

中等专业学校交流讲义

工业电子学

上海电机制造学校等編

学校内部用书

中等专业学校交流讲义



工业电子学

上海电机制造学校等編

学校内部用书

中国工业出版社

本书是按中等专业学校工业电子学课程的要求编写的，适合于除电
訊外的电工专业用。

在内容编排上，着重于物理概念的阐明和定性的分析。在介绍电子学
的物理基础和电子管的基本工作原理后，对整流、放大和振荡等基本环节
作了讲述，最后对工业上应用的电子离子拖动，电子仪器的线路和工作原
理进行了探讨，其中可控整流讲得较为详细，半导体元件也单独列为一
章，在附录中还收集了电阻电容元件的表示法，电子管的参数等资料，可
作为工程应用时参考。

工业电子学

上海电机制造学校等编

*

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·各地新华书店经营

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $11 \frac{7}{8}$ · 字数 268,000

1961年7月北京第一版·1961年7月北京第一次印刷

印数 0,001—7,033 · 定价(9-4)1.15元

统一书号: 15165·530(-92)

前 言

为了适应社会主义建設大跃进的形势和现代科学技术的要求，許多专业加强了或单独开设了「工业电子学」課程。但到目前为止，还缺少一本合适的教材。

这本教材是在总结部分学校教学經驗的基础上，結合目前各校的具体情况而編写的。为了适应不同专业的要求，使教材有較大的通用性，基本上按照教学时数較多的教学大綱編写。其他专业可以按不同的教学大綱进行选择。

在体系的安排上，前面部分为基础知識，后面部分为具体綫路及应用。本书中标以(*)号的章节在讲授时可以根据具体情况予以精簡或删除。

在內容的深度上，以加强基础，加强理論联系实际为主，着重于物理概念的闡明和作定性的分析。

內容的編排是将电子管并为一章，但是对于特种电子管如閘流管，阴极射綫管等則还是結合使用情况一起討論。在第三、四章中，系統地对整流电路作了分析，考虑到强电方面的整流，增編了单阳极水銀整流器的应用及其控制电路，对可控整流作了較詳細的介紹。第五章至第七章是电路的基础部分，对于各种类型放大器及振荡电路进行一定的分析和計算。考虑到自动控制方面的应用，适当地介紹了相敏放大器及触发电路。第八章至第十章概括地闡述了半导体，电子控制，电子仪器等基本原理，其中对离子管在工业中的应用，作了較詳細的論述，此外还結合一定的实例，介紹了电子調整器的原理和应用。书末还增編了附录，以供設計时参考。

本书由上海电机制造学校、北京无綫电专业学校、石家庄电机制造学校部分教师集体編写。由于時間仓促以及編者水平有限，錯誤和缺点在所难免，希望各地教师、讀者能提出宝贵意見，以便今后修訂。

編 者

1961年5月1日

目 次

前言	3	§ 5-10 推挽式功率放大器	92
緒論	5	§ 5-11 相敏放大器	93
第一章 电子学的物理基础	6	§ 5-12 直流放大器	95
§ 1-1 原子和电子	6	§ 5-13 放大器的应用举例	96
§ 1-2 自由电子在均匀电场中的运动	7	第六章 反馈放大器	99
§ 1-3 电子在磁场中的运动	8	§ 6-1 概述	99
§ 1-4 电子发射	10	§ 6-2 反馈的基本理论	99
第二章 电子管	16	§ 6-3 负反馈	100
§ 2-1 二极管(二极管)	16	§ 6-4 实用的负反馈电路	102
§ 2-2 三极管	19	§ 6-5 阴极输出器	104
§ 2-3 多极管	22	第七章 电子管振荡器	107
§ 2-4 复合管电子射线管	25	§ 7-1 概述	107
第三章 电的整流	27	§ 7-2 最简单的振荡回路	108
§ 3-1 概述	27	§ 7-3 振荡应具备的基本条件	108
§ 3-2 整流元件的分类和要求	27	§ 7-4 反馈振荡器的起振条件	111
§ 3-3 用理想整流元件的单相半波和全波整流电路	29	§ 7-5 三点式振荡电路	113
§ 3-4 用实际整流元件的单相半波和全波整流电路	36	§ 7-6 阻容振荡器	114
§ 3-5 倍压整流电路	38	§ 7-7 高频电热的原理和应用	118
§ 3-6 三相整流电路	39	§ 7-8 多谐振荡器	121
§ 3-7 并联复式半波整流电路	43	§ 7-9 触发电路	123
§ 3-8 输出电压中的交流成分和相数 m 的关系	46	第八章 半导体元件及其应用	126
§ 3-9 滤波器	46	§ 8-1 概述	126
第四章 离子管及其应用	51	§ 8-2 半导体工作的物理基础	126
§ 4-1 气体放电的基本现象	51	§ 8-3 半导体整流器	129
§ 4-2 气体放电的方式	52	§ 8-4 三极管	133
§ 4-3 辉光稳压管	53	第九章 电子控制及离子拖动	138
§ 4-4 热阴极充气二极管	55	§ 9-1 电子继电器	138
§ 4-5 闸流管	59	§ 9-2 光电元件及其控制	141
§ 4-6 多相可控整流	65	§ 9-3 电阻电焊及其控制	145
§ 4-7 逆换流器	66	§ 9-4 离子拖动的主要电路	149
§ 4-8 水银整流器	67	§ 9-5 电子和离子调整器	150
§ 4-9 栅控水银整流管的控制	70	第十章 电子仪器	153
§ 4-10 引燃管	73	§ 10-1 电子管伏特计	153
第五章 电子管放大器	75	§ 10-2 电子示波器	157
§ 5-1 电子管放大器的基本原理	75	§ 10-3 电子示波器的应用	164
§ 5-2 放大器的等值电路	77	§ 10-4 电子交换器	167
§ 5-3 放大器的分类、效率、畸变	79	§ 10-5 音频振荡器	169
§ 5-4 阻容耦合放大器	81	§ 10-6 电子稳压器	171
§ 5-5 放大器的设计	84	§ 10-7 积分电路和微分电路	173
§ 5-6 变压器耦合放大器	86	附录	176
§ 5-7 调谐放大器	88	附录一 电路元件	176
§ 5-8 功率放大器	89	附录二 电子管的编号系统	177
§ 5-9 五极管及束射管功率放大器	90	附录三 阻容耦合低频电压放大器典型线路参数	181
		附录四 硒整流器参数	183
		附录五 三极管参数	188

緒 論

〔工业电子学〕是研究无綫电电子学在工业生产上应用的一門新兴而独立的科学。具体的說，〔工业电子学〕是基于真空中，气体中和半导体中的导电现象，进而研究电子管，离子管和半导体器件的作用原理及其在工程方面应用的科学。

电子学最早应用在通訊方面，后来，随着工业迅速发展，已广泛的应用在各个方面。現在無論是在天文、地理，还是在工、农、医务等各个领域里，都获得了光輝的成就。由于电子学在工业上应用范围的日益扩大和迅速发展，因此就形成了一門新兴而独立的科学——〔工业电子学〕。由于工业电子学的应用，在很多技术领域，提高了各种生产机械的工作效率，扩大了自动控制的范围，創造了新的工艺并改善了劳动条件。

电子学在工业上的应用基本上可以分为以下几个部分：

(1) 遙控遙测，远距离操纵技术：像在水力发电站中，水輪发电机的接通与切断，高压变压器的接通与断开都可用电子技术进行遙远的控制，这就是遙控。又譬如一个水力发电站里几百个电表的讀数可以应用电子技术傳送到很远的地点，这便是遙测。此外通过电子控制的方法，还可以控制与監視相隔几百里外的水力发电站的运轉情况。

(2) 自动控制，自动調整，自动記錄的电子技术：譬如利用电子技术进行工作的程序控制自动車床。又譬如工业上自动化的最高形式——自动工厂，其实质上是采用了电子计算机、工业电视以及各种精确的电子仪器的相互配合而得到实现的。

电气化、自动化的推广，将大大減輕人的体力劳动，迅速地发展生产，提高工作效率，改善劳动条件，使祖国的社会主义經济建設获得更大的跃进。

(3) 电子测量技术及电子仪器：利用电子器件制成的电子仪器已广泛用于各种場合（不論是电的或者是非电性的場合）。它既能精确测量极为微弱的物理量，也能稳定地测量出頻率較高的某些量，便利于科学技术的研究。

(4) 在电力方面极为有用的整流技术：利用电子管、半导体、离子管可极为簡便可靠地，将交流电变为直流电，以作为电站、矿井及各种企业的直流电源。同样，我們也可利用电子管振荡器，将直流变为交流，并且可达很高的頻率，用来作高频加热。

(5) 其他方面的应用：利用电子器件制造的超声波发生器，能够进行切削、钻孔、洗濯焊接及加速化学反应等。

由于工业电子学是无綫电电子学应用于工业而发展成的一門科学，因此，工业电子学的发展，与无綫电电子学的发展是分不开的。无綫电电子学在工业上的最早应用是整流，以后，随着工业上新技术的出現以及电子学的发展，大大地推进了工业电子学的发展，使它在工业上的应用面更为广泛，反过来又促进了工业的发展。今天看来，在工业上，凡是精密可靠的自动控制系统，几乎都有它参加，而且占有相当重要的地位。

近几年来，在党的英明领导下，我国电子工业得到了空前的发展。尤其是1958年大跃进以来，一些尖端的设备都先后試制成功；特别是大搞技术革新和技术革命运动以来，我国某些工厂的生产部門采用了无綫电遙控及电子设备。这些都标志着我国电子事业的偉大成就。毫無疑問，在党的英明领导和总路綫的光輝照耀下，我国电子事业必将得到更迅速的发展。

第一章 电子学的物理基础

§1-1 原子和电子

我們知道, 任何物质都是由原子构成的; 而每个原子又是由位居中心直径約为 10^{-12} 厘米的原子核和在直径約为 10^{-8} 厘米范圍内圍繞着原子核高速运行的电子所組成。原子核由质子和中子組成, 它們的质量是相等的, 都很重, 两者几乎集中了整个原子的质量。质子带正电, 中子不带电, 因此原子核带正电。在一个原子中, 电子的数量与质子的数量相等; 电子是带負电的, 而且每一个电子所带的电量也和质子所带的电量相等, 因此, 圍繞原子核运行的全部电子所具有的总的負电荷, 等于該原子的原子核中全部质子所具有的总的正电荷。所以, 整个原子是呈中性的。

电子是带負电荷的最小微粒。所有其他微粒所带的电荷, 总是电子所带电荷量的整倍数。由实验測定电子所带的电荷量为:

$$e_0 = 1.601 \times 10^{-19} \text{ 庫倫}$$

亦即, 一个庫倫的电量等于 6.25×10^{18} 个电子的电量。

研究电子在电场和磁场里的运动, 可以測定电子的电荷量与其质量的比值是一个常数:

$$\frac{e_0}{m_0} = 1.76 \times 10^{11} \text{ 庫倫/千克} \quad (1-1)$$

但必須指出, 这是在电子的运动速度与光速比較可以略去不計的条件下測得的结果。事实上, 我們从近代理論概念推导的结果中可以知道, 物体的质量是随着它的速度增大而增加的^①。如果物体的运动速度跟光速相近, 那么质量就有了很显著的变化。然而对一般运动物体來說, 它的速度比光速小得多, 因此, 质量的变化极不显著, 可以忽略。

从 (1-1) 式中, 我們可以算得电子的质量为:

$$m_0 = \frac{e_0}{1.76 \times 10^{11}} = \frac{1.601 \times 10^{-19}}{1.76 \times 10^{11}} = 9.1 \times 10^{-31} \text{ 千克}。$$

元素中, 质量最輕的是氢原子, 而电子的质量比氢原子的质量要小1845倍, 显然, 电子的质量是很小很小的。但由 (1-1) 式可知, 电子的每单位质量所带的电荷却比其他任何质点大得多, 因此, 我們可以认为电子是富于电荷的质点。同时, 电子的慣性很小, 这些都是电子的重要性质。

电子的物理結構, 和其他一些原子的各种組成粒子一样, 在今天还不够清楚, 不过, 根据近代物理概念, 它是一种极其复杂的电磁組合, 它不仅带有电荷, 而且还有旋轉力矩

注① 任何物体在运动时, 它的质量按下式变化:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

式中: m_0 为静止物体的质量;

v 为物体运动的速度;

c 为光速。

和与此相关的磁矩。但是在一定的範圍內，說电子是一种物质的实体，占有非常小的空間，帶有一定数量的电荷，具有很小质量的最小粒子。对我们來說，有这样的概念已經足够了。

此外，我們知道，电子可能处于几种不同的状态。这就是說，它可能是組成原子体系的不自由（束縛）电子或者在金屬原子間运动的半自由电子和在真空或稀薄空气中运动的自由电子。

同时，我們还必须說明，在一定条件下，原子可以失去与它联系較弱的外层电子，或者在原子的电子壳层中，获得多余的电子，这时本来是电中性的原子，就不再呈中性了。显然，失去部分电子的原子呈現正电，我們称它为正离子；获得多余电子的原子呈現負电，我們称它为負离子。

§1-2 自由电子在均匀电场中的运动

电子是帶負电的微粒，在电场中，它要受电场力的作用作定向加速运动。

設电子的初速为零，在均匀电场中受到电场力 f 的作用，要逆着电场力运动，如图1-1所示。

由电工理論中知，电场所作的功，等于电子电荷 e_0 与电子所經過的电位差 U 的乘积：

$$A = e_0 U \quad (1-2)$$

电子的能量单位常用 [电子伏特] 表示。1 [电子伏特] 就是指电子在电场中經過 1 伏特的电位差所获得的能量。因为 1 庫侖电荷經過 1 伏特的电位差电场所作的功等于 1 焦耳，所以：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 电子伏特} &= 1.601 \times 10^{-19} \text{ 庫侖} \times 1 \text{ 伏特} \\ &= 1.601 \times 10^{-19} \text{ 焦耳} \end{aligned}$$

由动力学中知，电子的动能是：

$$W = \frac{1}{2} m_0 v^2 \quad (1-3)$$

电子所获得的动能，等于电场对它所作的功，所以从 (1-2)(1-3) 两式，可以决定在极际真空間任何点止的电子速度：

$$v = \sqrt{\frac{2e_0 U}{m_0}} \quad (1-4)$$

将电子质量 m_0 和所带电荷 e_0 的数值代入上式得：

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 1.601 \times 10^{-19} U}{9.1 \times 10^{-31}}} \approx 600 \sqrt{U} \text{ (千米/秒)} \quad (1-5)$$

式中 U 以伏特为单位。

由 (1-5) 式可知，电子的速度和 $\sqrt{U}$ 成正比，因此可以按照它所經過的电位差 U 的数值来决定电子速度。

表 (1-1) 表示电子速度和它所經過的电位差的关系。

由表 (1-1) 可見，电子在电场中，很容易动，加速度很大。例如电子在两个相距不

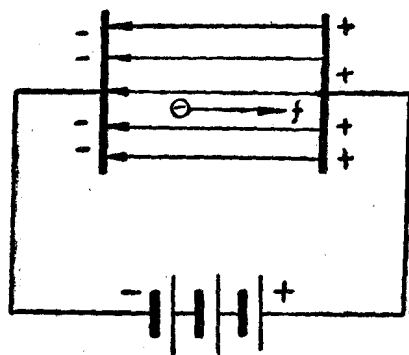


图1-1 电子在均匀电场中运动的方向。

表1-1 电场中电子的速度

U (伏)	0.1	1	4.5	10	100
v (千米/秒)	186	595	1,260	1,860	5,950

大, 电压不高的电极板间运动, 往往在几毫微秒(10^{-9} 秒)的时间内就能由负极板到达正极板。因此一般电子器械在工作时, 可以认为是没有惯性的。无怪电子控制极为迅速正确。

必须指出, (1-5) 式是在 $U < 20000$ 伏的条件下, 可以近似认为是正确的, 否则, 电子速度太大, 质量的增加很显著, 该式就不正确了。

§1-3 电子在磁场中的运动

在讨论电子在磁场中运动之前, 我们首先要确定电子在磁场中所受的力。

一个带电质点在磁场中运动, 所受力的方向与运动的方向(即电子速度的方向)与磁场方向垂直, 并且可以按照[左手定则]决定, 如图(1-2)所示。其力的大小与一个载有电流的导体在磁场中所受的力相同。

从电工理论中知, 一导体载有电流 I 置于一磁通密度为 B 的磁场中, 所受的力大小为:

$$f = B l I \sin \varphi \quad (1-6)$$

每单位长度导体所受的力大小为:

$$F = \frac{f}{l} = B I \sin \varphi \quad (1-7)$$

式中 φ 为磁场方向与电流方向的夹角; 力的方向与导体及向量 B 所成平面垂直。

我们知道, 导体的电流:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{e_0 n l}{t} = e_0 n v \quad (1-8)$$

式中 n 为单位长度导体中电子的数目;

e_0 为电子的电量。

将 (1-8) 式代入 (1-7) 得:

$$F = B e_0 v \sin \varphi \quad (1-9)$$

由于电子速度方向永远与磁场内作用于电子的力垂直, 磁场力并不做功, 因此, 电子在磁场里的速度数值大小和能量不随时间而变, 起变化的只是速度的方向。也就是说, 这时, 电子在不断地改变着它的运动方向。

下面, 我们来讨论电子以不同初速进入均匀磁场的运动情况:

(1) 电子初速为零 ($v_0 = 0$):

将 $v_0 = 0$ 代入 (1-9) 式中知, $F = 0$ 。这说明, 对于静止不动的电子, 磁场对它没有什么作用。

(2) 电子初速不等于零 ($v_0 \neq 0$):

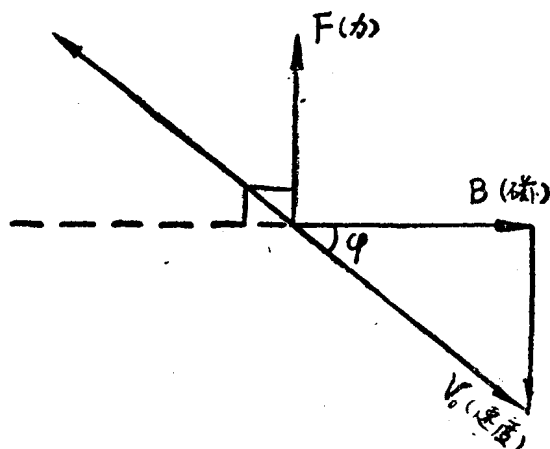


图1-2 带电质点在磁场中受力方向图。

显然, 此时除了电子速度方向与磁力线平行外, $F \neq 0$ 。这说明, 对于运动的电子, 并且其速度方向与磁力线夹角 $\varphi \neq 0^\circ$, 磁场将对它有作用。

对于初速不等于零的电子在磁场内又有下面几种受力情况:

(i) 电子初速与磁场方向一致 ($\varphi = 0^\circ$) 或者是相反 ($\varphi = 180^\circ$), 也就是说, 电子是沿着磁力线运动, 如图 (1-3) 所示。由于 $\sin\varphi = 0$, 即 $F = 0$, 因此, 电子将继续以初速 v_0 作直线运动, 周围磁场对它不起作用。

(ii) 电子初速与磁场方向垂直 ($\varphi = 90^\circ$), 则 $\sin\varphi = 1$ 。此时, 作用在电子上的力:

$$F = Be_0 v_0. \quad (1-10)$$

力的方向是垂直于电子运动的方向, 并且是在运动轨道的法线方向上; 给电子的加速度是一个恒定的向心加速度。

此向心加速度:

$$a = \frac{v^2}{R}, \quad (1-11)$$

R 为曲率半径, 此曲率半径可由 (1-10) 和 (1-11) 两式求得:

因为:

$$F = Be_0 v_0 = m_0 a = m_0 \frac{v_0^2}{R},$$

所以:

$$R = \frac{m_0 v_0}{Be_0}. \quad (1-12)$$

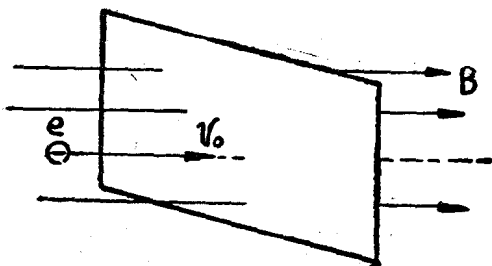


图1-3 电子沿着磁力线方向运动。

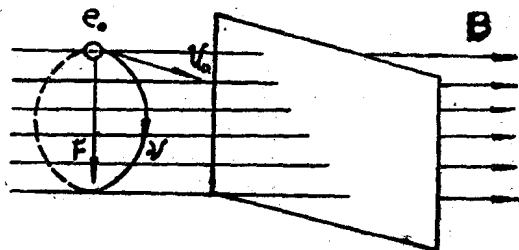


图1-4 电子受力后做圆周运动。

由 (1-12) 式可知, 曲率半径 R 是常数, 也就是说, 此曲率半径在电子运动时不变, 因此, 电子此时的运动轨迹是一个圆; 或者说, 电子受力后作圆周运动, 如图 (1-4) 所示。

(iii) 电子初速与磁场方向相交 φ 角, 如图 (1-5) 所示。可将初速 v_0 分解成两个分速:

a) 平行于磁力线的分量 v_{0r} 。此分量使电子沿磁力线方向作等速直线运动, 与上述 (i) 情况同。

b) 与磁力线垂直的分量 v_{0n} 。此分量使电子沿圆周轨道运动, 与上述 (ii) 情况同。

显然, 在这两种分速的同时作用下, 电子将沿着螺旋线运动。如图 (1-5) 所示。

由于螺旋线半径只与垂直分速 v_{0n} 有关:

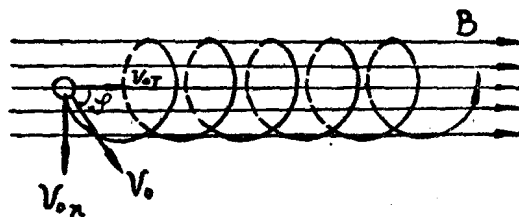


图1-5 电子沿螺旋状运动。

$$R_n = \frac{m_0 v_{0n}}{Be_0} \quad (1-13)$$

因此，电子沿螺旋线走一圈所需时间：

$$\tau = \frac{2\pi R_n}{v_{0n}} = \frac{2\pi m_0 v_{0n}}{v_{0n} B e_0} = \frac{2\pi m_0}{B e_0} \quad (1-14)$$

这说明，电子作圆周运动一周所需时间只与磁场强弱有关，与电子的初速是无关的。

电子沿螺旋线走一圈后的水平方向位移距（又称匝距）：

$$h = \tau v_{0T} = 2\pi \frac{m_0 v_{0T}}{B e_0} \quad (1-15)$$

这说明，电子沿螺旋线走一圈后的水平方向位移距与水平方向的运动速度和磁场强弱有关。因此，如果一束电子以同样的水平分速进入均匀磁场，那么，在每一匝距处，都将会聚在一起，永不分开。显然，这对控制来说，有很大好处。

根据以上分析，可得结论：磁场对电子的作用跟电场不同，它只有当电子本身运动时，而且运动方向与磁力线相交时，才起作用。

§1-4 电子发射

所谓电子发射，是指金属体内的自由电子，大量地脱离金属而自由逸出的现象。

我们知道，金属中原子的相互距离是很近很近的，原子最外层的电子（所谓价电子）不仅处于本原子核的电场里，还处于相邻原子核的电场里，并且它与原子核的联系较弱，可在原子间自由运动，成了半自由电子，或自由电子。这些电子就沿着各种可能的方向在原子和离子间作不规则的热运动。金属的导电性也就是由于有这些自由电子存在的缘故。

半自由电子和自由电子只能在金属内部作不规则的运动，虽然也会向金属表面飞去，但在平常条件下，却不能飞出金属

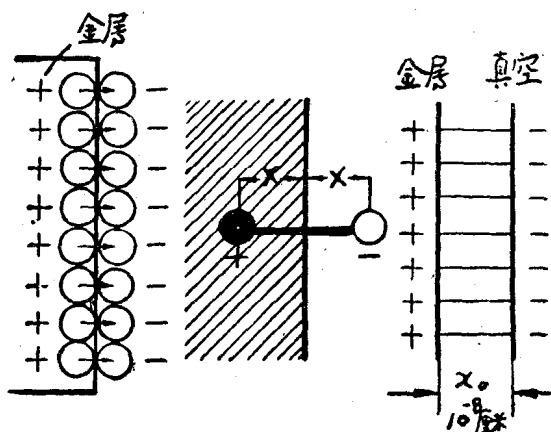


图1-6 金属内形成偶电层的结构示意图。

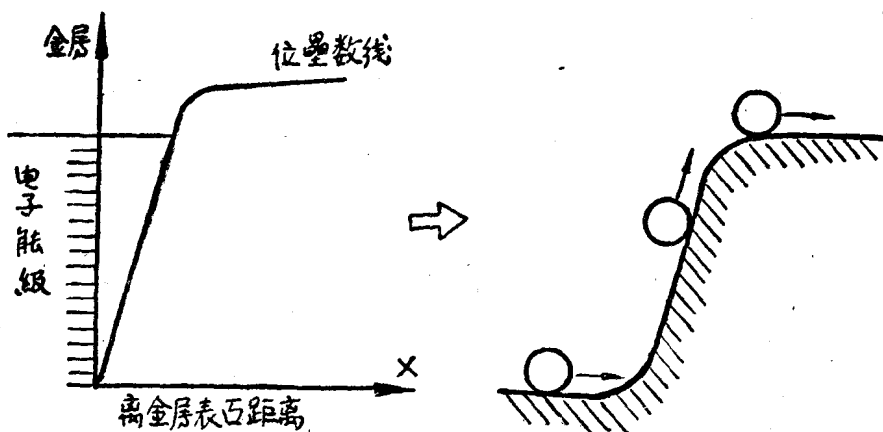


图1-7 电位壁垒图。

之外。因为当电子离开金属表面时，金属表面就带了正电荷，同时，从金属内跑出的电子在金属表面附近造成一个带负电的〔电气层〕，于是两者便形成了〔偶电层〕，如图(1-6)所示。由于偶电层的存在，使电子进入偶电层区域时，要受带负电的〔电气层〕的斥力，和金属表面正电荷的吸力，因此又返回金属表面而不能飞出金属之外。这也相当于在金属和空间交界处有一位壁垒，它阻碍着电子逸出，如图(1-7)所示。显然，只有在电子的初速很大，具有足够大的动能去克服这电场的斥力和吸力(或者说去克服位壁垒的障碍)，电子才可能从金属表面逸出。

电子能够从金属中逸出所需的最低能量称逸出功。
逸出功用符号 φ 表示，并且以电子伏特为单位。

当满足下列条件时，才能使电子从金属中逸出：

$$\frac{mv^2}{2} \geq e\phi \quad (1-16)$$

各种金属的逸出功并不相同，表(1-2)列出一些

金属逸出功的数值。显然，逸出功小的金属要比逸出功大的金属容易发射电子。

金属体的电子发射，按能量获得的不同，可分为下列四种方式：

(1) 热电发射：它是靠外界供热，提高金属的温度，使其中电子热运动加剧后，获得足够的动能克服位壁垒的障碍而大量发射出来。

(2) 光电发射：由于光的照射，使电子获得光能而克服障碍大量逸出。

(3) 二次电子发射：金属体由于受到高速电子或其他粒子撞击而发射电子称二次发射。撞击的高速电子称为一次电子，被撞击出来的电子称二次电子。

(4) 场致发射(又称高电场发射、冷发射)：在高电场作用下，金属板表面电子被硬拉出来而形成的电子发射。

下面，我们要讨论各种形式的发射情况，其中着重讨论热电发射。因为除了光电管和冷阴极管外，我们一般接触的大部分电子管的阴极几乎都是利用热电发射的方式进行工作的(所谓电子管阴极一般是指电子发射极)。

(一) 热电发射

金属中的电子从被加热的金属中发射出来的现象称为热电子发射。这种发射，称为热电发射。

热电发射的电子流密度主要决定于两个因素：

(i) 加热的温度：加热温度愈高，金属中自由电子和半自由电子的热运动愈剧烈，于是发射出来的电子数目也愈多。

(ii) 发射电子物体的逸出功：显然，发射物体的逸出功愈低，则在同一温度下，它愈容易发射。

从炽热的金属表面发射出来的电流密度 J_e 与金属体的加热温度及逸出功的关系，可用里查孙-德许曼方程式来表示：

$$J_e = AT^2 e^{-\frac{\varphi}{KT}} \text{ 单位为安/厘米}^2 \quad (1-17)$$

式中： A 为常数。对于所有纯金属约等于 $(60 \sim 200) \text{ 安/厘米}^2 (\text{°K})^2$ 。

表 1-2

金属	逸出功 (电子伏特)	金属	逸出功 (电子伏特)
铯	1.81	钽	4.07
钡	2.11	镍	4.38
钙	2.24	铂	4.41
钪	3.35	钨	4.52

K 为波尔兹曼常数。等于 8.63×10^{-5} 电子伏特/ $^{\circ}\text{K}$

e 为自然对数的底。等于 2.71828

T 为金属的绝对温度。

φ 为逸出功，单位为电子伏特。

从 (1-17) 式中可见，温度 T 和逸出功 φ 对发射电流数值影响较大。因此，要得到较大的发射电流，必须把发射体加热到很高很高的温度。例如说，像纯金属制的发射体，它的工作温度要在 2400° 到 2700°K 之间，这温度很高，已使发射体达到白炽程度了。

下面我们举个例子来计算一下在温度为 2500°K 时，钨发射体中发射出的电流密度。

纯钨的逸出功为 4.52 电子伏特，并取系数 $A = 100 \text{ 安/厘米}^2 (\text{K})^2$ ，把这些数值代入 (1-17) 式得：

$$\begin{aligned} J_e &= AT^2 e^{-\frac{\varphi}{KT}} = 100 \times 2500^2 e^{-\frac{4.52}{8.62 \times 10^{-5} \times 2500}} \\ &= 625 \times 10^6 e^{-20.98} = 625 \times 10^6 \times 0.774 \times 10^{-9} \\ &= 0.483 \text{ 安/厘米}^2. \end{aligned} \quad (1-18)$$

我们再来看看，如果发射体的温度下降到 1800°K （黄热）发射电流密度有何变化。此时：

$$\begin{aligned} J_e &= 100 \times 1800^2 e^{-\frac{4.52}{8.62 \times 10^{-5} \times 1800}} \\ &= 324 \times 10^6 e^{-29.1} = 324 \times 10^6 \times 0.23 \times 10^{-13} \\ &= 0.745 \times 10^{-4} \text{ 安/厘米}^2 \\ &= 74.5 \text{ 微安/厘米}^2 \end{aligned} \quad (1-19)$$

由 (1-18) 和 (1-19) 两式比较可见，温度对发射电流有很大的影响。当发射体的温度减少 28% 时，发射电流减少到原来的 $1/6500$ ，极为可惊！

由上面的讨论中可以得出这样的结论：用来作为热电发射的阴极材料必须满足：

- (i) 具有小的逸出功；
- (ii) 能经受得起高温（熔点要高）。

此外，还需满足：机械强度高，电子发射要稳定，不容易损坏，便于加工处理等。

实际上作为热电发射的阴极材料可分为三类：

(i) 具有相当大的逸出功。要电子逸出，必须供给较大的热能。不过此种材料耐热性较好，能够在高温下工作。寿命也比较长。像钨、钼、钽等金属便属此类。此种材料多用于高电压（5000V 以上）的大型电子管中。

(ii) 具有较小的逸出功，要电子逸出，只需在比较低的温度下工作。这一类阴极材料，有钨、钽的氧化物等。此种氧化物阴极很脆，不宜用于高压场合。因为在高压作用下，正离子以高速度打在阴极上，促使其损坏，同时，此种材料耐热性比较差，寿命也比较短，因此一般用于 1000 伏以下的小型电子管中。像一般常见的无线电和常见的电子仪器的电子管阴极，大都用此类材料制成。

(iii) 此种热电发射阴极材料的逸出功和耐热性都是比较使人满意的，但机械强度不够，较脆。此外，此类材料的发射率较高，不过不甚稳定，日久会衰减。像钨层钨（钨或钨上有钨层），便属于此种热电阴极材料。一般用于中型电子管中。

必須指出，使用此类材料作阴极的电子管最好是处在經常工作状态。若处于断續工作状态下工作，并且間隔時間长，則此类电子管在重新工作前，必須先經過所謂「激活」，来刺激一下，才能使它照常工作。这主要是因为在工作前，此类阴极材料表面要产生一层薄膜，阻碍着以后的电子发射。因此，在使用前，往往就先加比正常加热电压高 1 倍左右的电压刺激一下，让电子「冲破」这薄膜层，大量逸出，使电子管进入正常工作。这也就是所謂「激活」。

常見的热电发射的阴极材料的某些参数見表 (1-3)。

电子管阴极的品质，一般以它的比发射来表示。比发射是由阴极表面每平方厘米上的发射电流毫安数决定 (毫安/厘米²)。有时，电子管阴极的品质也以它的发射效比表示。发射效比是由热电发射的电流除以阴极加热消耗的功率表示的 (毫安/瓦)。比发射和发射效比随阴极运用温度的不同，而有很大的变化。

表 1-3

类别	热 电 阴 极 材 料	$\frac{A}{(\text{°K})^2}$ 安/厘米 ²	ϕ 电子伏特	运用温度 °K
I	鎢	60~212	4.52	2500~2800
I	鉬	51~75	4.38	2000
I	鉭	60	4.07	1900~2200
II	鎢上的二氧化鎢	2.6×10^{-3}	0.81	800
III	鈦层鎢	3	2.63	1200~1300

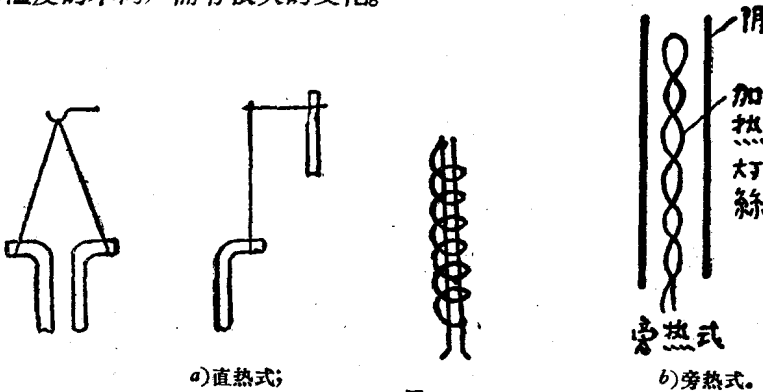


图 1-8

一般在运用温度範圍內，鎢阴极的比发射約为 15~20 毫安/厘米²，发射效比約为 3~7 毫安/瓦。氧化物阴极的比发射約为 50~150 毫安/厘米²，发射效比为 50~100 毫安/瓦。

一般热电发射的电子管阴极灯絲，其加热的方式有二种：(i) 直接加热式 (簡称直熱式)。如图 (1-8 a) 所示。

(ii) 間接加热式 (簡称間熱式)。如图 (1-8 b) 所示

对于逸出功大的，要求在高温工作的材料，(像第一类純鎢和鉬、鉭等阴极材料)，其发射表面必須是直接加热的。直接加热的阴极有一个缺点，就是由于阴极和加热电源有直接的电气联系，因此，加热电源或多或少要影响电子管的正常工作，所以，它往往只适宜用直流加热，而不宜用交流加热。

对于逸出功小的，而且不耐高温的材料(像第二类氧化物阴极材料)，其发射表面通常采用間接加热的。所謂間接加热是加热灯絲和发射表面隔开，两者无电气联系。一般是用一个鎢制的小圓筒，套在发热的鎢灯絲上，并加以絕緣；在鎢筒的表面則塗有氧化物之类的发射效比高的物质作为阴极，如图 (1-8 b) 所示。由于間熱式阴极是利用「烘烤」的方式加热工作的，因此热惰性較大，再加上阴极和加热电源无电气联系，因此，它无直接加热

式的缺点，可以采用交流加热，而且电子发射颇稳定。此外，采用这种方式后，可以将几个处于不同电位的电子管阴极灯丝，串接或并接在同一个交流电源上。显然，直热式阴极电子管就无此优点。

(二) 光电发射

电子从射到金属表面的光中获得能量而逸出称为光电发射。逸出的电子又称为光电子。这种现象又称为表面光电效应。

一般光电管就是按此发射原理制成的。

光有许多不同种类：包括看得见的光，看不见的红外线、紫外线和其他射线（像 x 射线）。但不论是那种光线，它的实质都是高频率的电磁波，含有能量，这些能量由所谓的光量子（即光子）携带。每个光量子所带的能量大小和光波的频率成正比，

$$\text{即：} \quad \varepsilon = h\nu \quad (1-20)$$

式中： h 为蒲朗克常数等于 6.624×10^{-34} 焦耳秒或 6.624×10^{-27} 尔格秒。

ν 为辐射频率（光的频率）。

辐射频率和波长的关系是：

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1-21)$$

式中： c 为光的传播速度，

λ 为波长。

显然，频率愈高，光子含能量也愈大。

如果金属表面的电子从光子中获得的能量，能克服位壁垒的障碍，电子就从表面逸出。多余的能量，便变成电子的动能。因此电子从金属表面逸出后动能等于：

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - e\varphi \quad (1-22)$$

表面光电效应是 1888 年由莫斯科大学 A. Γ. 斯托列托夫教授发现的。他在 1888~1889 年间，曾做了广泛的光电效应的研究。他对当时光电现象的解释加以批判，并提出光电效应的第一定律：

[单位时间内，发射出来的电子数，在其他条件相同的情况下（第 6 页注①），和射到阴极表面的光通量成正比]。

$$\text{即} \quad N = KF \quad (1-23)$$

式中： N 为发射出来的电子数；

K 为比例常数；

F 为光通量。

根据以上分析，表面光电效应具有下列特征：

(i) 光电子的能量与照射光的强度无关，而与照射光的频率成正比。或者说，光电子的速度与光强度无关，而由光频率所决定。

(ii) 光电子数目与照射光的强度成正比。

(iii) 此外，由实验证明，从光的照射开始到电子逸出为止，相隔的时间间隔很小很小，可认为无时间隙。

因为光电阴极表面的电子只有在由光量子获得的能量大于金属的逸出功时，才能从光

表 1-4

材 料	波长限界 λ_0 (埃)①	逸出功 φ (电子伏)
L_i	5,400	1.9~2.7
N_a	5,000	1.9~2.46
K	5,500	1.76~2.25
R_b	5,700	1.8~2.2
C_s	6,600	1.9

① 埃(A)是波长的单位。1埃=10⁻⁸厘米。

频率 ν_0 ，叫极限频率。显然只有在等于或大于这个光频率的光照射光电阴极时，光电阴极表面才能发射电子，否则，不论它的光通量有多大，也不能使电子逸出。

对应于最小光频率 ν_0 的波长 λ_0 称波长限界。由(1-21)式知，只有在等于或小于波长限界 λ_0 的辐射光照射光电阴极时，光电阴极表面才能发射电子。

制造光电阴极的常用材料的 λ_0 和 φ 值列于表1-4。

电阴极中逸出。

$$\text{即 } \varepsilon = h\nu > e\varphi \quad (1-24)$$

$$\text{因此 } \nu \geq \frac{e\varphi}{h} \quad (1-25)$$

$$\text{或者 } \nu > \nu_0 \quad (1-26)$$

$$\text{其中 } \nu_0 = \frac{e\varphi}{h} \quad (1-27)$$

这说明，光电阴极的电子发射，有它一定的光电效应的极限，这极限就是最小的光

(三) 二次发射

高速运动的电子或者离子撞击金属时，就能使金属发射电子，这便是二次发射的现象。撞击金属的高速电子称为一次电子；从金属表面被撞击出来的电子称为二次电子。二次电子中包括有反射回来的一次电子。

二次电子数与一次电子数之比，叫做二次发射系数。

$$\text{即 } \sigma = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{n_2 \cdot e_0}{t}}{\frac{n_1 \cdot e_0}{t}} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1-28)$$

式中 σ 为二次发射系数，

n_2 为二次电子数，

n_1 为一次电子数，

I_2 为二次电流，

I_1 为一次电流。

二次发射系数与金属材料的表面的物理状态，一次电子的速度、入射角等因素有关。

一般情况下，二次发射给我们带来很多不便，所以是我们不希望有的，但也有很多场合，对二次发射加以利用。

(四) 场致发射

场致发射，就是由于高电场的作用而导致的电子发射。当金属表面附近有很大的电场强度(106伏/厘米)时金属表面的电子就因受此电场力的作用，而被硬拉出来，此时，就发生了高电场发射或称冷发射。在普通的低压电子管中，高电场发射是不会产生的，但在某些高电压管子中(像高压的x射线管)就必须注意到这一点，以避免不必要的高电场发射。通常是将电极离得远些，并将它所有的尖角处磨得圆滑些，以减少这些地方的电场强度。

在很多场合，高电场发射是很有用处的。像水银整流器中水银阴极的电子发射主要是靠高电场发射(即常称冷发射)。

第二章 电子管

§ 2-1 二极管电子管 (二极管)

(一) 构造和作用原理 二极管是最简单型式的电子管。它是在高度真空 (不超过 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 毫米水银柱高的剩余气体压力) 的玻璃或金属泡内装置两个金属电极——阳极 a 和阴极 k 。图 2-1 所示是二极管的实际构造。阳极通常是做成筒状或板状 (故又称板极式屏极), 它用以接收电子管中的电子; 阴极

是电子的发射体, 按着它的加热结构型式分为: 直热式和旁热式。在直热式电子管中, 阴极即加热用的灯丝, 而旁热式阴极是依靠灯丝通电流间接使阴极灼热。前者灯丝需用直流电源, 而后者一般都用交流电源。

图 2-2 表示二极管在绘制线路图时所使用

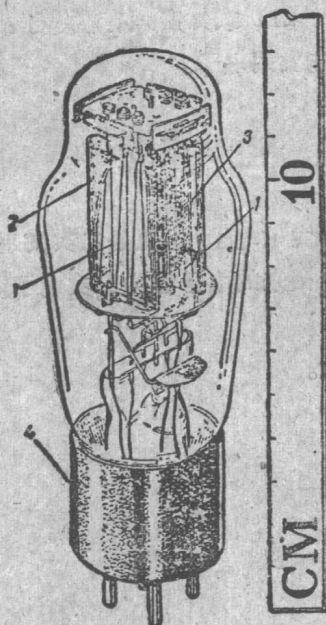


图2-1 BO-188型二极管的内部构造:

1—灯丝(即阴极); 2及3—阳极; 4—管颈。

的代表符号。为了简化线路图, 旁热式电子管的灯丝经常不画出。

二极管的作用原理可以用图 2-3 加以说明。如果在阳极加上对阴极为正的电位时, 则从加热后阴极发射出来的电子, 在电场的作用下飞向阳极, 因此在电源 E_a 和电子管组成的阳极回路中构成通路, 形成电流——称为阳极电流。此时称电子管[导电]。如果阳极电位较阴极为负, 管内电场力将阻止电子向阳极的运动, 发射的电子被排斥返回阴极, 则阳极回路在电子管处中断, 没有电流通过, 此时电子管[不导电]。由以上可以得

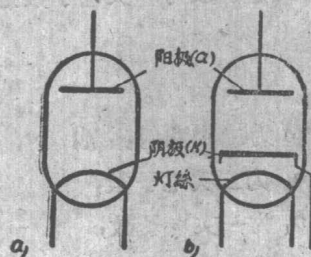


图2-2 二极管在线路图中的符号:

a) 直热式; b) 旁热式。

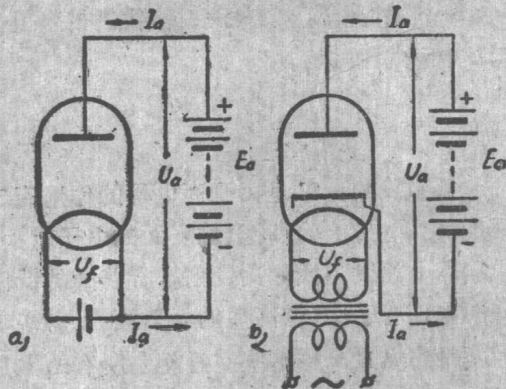


图2-3 二极管的线路图。