发射，所以阴极的功效率以每单位输入电功率所能产生的发射电流即发射效率来评价。发射效率 H 的定义是：阴极在正常工作温度下，其发射电流对输入电功率的比值，即

$$H = \frac{I_e}{P} \text{ (毫安/瓦)}。 \quad (1-4)$$

第五节 阴极的类型

各种热电子式电子管所采用的阴极主要有下列三种类型：

1. 纯钨阴极。其工作温度大致在2400~2600°K的范围。在此正常工作温度下，纯钨阴极的使用寿命应该不少于1000小时。提高工作温度，虽然可以增进电子发射率，但是钨的蒸发率将提高而使寿命减短。

由于纯钨阴极的发射效率低，（因为钨的逸出功较大而需工作于较高温度，所以 $H = 2 \sim 10$ 毫安/瓦）目前主要只用在板压甚高的大型真空管中，因为在这样高的板压下，其他类型的阴极损坏很快。此外，由于钨的发射性能十分稳定，所以测量用的电子管的阴极亦都用钨制造。

2. 钨钼阴极。是在钨丝表面上敷盖一层相当于一个原子厚的钼而成。它的逸出功较小，所以工作温度较低，在1800~1900°K的范围内，而发射效率亦比纯钨阴极大（ $H = 25 \sim 40$ 毫安/瓦）。

钨钼阴极的主要缺点是对温度（即阴极电流）的变动极为敏感，这种阴极绝对不能应用于充气管，亦不适用于板压超过五千伏的大型真空管。

钨钼阴极如果加以炭化则可以改进它的性能，从而可工作于较高温度（1950~2000°K）而将发射效率提高（ $H = 50 \sim 70$ 毫安/瓦），故吞加管一类的高气压式充气管有时亦采用这种阴极，但炭化不可过度，以免钨丝变脆。

3. 氧化物阴极。此种阴极以纯镍合金充做芯料，在其表面上加涂一层钨钼氧化物而成。

此种阴极经过激活处理后，仅达一电子伏特的逸出功，故其工作温度仅为1000~1150°K，而发射效率很高（ $H = 60 \sim 100$ 毫安/瓦）。

这种阴极的优点为：

1) 工作温度甚低而钨钼有效质料的蒸发率甚小，故寿命甚长，可以超过五千小时；
2) 如果施加充分的板压，可在数微秒的极短时间内发射高至20~30安培/厘米²的强大电流，极适用于脉冲工作的电子管；

3) 它受正离子撞击的损害程度远较钨钼阴极为轻微，故亦适用于充气管。

氧化物阴极往往会在一处或多处极小区域发生高热而成热点，这是它的最大缺点，这种阴极的另一缺点为其钨钼质料由阴极蒸发时，极易沾染于其他电极上或绝缘物体上，以致发生不需要的电子发射或漏电现象。由于上述两种缺点，所以这种阴极目前尚不能应用于板压极高的电子管，但收讯式的小型管最近已全部采用氧化物阴极。

第六节 阴极的结构

热电子管的阴极，计有两种结构形式，一种是直接通电流于阴极，使其温度升高而发射电子，这种称为直热式阴极。另一种是将电流通过一热丝，将热丝的温度升高而使它传输热量于阴极上，这种称为间热式阴极。

1. 直热式阴极。纯钨、钨钍、氧化物等三种类型的阴极都可以制成直热式阴极。

它的实际构造形式有倒V形、倒W形、单螺旋形、双螺旋形，如图1-2所示。

直热式阴极最好采用直流电流加热，用直热式电子管装成的收音机或扩音机应用交流的阴极电源时，将发生交流哼声。

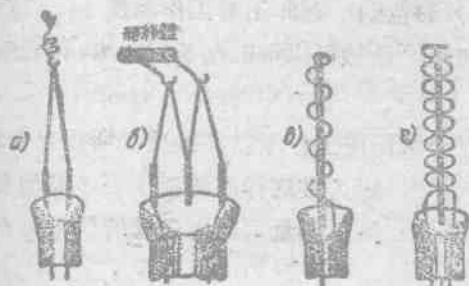


图1-2 直热式阴极的结构。

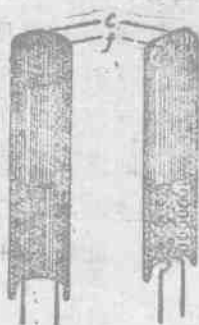


图1-3 间热式阴极的结构。

2. 间热式阴极以纯镍或镍合金制成套筒形的阴极，其表面上涂氧化钨（钍）以发射电子。套筒形的阴极内另外置有一纯钨或钨铜合金所制的加热丝，通过电流而将产生的热量传给阴极。加热丝表面上加涂一层能耐受高热的绝缘质（氧化铝或氧化钨），以避免加热丝与阴极接成通路。图1-3示间热式阴极的几种结构形式。

间热式阴极是由热丝间接加热，它本身的质料又极厚而热容量甚大，所以温度极少受热丝内交流瞬时电流变化的影响，更由于阴极全与加热丝绝缘，其本身成为等电位体，所以板压内并不含有交流阴极电压的成分，因此交流哼声可以完全免除。

间热式阴极的缺点是发射效率较低而需较长的加热时间（达一分钟许）。这种阴极仅能采用氧化物一种发射材料，纯钨与钨钍两种材料都不适用。

第二章 二极管

第一节 二极管的结构与电路

二极管由阴极和板极两个电极构成。它的阴极为直热式或间热式构造，用以发射电子。板极又称为阳极，对阴极处于正电位，用以吸收阴极发射的电子而产生板流。图 2-1 所示为二极管的符号（*a*——直热式阴极二极管；*b*——间热式阴极二极管）。板极用金属片制造（小型管用镍，大型管用钨、钼或石墨制成）而围绕阴极之外，以便减低阴极的辐射热损失。图 2-2 所示为直热式二极管的阴极和板极的构造。图 2-3 所示为间热式二极管的阴极、灯丝、板极的构造。

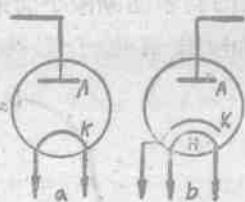


图 2-1 二极管的符号。

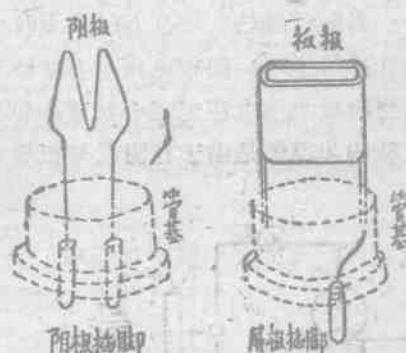


图 2-2 直热式二极管的结构。

二极管的基本电路如图 2-4 所示，加在直热式阴极上或间热式阴极的灯丝上的阴极加热电压，是用以加热阴极而使其发射电子，而加在板极和阴极间的板压，是用以产生板流的。板压通常以间热式阴极作为零电位的计算起点，如图 2-4 *a* 所示；直热式阴极采用直流电源时，其板压以阴极的负端为起点，如图 2-4 *b*；采用交流电源时，以阴极的中心点为起点，如图 2-4 *c*。

当二极管的板压 U_a 为正值时，板极吸收阴极的发射电子产生板流而导电。但板压成负值时，板极不吸收电子，所以没有板流产生而不导电，可见二极管是具有单向导电性的。

第二节 二极管的空间电荷

二极管的板流是取决于阴极加热电压与板压两项因素。在某一固定板压下，板流对阴极加热电压的关系可由 I_a-U_h 特性曲线来表明，在某一固定阴极加热电压下，板流 I_a 对板压 U_a 的关系可由 I_a-U_a 特性曲线来表明。图 2-5 所示为测绘上述两种特性曲线所用的电路。其中变阻器 R_h 和伏特表 U_h 分别用以调节和测量阴极加热电压；电位器 U_a 用以调节板压，伏特表 U_a 与毫安表 I_a 用以测量板压与板流。

I_a-U_h 特性曲线的测绘步骤如下：将板压保持于一个固定值 U_a ，阴极加热电压则由零

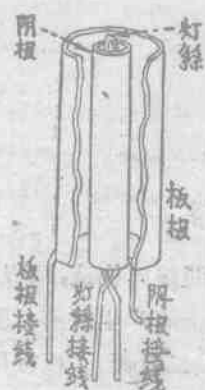


图2-3 间热式二极管的结构。

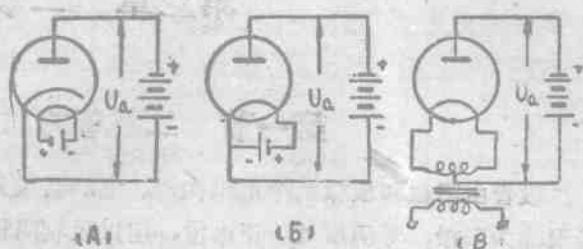


图2-4 二极管的基本电路。

逐步增加以升高其温度，与此同时读取板流的值。

由此所得的 I_a-U_a 特性曲线，如图2-6所示。从图中可以看出，这些曲线都可分为三个部分：当阴极加热电压在 U_{H0} 以下时，由于阴极未达充分温度而无显著的发射作用，所以板流几乎等于零；阴极电压从 U_{H0} 继续升高时，阴极的电子发射率增加，所以板流随之加强；当阴极加热电压超过一定值，例如 U_{a1} 下的 U_{H1} ，曲线的斜率逐渐减小而最后成水平，这种饱和现象是由于在阴极与板极之间产生负空间电荷而对发射电子起排斥作用所致。

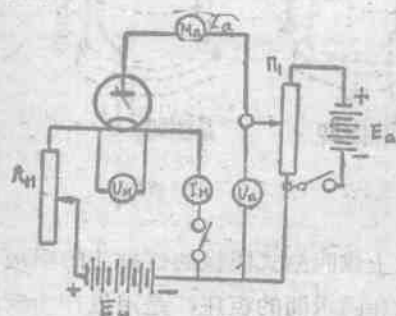
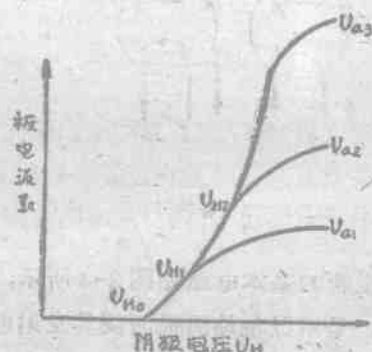
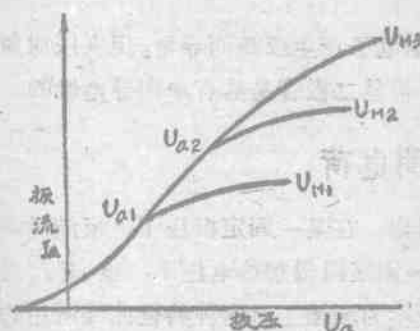


图2-5 测繪二极管特性曲线的电路。

图2-6 二极管的 I_a-U_H 特性曲线。

I_a-U_a 特性曲线的测繪步骤如下：阴极加热电压保持于一固定值 U_{H1} ，将板压由零值

图2-7 二极管的 I_a-U_a 特性曲线。

逐步增加（每隔 10~20 伏）而读取对应的板流值。由此所得的 I_a-U_a 特性曲线如图2-7所示。从图可见，这些特性曲线亦可分为三部分：纵坐标轴左边负值部分，与这部分相当的板流是非常小的，它决定于电子的初速；正值上升部分，与这部分相当的板流决定于阴极附近的负空间电荷，并且永远是 $I_a < I_e$ （如果二极管在与特性曲线的这部分相当的状态下工作，则称为二极管在「空间电荷作用的状态」下工作）；特性曲线平坦部分，板流达到一个最大值而不再增加。

这亦是一种饱和现象，但这一板流是受阴极的电子发射率所限制，所以板流 I_a 等于阴极的发射电流 I_e 。

I_a-U_n 特性曲线中的饱和部分以及 I_a-U_a 特性曲线中的正值上升部分中, 二极管的板流都决定于负空间电荷。为了说明负空间电荷的作用, 让我们来研究阴极与板极间的电位分布情况。

首先我们来讨论当阴极加热电压变化时极间电位分布的变化情形。假定阴极与板极是

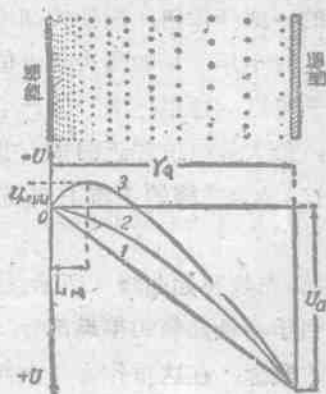


图2-8 阴极加热电压变化时, 极间电位的分布情况。

互相平行的无穷大平面, 其间相隔距离为 d_a 。现在如果加上板压 U_a , 即阴极如处于零电位而板极处于正电位 U_a (图2-8)。当阴极未加热或未加热到足够程度时, 由于并没有电子发射而没有空间电荷形成, 所以板阴两极间应成均匀电场。其极间电位的分布成一条直线(曲线1)——相当于 I_a-U_n 特性曲线中 U_{n0} 以下的部分。

如果加热阴极到足够温度而使其发射电子, 则由阴极出来的电子将充满了阴极到板极的空间; 因为每个电子都带有负电荷, 所以由阴极移动到板极的所有电荷就组成了分布在空间的负空间电荷(或负的体积电荷)。由于这些电荷的存在, 阴极到板极的空间中每一点的电位都要下降, 这时的电位分布情况就如曲线2所示, 当阴极温度不高时, 阴极发射的电子不多而且全被板极吸收, 在全部距离 d_a 内都是对电子产生加速作用的正电场, 这是相当于特性曲线 U_{n1} 以下的一部分。

现在如果把阴极温度再行加高, 则阴极发射的电子数亦将增加, 从而使空间电荷密度增大。这时阴极到板极间空间各点的电位下降得更厉害, 尤其在阴极附近, 因为那里空间电荷的效应相对来说是最大的, 所以阴极附近空间的电位会降到负值, 形成曲线3所示的电位分布情况。从这条曲线上可见, 在距离阴极 d_m (d_m 是极小的, 约十分之几毫米) 的地方有一个最大的负电位 U_{min} 。因此在阴极表面到 d_m 的空间内电子受拒斥电场的作用, 而使电子跑向板极的加速电场只在 d_m 到板极的空间内起作用, 显见这个拒斥电场对电子说来相当于一个高度等于 U_{min} 的壁垒。从阴极表面发射出来的电子必须越过空间电荷的拒斥场, 才能走进加速电场区域而被吸到板极。

当阴极温度继续增高时, 则由于发射的增加, 空间电荷的密度也增大, 因而加强了阴极附近的拒斥电场(壁垒的高度 U_{min} 增加, 并且稍微移向板极方向), 所以被这个电场阻止而跑回阴极的电子数就比较多, 而跑到板极的电子数及板流则维持不变。这就相当于 I_a-U_n 特性曲线的饱和段。

现在再来讨论板压变化时的极间电位分布情形。

在某一固定阴极加热电压 U_n 下, 当板极用导线连接于阴极上而使板压等于零值时, 极间电位分布状况如图2-9的曲线1所示。在这种情形下电子完全依靠其本身初速向板极运动, 而且在阴极到板极的整个空间中仅有空间电荷的电场存在, 这个电场的最大负电位 U_{min} 是在距离板极不远的地方。由阴极

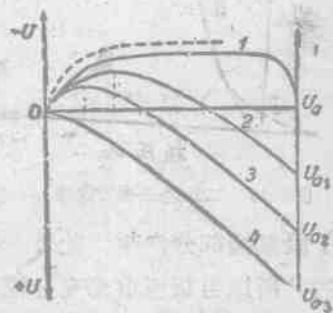


图2-9 板压变化时, 极间电位的分布情况。

仅有空间电荷的电场存在, 这个电场的最大负电位 U_{min} 是在距离板极不远的地方。由阴极

发射出来的电子中，只有极少数初速最快的一部分可以冲过这电场而跑到板极，其余的绝大部分电子都被阻住而折回阴极，所以这时有微小的板流产生（约几个微安）——与 $U_a = 0$ 的起始板流相当（当板压为负则拒斥场加大而板流更小——相当于 I_a-U_a 曲线的左边负值部分）。

现在如果在板极上加正电压 U_a ，则这板压将抵消空间电荷的一部分作用，而使极间电位普遍提高，其分布如图 2-9 中的曲线 2。和曲线 1 相比较，这时拒斥电场的最大负电位比较移近阴极，而且其最大值也减小了，所以有较多的发射电子可以越过拒斥场，使产生显著的板流。若将板压再提高，则电位分布状况如曲线 3 所示，最大负电位移近阴极而其值较前更小，故板流更大。上述曲线 2 与 3 所示情形均与 I_a-U_a 特性曲线的正值上升部分相当。

板压如果更提高，则当足够大的拒斥场就消失了，极间电位分布状况如曲线 4 所示：这时阴极发射的电子全部可以流到板极而使板流达到饱和——相当于特性曲线的平坦部分。

最后，为了使对空间电荷所形成最低电位及位置具有正确的概念，在这里作再一次说明：在正常运用状态下的放大管中，最大负电位约等于十分之几伏，其位置距阴极不过百分之几或十分之几毫米。

第三节 二极管的特性曲线和二分之三次方定律

二极管在使用中通常令其阴极加热电压保持不变，而改变板压以改变板流，所以其特性曲线以伏安特性—— I_a-U_a 特性曲线为最常用，而且以这一特性曲线中与空间电荷作用的状态相对应的那一段最为重要。可以证明，在这种工作状态下，板流是对板压的二分之三次方作比例性变化的，如下式所示：

$$I_a = gU_a^{3/2}, \quad (2-1)$$

式中的 I_a 代表板流（毫安）； U_a 代表板压（伏特）； g 为一常数，是由板阴两极的面积与形状以及该两极间的距离所决定，上式称为二极管的二分之三次方定律。

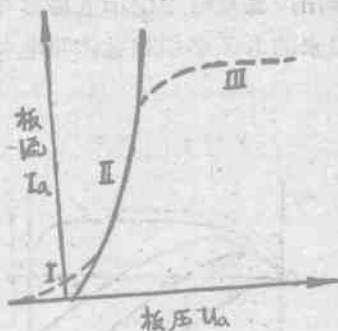


图 2-10 二分之三次方定律。

此二分之三次方定律是在电子发射初速为零值的假定条件下推得的，如图 2-10 中实线所示的半立方抛物线形的 I_a-U_a 曲线。如前所述，实际上的 I_a-U_a 曲线是与此理想曲线略有差别的，特别是以曲线上下两端的差别程度为最显著，如该图的虚线所示。其原因是由于发射电子离开阴极时具有相当初速，在板压略负时，发射电子仍可克服负板压的阻力而到达板极，所以曲线不从原点开始而由第 I 段虚线部分产生。此外，由于在一固定阴极加热电压下，阴极的发射电流是有一定限制的，所以当板压增至充分程度时板流停止上升而有第 III 段的虚线部分。

但是，二极管通常是工作于第 II 段的实线部分内，这一段曲线大致与理想的二分之三次方定律曲线相符合；特性曲线第 II 段的中部看起来与直线很近似，有时为了计算线路简便起见，通常用直线方程式 $I_a = SU_a$ 来代表整条特性曲线。此外，特性曲线的下面部分在许多场合下可以用平方关系： $I_a = CU_a^2$ 来表示。

第四节 二极管的参数

在二极管的应用中, 采用上述的特性曲线往往是不方便的。为此, 通常采用比较简单的所谓二极管的参数, 这些参数是从二极管的实有特性曲线求出来的。

伏安特性曲线 (即 I_a-U_a 特性曲线) 上任何一点的切线的斜率 (图 2-11) 称为「板导」 (又名特性曲线的斜率), 以 S 表示之。从给定点板导本身的定义可见:

$$S = \lim_{\Delta U_a \rightarrow 0} \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} = \frac{dI_a}{dU_a} = \frac{d}{dU_a} (gU_a)^{3/2} = \frac{3}{2} gU_a^{1/2} \text{ (毫安/伏)}。 \quad (2-2)$$

实际计算中, 有时引用平均板导 S_{cp} 的概念, 它由下式决定:

$$S_{cp} = \frac{I_a}{U_a} = \frac{gU_a^{3/2}}{U_a} = gU_a^{1/2}。 \quad (2-3)$$

从这里很容易看出 S 和 S_{cp} 的关系为:

$$S = \frac{3}{2} S_{cp}。 \quad (2-4)$$

时常常用 S 的倒数来代替它, 而称之为二极管的「内阻」, 等于:

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a} = \frac{1000}{S} \text{ (欧姆)}。 \quad (2-5)$$

显然, R_i 对交流电 (当 I_a 和 U_a 变化很小时) 具有电阻的物理意义, 它和从欧姆定律求出来的电子管对直流电的电阻 R_0 不同, 而后者等于:

$$R_0 = \frac{U_a}{I_a}。 \quad (2-6)$$

二极管的一个很重要的参数是最大板极耗散功率 $P_{a, max}$ 。板极是管内发热零件之一, 因为阴极发射的电子在到达板极时, 它在板阴两极之间加速电场中获得的动能完全传给板极, 从而使板极温度升高。如果到达板极的每一个电子具有动能 $\frac{mv^2}{2} = eU_a$, 而每秒钟有 n 个电子到达板极, 则电子流的总动能等于 neU_a , 但 $I_a = ne$, 所以传给板极的功率等于:

$$P_a = I_a U_a \text{ (瓦)}。 \quad (2-7)$$

而板极就必须把由这功率转变的热量发散出去。

一定材料和结构的板极只能允许一定的最大耗散功率。所以, 在使用时必须注意之, 否则二极管会过热, 板极温度将升至危险程度而致其损坏。

根据上述可见, 欲求提高电子管的额定功率, 必须增加其散热率。功率不超过 1 千瓦的小型管与中型管, 均用自然辐射散热法, 功率极大的电子管, 通常是用铜制板极, 并用空气或水来强迫冷却。

二极管的另一个重要参数是它的最大容许反峰板压。

二极管板极上加上交流电压以进行整流时, 在外加交流板压的正半周内有板流产生, 板流在板极负载上产生电压降, 所以板压经常低于外加交流电压。但是在外加交流板压的负半周内, 并没有板流产生, 二极管成开路状态, 外电路的电压完全加在板极上, 所以二极管于外加电压负半周内所受的电压远大于正半周内所受的电压。二极管所能耐受的最大反向板压, 称为最大容许反峰板压。

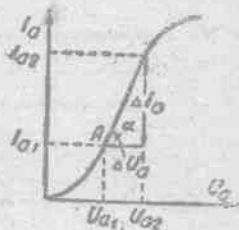


图2-11 求参数的图解。

二极管所能耐受的反峰电压的限度决定于：管内残气压力，板极发生不需要的电子发射的可能性和极间绝缘体的耐压程度。

管内残气产生电离，板极发生热电发射（例如氧化物阴极的钨钨因蒸发而凝紧在板极上），场致发射（例如板极发生尖端效应）或板阴两极间的绝缘不良，均使反峰板压降低。

二极管所受的反峰板压超过其耐受限度时，则将于外加交流板压的负半周内发生一种反电弧的弊病。反电弧不仅使二极管丧失整流作用，而且极易损坏二极管本身与其附属设备。

第五节 小功率二极管的主要类型

二极管主要用来作整流和检波，其原理我们将在以后详加讨论。

检波用的二极管，其工作电流较小，因此电极和外壳都较小，现在最常用的是双二极管（6X6 和 2X1 型电子管）。

在低压的单相交流整流中，最好采用全波整流，因此在整流线路中应用的小功率二极管，在大多数情况下，都是制成双板极的。

在电源功率不超过数十瓦的设备中，如电流小于 100 毫安和已整流电压在 500 伏以下时，一般都采用 5U4C 型或 5Y3 型全波整流二极管（如果电流小于 70 毫安和已整流电压在 400 伏以下时也可采用 6U4II 型全波整流二极管）。在功率较大的整流器中都使用直热式氧化物阴极的 5U3C 型或 5U4 型二极管整流管。

在高压整流中，由于考虑到绝缘问题，所有的二极管都只有一个板极，例如在电子射线管的电源整流器中，一般采用氧化物阴极的 1U1C 型和 2U2C 型半波整流二极管。