

编号:



283852

管子

(上册)

成 电



北京科学教育出版社

1961年7月

目 录

緒 論	6
第一章 电子发射	11
§ 1 电子发射的基本規律	11
1.1 热电子发射現象	11
1.2 金属中的傳导电子	11
1.3 电位壁垒和逸出功	12
1.4 电子发射的形式	13
§ 2 純金属的热电子发射	14
2.1 热电子发射公式	14
2.2 关于发射常数的討論	15
2.3 发射电子所具有的平均能量与速度分布	16
2.4 关于发射常数的測定	17
2.5 外加减速电場的影响	19
2.6 外加加速电場的影响——肖特基效应	20
§ 3 具有单原子吸附层的热电子发射体	22
3.1 鈦鎢阴极的制备和性能概述	22
3.2 鈦鎢阴极的发射机构	23
3.3 其他具有单原子吸附层的阴极	26
§ 4 半导体热电子发射体——氧化物阴极	26
4.1 氧化物阴极的制备及性能概述	26
4.2 氧化物阴极的发射机构	28
4.3 氧化物阴极的发射特性	32
§ 5 冷发射——場致发射	39
§ 6 光电子发射	42
6.1 光电子发射現象	42
6.2 光电子的速度分布規律	43
6.3 光电阴极的温度对光电发射的影响——按 Fowler 法确定临界頻率 ν_0	44
6.4 光电发射的理論	46
6.5 光电发射的选择性	47
6.6 复杂表面的光电阴极	48
§ 7 二次电子发射	50
7.1 二次电子发射現象	50

7.2 二次电子发射的理论	52
7.3 复杂表面以及绝缘体上的二次电子发射	53
第二章 二极管中的电流流通	55
§ 1 概 說	55
§ 2 电子在电场中运动的规律	56
2.1 带电粒子在真空中运动的特点	56
2.2 单个自由电子在电场中的运动	56
2.3 静电场的模拟	58
2.4 电子在不均匀电场中运动轨迹的确定	60
2.5 大量电子在电场中运动的特点	62
§ 3 二极管的二分之三次方定律	64
3.1 平板二极管的 $\frac{1}{2}$ 次方定律	64
3.2 圆柱形电极系统二极管中的 $\frac{3}{2}$ 次方定律	67
3.3 考虑电子初速时电流方程式的修正	72
§ 4 电子渡越时间与极间电容	83
4.1 渡越时间	83
4.2 极间电容	86
§ 5 阳极上发生的物理过程	86
§ 6 二极管的特性曲线、参量和定额	87
6.1 特性曲线	87
6.2 参量	90
6.3 定额	90
§ 7 二极管的分类和典型结构	91
第三章 三极管中的电流流通	93
§ 1 三极管中的静电场	93
1.1 栅极的控制作用	93
1.2 三极管中的静电场	94
1.3 静电场的计算方法——保角变换法	97
§ 2 三极管中静电场的计算	100
2.1 平板型三极管中静电场的计算	100
2.2 圆柱型三极管中静电场的计算	103
§ 3 三极管中的电流流通	105
3.1 等效二极管的概念	105
3.2 三极管的 $\frac{3}{2}$ 次方定律	109
3.3 考虑空间电荷时对等效电压的修正	111
§ 4 三极管不能简单地化为一个等效二极管的情况	111
4.1 阴极表面电场不均匀的情况	113

4.2 当 $d_{sk} < 1$ 时三极管中静电场的计算	113
4.3 考虑阴极表面电场不均匀时之 $3/2$ 次方定律的修正	117
§ 5 负栅三极管的伏安特性和参量	118
5.1 阳极伏安特性和阳栅伏安特性	118
5.2 负栅三极管的静态参量	119
§ 6 三极管的分类及应用	121
附 录	123
第四章 三极管中的电流分配	129
§ 1 三极管中电流的分配	129
1.1 讨论三极管中电流分配的意义	129
1.2 正栅压时三极管伏安特性的一般形状	129
1.3 电流分配系数	130
§ 2 直接截获情况下电流的分配	131
2.1 “直接截获”情况下电流分配系数的推导	131
2.2 由“有效栅丝半径”计算电流分配系数	132
2.3 考虑二次电子转移对电流分配的影响	135
§ 3 返转情况下电流分配系数	136
3.1 返转情况下电流分配系数的推导	136
3.2 栅极与阳极间空间电荷的影响	139
§ 4 正栅压时三极管的参量	140
§ 5 负栅压时的栅极电流	141
第五章 多极管中电流的流通	145
§ 1 屏栅四极管	145
1.1 屏栅四极管的出现	145
1.2 屏栅极的屏蔽作用	146
1.3 屏栅四极管的特性曲线	148
§ 2 屏栅五极管	148
2.1 抑制栅的作用	148
2.2 屏栅五极管中电流的流通	150
2.3 屏栅五极管中电流的分配	152
2.4 抑制栅对电流分配的影响	155
§ 3 屏栅五极管中伏安特性和参量	155
3.1 屏栅五极管的 $U_{gr} \sim I_a$ 特性曲线	155
3.2 屏栅五极管的 $U_a \sim I_a$ 特性曲线	156
3.3 屏栅五极管的参量	157
3.4 屏栅五极管的极间电容	158

3.5 屏栅五极管与其他管型的比較	159
3.6 屏栅五极管的基本应用和类型	160
§ 4 束射四极管 (电子注功率管)	161
4.1 束射四极管的结构和 $U_a \sim I_a$ 特性曲线	161
4.2 最低电位和虚阴极形成的规律	162
4.3 理想的束射四极管 $U_a \sim I_a$ 特性曲线	174
4.4 束射四极管的典型数据及其优缺点	175
§ 5 变频管	177
5.1 阳极电流的双重控制	177
5.2 变频原理和变频跨导	179
5.3 多栅混频管	180
5.4 多栅变频管	181
§ 6 其他电子管	184
6.1 电子调谐指示管	184
6.2 静电计管	186
第六章 静电控制超高频管	187
§ 1 概 述	187
1.1 电子管工作到超高频波段的必要性	187
1.2 静电控制超高频管的优点	187
1.3 电子管工作于超高频波段的一般情况	188
§ 2 电路现象限制因素的讨论	188
2.1 引线电感的影响	188
2.2 极间电容的影响	191
2.3 电路与电子管高频损耗的限制	192
§ 3 电子现象的一般情况	193
3.1 电子渡越时间和渡越角	193
3.2 电子运动的时间——空间图	195
3.3 感应电流	197
3.4 全电流定律	200
3.5 运动电子与电场间能量的交换	203
§ 4 平板二极管在超高频波段工作时电流的流通	204
4.1 温度限制二极管的等效电路 (小讯号状态)	204
4.2 空间电荷效应限制的平板二极管等效电路	207
4.3 关于二极管极间电容的讨论	209
§ 5 小讯号工作的平板三极管在超高频波段工作时的电流流通	210
5.1 三极管内电流的流通	210
5.2 三极管的输入导纳	212
5.3 三极管的跨导	214

§ 6 大訊号工作时的平板三极管在超高频波段工作时的电流流通	214
6.1 电流流通的情况	214
6.2 阴极的发射量	215
6.3 阴-栅空间电流的流通	217
6.4 阳-栅空间电流的流通	218
6.5 超高频四极管	219
§ 7 静电控制超高频管的典型结构和参量	219

第七章 电子管内部的噪声 223

§ 1 概 述	223
§ 2 热噪声	224
§ 3 二极管中的基本噪声	225
3.1 阴极电子流中的散粒噪声	225
3.2 电离噪声	227
3.3 閃变噪声	227
3.4 其他噪声因素	227
§ 4 有栅电子管中的噪声	228
4.1 有栅电子管中的散粒噪声	228
4.2 电流分配的噪声	228
4.3 二次电子发射噪声	229
4.4 有栅电子管中的电离噪声	231
§ 5 管内噪声表示法	231
5.1 等效噪声电压 ($E_{\partial u_1}$)	231
5.2 等效噪声电阻 (R_u)	232
§ 6 电子管在高频运用时管内的噪声	233
6.1 散粒效应	233
6.2 栅极感应噪声	234
6.3 二次发射噪声	234
§ 7 噪声与运用情况的关系	235
7.1 阴极温度	235
7.2 栅极电压	235
7.3 阳极电压	235
7.4 屏栅电压	235

附 录 235

緒 論

I 电真空器件与无线电电子学

現在是社会主义和共产主义胜利的时代，也是科学技术日益昌明的时代，其中最突出的标志之一，就是无线电电子学的蓬勃发展。无线电电子学已經而且仍在不断广泛深入地渗透到国民經济、国防建設和科学技术的各个领域中去。

无线电电子学的运用和发展，卓有成效地帮助人們更深刻更正确地認識物质世界的規律，并利用这些規律来为人类服务。无线电电子学是人們向自然作斗争和进行阶级斗争的强有力的武器。

近十几年来，无线电电子学的运用已經远远超出早期的无线电通訊与广播等范围，而为科学技术的很多领域，例如无线电定位、导航、电视、遙控、天文、气象、測量技术及計算技术等，开拓了嶄新的道路，并且大大加速了这些部門的发展。

无线电电子学在国民經济各部門的技术革新和技术革命中起着重要的促进作用，它为生产过程的全盘自动化开创了宏偉的前景。

无线电电子学的运用不仅有可能減輕人們繁重的体力劳动，而且可以部分地使人們从繁瑣的脑力劳动中解脫出来。在这方面其意义的深远目前尚难以估計。

原子能利用方面所取得的光輝成就，和无线电电子学有着紧密的联系。

人造卫星，宇宙火箭，載人飞船首先在苏联相继发展成功，这是社会主义制度的偉大胜利，也是无线电电子学光輝成就的标志，因为如果没有各式各样的无线电电子学仪器設备，要想实现宇宙航行，并在地球上进一步探索天体的秘密将是不可能的。

无线电电子学仪器設备无可倫比的优越性，在于它具有极端迅速的作用速度，异乎寻常的精确度与灵敏度。这是其它方法所望尘莫及的。

无线电电子学之所以能取得如此巨大的成就，其主要的原因之一是由于建立与运用多种多样品质优良的电真空器件的結果。如所周知，无线电設备的放大和振蕩等极其重要的功能正是借助电真空器件才得以实现的。事实証明电真空器件是无线电設备中最主要的元件。电真空器件的品质，直接决定了无线电設备最重要的技术性能。电真空器件的应用和发展对于无线电电子学的应用和发展具有决定性的意义。因此，人們常将电真空器件誉为无线电的心臟。現在电真空器件的生产已經形成一个巨大的现代化工业，无疑，它是无线电工业的基础和先行軍。

电真空器件是一切利用在真空中或气体中发生的电現象而做成的器件的統称。

电真空器件可分为两大类。第一类是不放电的电真空器件，其中电流通过金属或合金等导体，如白熾灯、热电偶、稳流管等。这不是本书研究的对象。

第二类是放电的电真空器件。它們工作的基础在于利用真空中或气体中自由电荷的运动。如果器件中仅有用某种方法从电极上所得到的自由电子参加电荷的迁移，則这样的器件称为电子的电真空器件简称电子器件，其中应用得最多最广的是电子管，俗称真空管。通常这类

器件中气体的压强低到 10^{-6} 毫米汞柱以下，因而在正常的情况下，其中残存的气体对于器件的运用没有什么影响。但是当电子流通过电真空器件电极间的稀薄气体时，如果由于与气体分子碰撞，引起气体电离，使电子和离子都参与电荷的迁移，则这些器件称为离子的电真空器件或气体放电器件，简称离子管，俗称充气管。

借助电磁场可以对电真空器件中发生的电子现象在瞬息之间进行准确无误的控制，以完成预期的任务，正是依靠电真空器件的这一特点，才使得无线电电子学设备具有前面所述的那些优越性。

II 电子管发展简史

真空技术的改进和对于电子及离子现象的研究，为电子管的产生和发展创造了科学技术上的先决条件。

1873 年俄国工程师拉得庚发明白炽灯，这是现代电真空技术的开端。

1881 年爱迪生发现电流能够从灼热的灯丝通过真空到达灯泡内的金属板上。以后这现象在理论上与实验上被证实为灯丝发射带有负电荷的微粒——电子的一种现象。

基于金属的热电子发射现象，人们在 1904 年做出了第一个最简单的电子管——两极管。单向导电是这种电子管的主要特性。因为只有阳极相对于灯丝（阴极）接正电位时，才能接收从灯丝发射出来的电子。在两极管发明的初期，它虽然可以代替无线电技术中的晶体检波器，但是由于技术上的一些缺点，没有获得广泛的运用。

在 1906—1907 年做成了第一个三极管。其中阳极和阴极之间置有栅网状的第三个电极——栅极。

实验表明：如果改变栅极的电位，就会影响从阴极发射出来穿过栅极网孔流到阳极的电子电流。当栅极对阴极的电位降低时，这两个电极间的电场就减弱（并阻碍电子穿过栅极到达阳极），因而使阳极电流减小。反之，如果栅极对阴极的电位升高时，极间电场就加强（就将加速电子穿过栅极），从而使阳极电流增加。这样，栅极电位的改变就引起阳极电流改变。而当电极结构做得适当时，栅极电位很小的变化，就会使阳极电流发生很大的波动。这就是说，可以利用三极管做成放大器。由于电子质量很小，惯性极微，在电场的作用下，它可以从阴极非常快地飞到阳极，所以当频率不太高时，可以认为三极管是无惯性的放大元件。三极管放大器最可珍贵的特点之一，就是几乎不要求讯号源为放大作用付出功率。

三极管发明之后，很快就被应用到无线电通讯中，并大大地提高了接收机的灵敏度。1913 年进一步利用三极管做成了等幅振荡器。不久以后，它就成功地取代了当时的火花振荡器。这样就适应了无线电电话和广播的需要。1914—1918 年的帝国主义战争在相当大的程度上促进了无线电技术和电子管的发展。在 1913—1920 年间无线电技术逐步转变成电子管化的技术，并且一直保持到现在。两者结合形成了所谓无线电电子学。

由于电子管使无线电技术在很短的时期内取得很大的成就，因此毫无疑问，无线电技术的发展必将反过来要求有更完善的电子管。这样就迫使电真空方面科学研究和工程技术人员加紧研究并创造出新型的品质更好的电子管来。

例如，1920 年以后，由于无线电广播的蓬勃发展，要求采用更高的频率，即从长波过渡到中波和短波，而三极管由于阳极和栅极间电容很大，在高频时不能得到很好的放大作用，因此在 1924 年提出在阳极和栅极间加入第二栅极——屏栅极来减小这个电容，即制出了四极

管。

四极管中阳极与屏栅极相对于阴极都接较高的正电位，因而从阴极发射出来的电子落到它们上面时，将引起二次电子发射。在一定的条件下，这些二次电子将在两个电极间转移。这样就严重地影响了电子管的正常工作。

1930年提出了在屏栅极与阳极间加入第三个栅极——抑制栅极来抑制二次电子转移的方法，从而做成了五极管。其中阳极和第一栅极之间的电容可以减小到只有三极管的千分之几。因此成功地克服了三极管不能用于较高频率的缺点。

超外差接收方法的发明，引起了多栅混频管与多栅变频管在1934—1935年的出现，此外还出现了各种型式的复合管，它们的运用使得无线电接收机中的电子管数目大为减少。

以上的二、三极管和电极更多的电子管，常称为普通电子管，或称为静电控制电子管，因为决定其中电流流通过程的电场都具有静电场的特征。

今后普通电子管的进一步发展，看来主要不是继续增加电极的数目，而是改进结构工艺并寻求新的工作原理，以适应特殊的需要。例如，缩小体积，提高可靠性，增强耐震和耐高温的能力，延长寿命，提高功率以及提高工作频率等。

每年各方面对电子管的需要量是如此的巨大，为数以亿计。因此，很自然，当1948年第一个半导体三极管（晶体管）一出现，它能起某些电子管的作用，就迅速地吸引了各方面的注意。近十几年来半导体器件有了十分迅速的发展。晶体管的优点是：消耗功率少，寿命长，体积小，耐震动等。但是晶体管在使用上也受到某些限制。如输出功率小，工作频率不高，噪声大，工作温度不高，受辐射影响大等。看来在低频低功率的情况下使用晶体管来代替电子管是完全合理的，但是晶体管并不能全部取代电子管。实际上，两者并不是相互排挤，而是相互补充，互相促进，各有其发展前途。

无线电电子学的进一步发展，特别是第二次世界大战以来，雷达在军事上的成功运用与迅速发展（现在它已经成为国防上的一个极重要的武器），迫切要求掌握超高频波段，首先是要建立能产生与放大超高频振荡的电真空器件，为了满足这方面的要求，对静电控制电子管的结构作了很大的改进。但是这些管子当工作频率高到一定限度时，它们的输出功率和效率就急剧降低，终至完全停止工作，它们不能在超高频下工作的主要原因是由于受电子管极间电容、引线电感、高频损耗以及电子在极间运动的渡越时间等的限制。

为了根本克服普通结构电子管不能用于超高频的缺点，人们不断地从理论上和实验上探索新的途径。40年代以后，基于完全新颖的工作原理——电流动态控制原理，制成了一系列新型的超高频电子管，如调速管、磁控管、行波管、回波管等。目前这些电子管已经在厘米波和毫米波段获得广泛应用。它们是近代无线电定位、微波多路通讯等方面的主要元件。

现在科学家还在进行巨大的工作来开拓波长更短的亚毫米波领域。这方面已经取得了显著的成就。

本书的范围仅限于讨论静电控制电子管，因此对于其他类型的电子器件以及离子管的发展简史就不一一加以探讨了。

由电子管的发展简史可以清楚地看出电子器件和无线电电子学有着何等紧密的联系，两者始终是相互促进的；同时也可以看出理论研究和实际工作之间存在着密切的联系；还可以看出任何科学部门的发展都是服务于人们的生产斗争和阶级斗争的。

■ 我国电真空事业的发展近况

我国在解放前只有几家简陋的灯泡厂，而且原材料多依靠进口，实际上只是装配工厂的性质，谈不上有什么电真空工业。

解放后，在党和政府的关怀和领导下，电真空工业才从无到有由小到大真正地建立起来。第一个五年计划时期，除了建成南京电子管厂外，在苏联的无私援助下还建成了拥有现代化设备和技术的北京电子管厂。这个新型电子管厂的建立对我国的电真空工业起了巨大的促进作用。1958年大跃进以来，在党的总路线的光辉照耀下，我国的电真空事业也有了飞跃的发展。许多地方在兴办电子管厂（或将原有的灯泡厂改建扩建为电子管厂）。目前电真空器件的原材料绝大部分都能自制。事实上我国在这方面的资源是极为丰富的。电真空器件方面的科学研究工作也获得了很大的成就，试制成功了很多尖端产品。在培养电真空技术干部方面也有显著的进展。不少学校设置了电真空技术专业，而且由于贯彻了党的教育方针，在培养人材的质量上也有很大的提高。

目前摆在我国电真空事业面前的巨大而光荣的任务是进一步提高生产技术水平，保证生产出大量既经济又耐用质量高的各种类型的电真空器件，以满足社会主义建设和国防事业上的需要。此外还必须在理论上和实践上大力进行新型电真空器件的设计制造方面的科学研究工作，以期在不久的将来能赶上世界最先进的水平。

Ⅵ 电子器件的分类

现代科学技术采用着大量不同类型和结构的电子器件，可以按照很多标志来将电子器件分类。例如：

- 1) 按照控制电流的方法，即按照改变通过器件电极间的电子流的强度或方向的方法（电场或磁场）来分类。
- 2) 按照阴极性质分类——热阴极或冷阴极，直热式阴极或傍热式阴极。
- 3) 按冷却方法分类——自然冷却，风冷或水冷等。
- 4) 按电子管的管壳及外形分类——玻璃的，陶瓷的或金属的；梨形的，小型的，超小型的，橡实形的，铅笔形的，灯塔形的等。
- 5) 按能量变换的性质和用途分类——按照这种特征来分类是最本质的方法。因此关于这种分类将作较详细的讨论。

第一大类是变换电能的电子管，它用来把电能从一种形式变换到另一种形式。这类电子管包括的范围很广，有变换交流电能为直流电能的整流管，把直流电能变换成交流电能产生电振荡的中小型与大功率振荡管，及主要在中无线电接收设备中供电压放大或功率放大用的接收放大管和变换频率的变频管等。这类电子管按其工作制度可分为连续运用的和脉冲运用的，而按其工作频率则又可分为低频的、高频的和超高频的。这一类电子管大都具有相似的结构外形和工作原理。它们是本书的主要研究对象。

基于电流动态控制原理产生超高频电振荡的磁控管、调速管、行波管和回波管也属于这一类，但不包括在本书的范围中。

第二类是变换光能为电能的光电器件，其中包括利用光阴极在受到光的照射时发射出自由电子的光电管，利用特殊电极的二次电子发射将从光电阴极逸出的电子流放大很多倍的光

电倍增管等。

利用聚焦电子束能量的器件属于第三类，它们常称为电子束管。在外加电场与磁场的作用下，电子束可以在空间移动，当电子流落到特制的发光屏上时，就在屏上打出小的亮点，并描绘出相应的图线。其中有观察电信号变化过程的电子示波管；观察电视图像的显像管；用于无线电定位中的雷达指示管，和用电子束作电路转换开关的电子束转换管等。

还有一些电子器件，是综合光电器件和电子束器件的工作原理做成的。例如电视发送管和光电变像管等，前者能把光学图像变成电信号，后者能把不可见的光学图像变换成可见光的图像。

最后一类是把电能变成X射线的X射线管。它是利用快速电子束轰击特制的靶时产生X射线的原理制成的。

V 电子管课程的目的和内容

电子管一课的（也是本书的）主要研究对象是静电控制电子管。这是电真空技术专业的一门重要专业课。

在本课程中将深入地研究电子管中发生的物理过程，包括电子由阴极中发射出来的基本规律，和在各种情况下管内电子流流通的过程等。在此基础上再讨论各种类型电子管的零件结构设计和整管设计，以及有关电子管性能的测试技术。

十分明显，只有全面掌握电子管的基本工作原理，结构设计和制造工艺的知识，才有可能生产出合乎规格的电子管来，并在改进旧管和创造新管的科学研究工作中胜利前进。

由于电子管中的一些基本规律，如电子发射、电流流通等的原理，和电子管结构设计的一些基本原则也适用于其他管种，所以本课程也具有一定的专业基础课的性质。因而，掌握电子管的理论知识 and 实际知识将为进一步学习其他管种创造良好的基础。

第一章 电子发射

§ 1. 电子发射的基本规律

1-1 热电子发射现象

电子管中的基本过程就是真空中电流的流通——即所谓徙动电流。这时真空中的自由电子就作为载流子，将电荷由一个电极——阴极，搬到另一个电极——阳极构成了电流的流通。因此获得这些在真空中的自由电子成为电子管工作的基本问题之一。金属中的传导电子自金属逸出成为自由电子的过程称之为“电子发射”。

加热金属就可以使其中传导电子逸出，并可由如图(1-1)电路中的阳极A所收集。金属的温度愈高，则逸出的电子数量愈多。电子因温度增加而逸出的过程称之为热电子发射。这个过程可以与液体的蒸发过程相类比：当液体温度增加时，蒸发出来的分子数量亦愈多，因为温度增高，分子具有的速度便增大，只有具有相当大速度的分子才能由液态过渡到气态。液体在蒸发时变冷，加热的金属灯丝在外电场把电子引离的情况下，亦有同样冷却效应发生。在蒸发时，气体分子脱离液态所消耗的能量可以用一克液体的蒸发潜热来表征。那么电子脱离金属所消耗的能量可以用使一个电子逸出的逸出功来表征。我们用 φ_0 来表示逸出功。它的单位为焦耳。亦可以用电子伏(eV)来表示。每一电子伏等于如下焦耳值，即

$$1\text{eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{焦耳}。$$

从蒸发过程来联想，关于电子发射的物理过程，可以归结为下列四个问题：

- 1) 传导电子在金属中处于何种状态
- 2) 在常温情况下会否逸出金属表面
- 3) 逸出金属表面的条件
- 4) 确定逸出的电子数量的规律

1-2 金属中的传导电子

根据固体物理中金属的电子学理论，金属中的传导电子具有一定的能量，但是它们处于简并情况，所以能量分布应以费密——狄拉克的统计公式来描述。

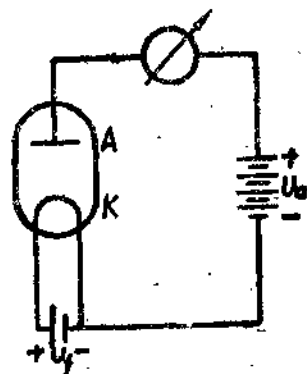


图 1-1

$$\text{即} \quad dn_{\epsilon} = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{3/2} \epsilon^{1/2} \frac{1}{e^{\frac{\epsilon - W_i}{kT}} + 1} d\epsilon \quad (1-1)$$

或用速度分布

$$dn_{uvw} = \frac{2m^3}{h^3} \frac{1}{e^{\frac{\epsilon - W_i}{kT}} + 1} du dv dw \quad (1-2)$$

式中 $\epsilon = \frac{m}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ 是电子所具有的动能

$m=9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 是电子的质量

$h=6.624 \times 10^{-34}$ 焦耳秒 普朗克常数

按物理意义, W_i 代表金属中传导电子在绝对零度时可能具有的最大能量值。

(1-1) 与 (1-2) 中乘数 $\frac{1}{e^{-\frac{W_i}{KT}} + 1}$ 确定电子在温度 T 时具有能量 ϵ 的几率, 它是以

能量 W_i 作为参考值的。而 $\frac{4\pi}{h^3} (2m)^{3/2} \epsilon^{1/2} d\epsilon$ 是单位体积内对应于上述电子能量范围内可能

的电子状态数。对于 $T=0^\circ\text{K}$ 及 $T=1500^\circ\text{K}$ 二种情况的能量分布函数表示于图 (1-2)。

应该注意, 在 $\frac{dn_i}{d\epsilon}$ 对 ϵ 的坐标中, 状态数是比例于 $\epsilon^{1/2}$ 的抛物线。由于温度不同, 几率

亦不同, 因此在 $T=0^\circ\text{K}$ 时, 在 $\epsilon=W_i$ 处发生突变, 函数突然中止, 表明没有一个电子能量会大于 W_i 。因此 W_i 是绝对零度时电子可能具有的最大能量。而从曲线

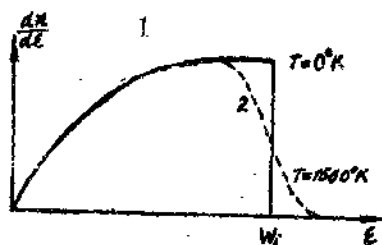


图 1-2

最后, 指出下列几个应该注意的问题:

1) 传导电子所占的能级实际上是不连续的, 但是由于级数繁多, 间隔很近, 因此几乎和连续分布一样。

2) 图 (1-2) 中能量 ϵ 的零点是以传导电子所具有的最低能量作为起始能量。

1-3. 电位壁垒和逸出功

根据金属的电子学理论, 金属内部任何一个电子上的电场力都是平衡的。当电子飞到金属边界时, 金属对电子的电场合力就指向金属内部, 并阻止电子趋向真空。这个合力是由点阵上的正离子所造成的, 是周期地起伏的。但是作为第一级近似, 可以被一平均的力场所代替。

它所相应的电位差称为金属的内电势—— U_0 。于是金属内部与外部的电子相差一势能 $W_0 = -eU_0$ 。由于这一力场的作用, 若电子所具有的动能不足以克服这一势能, 则电子就不可能离开金属表面, 电子相当于被关在深度为 W_0 的势阱中。

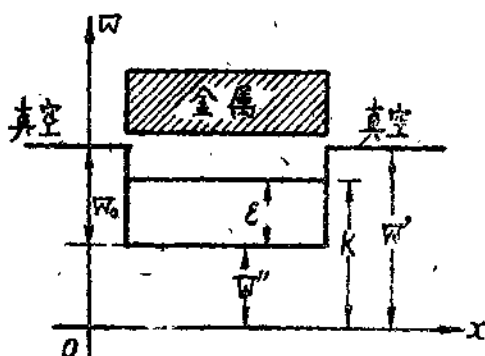


图 1-3

U_0 可由电子衍射的实验来确定。例如对于镍 $U_0=17$ 伏, 铅 $U_0=14$ 伏, 银 $U_0=15$ 伏。

(可以参看 D·B·史包尔斯基 “原子物理学” § 134 金属的内电势)。

这样, 金属中电子势能的模型就像图 (1-3) 所示的一样。因为势能的零点的选择是任意的。我们选择一参考点, 使金属内电子的势能是正的。例如图中 W'' , 那末金属外面电子的势能亦是正的, 并等于 W' 。两点的差 $W' - W'' = W_0$ 是势阱的深度。金属中的电子即在这势阱内。

由于传导电子在金属内运动, 它的总能量大于 W'' , 例如等于某一数值 K , 则显然,

$K - W'' = \varepsilon$ 等于电子的动能。

按照 (1-1) 式, 金属中电子的动能具有一定的分布律, 它们分布在所有可能的能级上。然而, 在 $T = 0^\circ K$ 时电子所具有的动能不可能超过 W_i , 于是便形成了“空的能级”和“满的能级”间显著的界限。这个最上层的能级 μ 称为临界能级或费米能级。在金属中它就是 W_i 。显然, 要使传导电子从金属中逸出, 一定要给予它能量, 这能量至少要等于势阱深度 W_0 和临界能级 W_i 之差。如图 (1-4)。这个差值

$$W_0 - W_i = q_0$$

称之为逸出功, 它表征要使处于绝对零度下的金属中具有最大能量的电子逸出金属表面所需要再给与的能量。

显然, 当金属温度升高时, 部份电子就具有超过 W_i 的能量。随着温度的升高, 不但超过的能量增加, 而且这些电子的数量亦增加。因而, 不但有可能这部份超过的能量达到 q_0 , 即这些电子具有的能量 $\varepsilon - W_i \geq q_0$, 即 $\varepsilon \geq W_0$ 势阱深度可以逸出金属, 而且随着温度的增高, 那些

可以发射的电子数量亦会增加。这就是热电子发射的基本过程。

阻止电子逸出金属的势阱可以用在金属与真空间存在有一阻滞电子的电位壁垒这一概念来描述。这一电位壁垒的高度相当于 $\frac{W_0}{e} = U_0$ (伏) 电位差。一般习用沿纵坐标向上代表电位的减小 (这与电工基础中表示的方向刚好相反)。

以后我们还会看到对电子发射有影响的不单是电位壁垒的高度, 而且还和它的形状有关系。

1-4 各种电子发射的形式

上面所讨论的是利用提高金属温度使传导电子的能量增加以克服电位壁垒而逸出金属的热电子发射。金属中的电子亦可以通过其他方式获得能量而逸出金属。光电发射就是金属中电子接受光子的能量而得以逸出金属的过程。这时发射过程中能量的关系遵循著名的爱因斯坦光电发射公式

$$h\nu = q_0 + \frac{1}{2}mv^2_{max}$$

其中 $h\nu$ 系光子所具有的能量。当电子接受光子的能量后, 一部份消耗于逸出功, 多余的一部份即以动能的形式为逸出电子所持有。当光子的能量 $h\nu$ 小于 q_0 时, 就不会再有光电发射。

利用具有较高动能的带电粒子 (一般系电子) 打入金属中, 而将部份能量传授给附近的电子使它们得以逸出的过程, 是电子发射的另一种形式——二次电子发射。通常将打入的电子称为一次电子, 而向外逸出的电子就称为二次电子。二次电子中尚包括一些为金属所散射的 (弹性和非弹性的) 一次电子。

至于冷发射 (或称场致发射) 系指由于强电场对金属与真空间电位壁垒的作用而使其变形, 以致在金属虽然还处于温度很低的情况下, 电子仍能由于具有波动的特性而透过电位

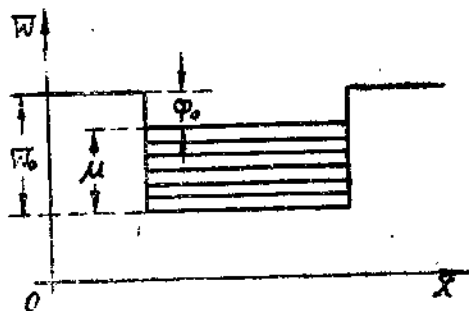


图 1-4

壁垒，从而由金属中逸出的过程。而冷发射这一名称就是用来表征这一特点的。

各种电子发射的形式，由于它具有各种不同的性能和特征，发生在或被应用在各式各样的电子器件中。

§ 2. 纯金属的热电子发射

2-1 热电子发射公式：

热电子发射的电流密度与金属温度的关系，是建立于金属电子理论的基础上，为了计算发射出来的电流密度，我们在金属与周围媒界的分界面上划上一个单元面积 $\Delta\sigma$ ，并且选 x 轴与这表面垂直。

对于在金属中某些具有速度为 C ，并有如图 (1-5) 中所选定的方向的电子，在 Δt 时间开始前就已经在以 $C\Delta t$ 及 $\Delta\sigma$ 的圆柱体中，才能在 Δt 时间内通过 $\Delta\sigma$ 而逸出金属表面。如果令 dn_1 代表单位体积内速度分量为 u, v, w 的电子数，那么在圆柱体内通过单位表面面积的电子数就为

$$dN_1 = \frac{u\Delta t \Delta\sigma n_1}{\Delta t \Delta\sigma} = u dn_1 \quad (1-5)$$

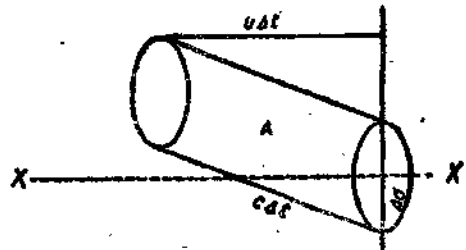


图 1-5

然而金属中电子速度不仅为如上所述的 u, v, w ，而是从零到无穷大，凡是 x 轴方向速度分量超过 u_0 的电子可以逸出。于是求得单位时间内通过单位表面面积的电子总数 N 就为

$$N = \int_{u_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u dn_1(u, v, w) \quad (1-6)$$

式中 u_0 代表电子逸出所需的 x 轴向速度分量的最低值，数值上

$$u_0 = \sqrt{\frac{2e}{m} W_0} \quad (1-7)$$

将 (1-2) 式代入并将 N 乘以电子电荷量 e 即得发射电流密度。

$$J = \frac{2m^3}{h^3} e \int_{u_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{e^{\frac{\epsilon - W_0}{KT}} + 1} u du dv dw \quad (1-8)$$

因为只有那些电子能量 $\epsilon > W_0$ 的电子能逸出金属，所以 $\frac{\epsilon - W_0}{KT} > 0$ 或 $e^{\frac{\epsilon - W_0}{KT}} \gg 1$ 。于是可以忽略积分项分母中的 1 而 (1-8) 式可改写为

$$J = \frac{2m^3}{h^3} e \int_{u_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{W_0}{KT} - \frac{1}{2} \frac{m(u^2 + v^2 + w^2)}{KT}} u du dv dw \quad (1-9)$$

利用

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-ax^2} dx = \sqrt{\pi/a} \quad \text{及} \quad \int_{u_0}^{\infty} e^{-ax^2} x dx = \frac{1}{2} a^{-1} e^{-au_0^2}$$

的关系可积分得：

$$J = \frac{4\pi m k^2 e}{h^3} T^2 e^{-\frac{W_0 - W_1}{K T}} \quad (1-10)$$

令

$$A = \frac{4\pi m k^2 e}{h^3} = 120.4 \left[\frac{A}{\text{cm}^2 (\text{°K})^2} \right] \quad (1-11)$$

而

$$W_0 - W_1 = \varphi_0 \text{ (逸出功)}$$

$$\text{于是 (1-10) 式} \quad J = A T^2 e^{-\frac{\varphi_0}{K T}} \quad (1-12)$$

就是热电发射电流密度的公式，又称之为理查逊——道尔曼 (Richardson—Dushman) 公式。某些金属的 A 与 φ_0 值以及它们的熔点列于表 1。

表 1

金 属	A	φ_0 eV	熔点°K
铯 Cs	162	1.81	299
钙 Ca	60.2	2.24	1083
镍 N	26.8	4.84	1725
钍 Th	60.2	3.35	2118
钽 Ta	60.2	4.07	3123
钼 Mo	62.2	4.44	2893
钨 W	60.2	4.52	3643
碳 C	—	4.70	3773

从 (1-12) 式可以看出温度愈高，发射电流密度愈大，而且因为指数项影响较大，发射电流密度随温度上升而剧烈地增加如图 (1-6)。金属的逸出功愈小，发射电流密度亦愈大。理想的纯金属热电子发射体是具有比较小的逸出功然而有比较高的熔点使得工作温度得以提高，以期获得较大的发射电流密度。目前应用得最广泛的纯金属阴极是钨，个别的亦有用钼，钽等金属。

2-2 关于发射常数 A 的讨论：

从表一关于 A 的数值看出对于大部份的金属恰好为理论值的一半，并且有一些金属还具有或大或小的数值。以前曾试图由逸出功为温度的函数这一概念出发来解释它*。但是现在

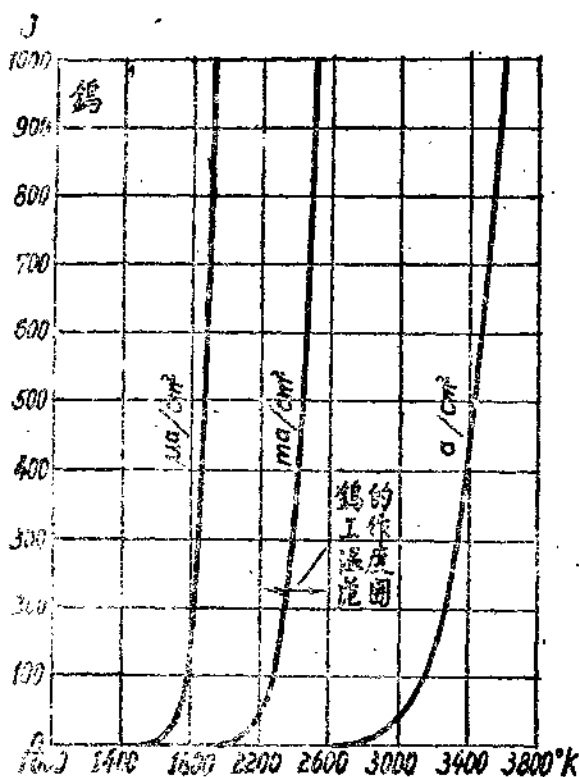


图 1-6

* 参看 C.B. 普奇真 “氢化物阴极中的物理现象” p3

通常都由电子波在电位壁垒处遭受反射的概念来分析, 因为当电子接近金属表面时由于电子的波动性质在电位壁垒处发生反射, 反射系数 R_0 决定于电子的能量以及电位壁垒的高度。例如对于图 (1-7) 所表示的壁垒情况, 反射系数

$$R_0 = \left(\frac{\sqrt{W} - \sqrt{W - W_0}}{\sqrt{W} + \sqrt{W - W_0}} \right)^2 \quad (1-13)$$

因而逸出的电子就决定于透射系数 D_0 。

$D_0 = 1 - R_0$ 。这样在 (1-8) 式中在计算发射电流密度时就应引入透射系数 D_0 , 它是电位壁垒和电子能量的函数。

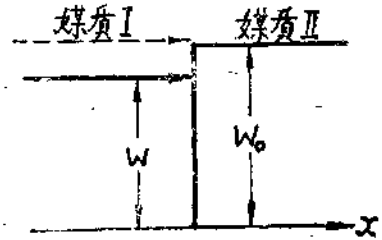


图 1-7

$$J = \frac{2m^3}{h^3} e \int_{u_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D_0 \frac{1}{e^{\frac{W_i}{K T} + 1}} u du dv dw \quad (1-19)$$

如在上式中引入一平均透射系数 $\bar{D}_0$, 则

$$J = \frac{4\pi m^3 e K T}{h^3} e^{\frac{W_i}{K T}} \bar{D}_0 \int_{u_0}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \frac{m u^2}{K T}} u du \quad (1-14)$$

如果假定 $\bar{D}_0 = 0.5$, 那末 A 就等于 $60.2 \left[\frac{A}{C m^2 (^\circ K)^2} \right]$ 。然而, 对于 $\bar{D}_0$ 和金属以及其电位壁垒间的关系尚未确切地建立。

2-3 发射电子所具有的平均能量与速度分布

现在计算自金属逸出的热发射电子所具有的平均能量。

1) 在金属中

因为每个电子的能量为 $\frac{1}{2} m c^2$ 所以全部发射电子的总能量为

$$\frac{2m^3}{h^3} \int_{u_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} m (u^2 + v^2 + w^2) e^{-\frac{W_i - \frac{1}{2} m (u^2 + v^2 + w^2)}{K T}} u du dv dw \quad (1-15)$$

除以发射出来电子的总数就得平均能量

$$\bar{\epsilon} = \frac{\iiint \frac{1}{2} m c^2 u d n_1(u, v, w)}{\iiint u d n_1(u, v, w)} = 2 K T + W_0 \quad (1-16)$$

2) 在真空中

由于电子在逸出过程中为了克服电位壁垒消耗了 W_0 能量, 因此发射电子的平均能量 $\bar{\epsilon} = 2 K T$ 。例如, 工作于 $2700^\circ K$ 的阴极所发射的电子具有平均能量为

$$\bar{\epsilon} = 2 K T = 2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 2700 = 7.45 \times 10^{-20} \text{ (焦耳)} = 0.466 \text{ (eV)}$$

这些能量系由阴极的热能所转换的, 结果阴极的温度降低。电子自阴极发射出后, 在金属与真空交界处应满足下列几个边界条件, 如以 1 代表金属内部的条件, 2 代表金属外部的条件,