

无线电电子学知识丛书

电子发射和阴极

陈德森著



人民邮电出版社

53.654
287

无线电电子学知识丛书

4

电子发射和阴极

陈德森 著

53.654
287

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书是“无线电电子学知识丛书”之一。书中主要介绍电子发射的原理和各种阴极的构造、工作原理、应用范围、优缺点和发展方向等。重点介绍热电子发射阴极(纯金属阴极、原子膜阴极、氧化物阴极等),同时也用相当篇幅介绍了光电发射、二次发射、场致发射等阴极及其他新型阴极。

本书可供电真空器件专业的管理人员、其他无线电专业的技术人员以及无线电爱好者阅读。

电 子 发 射 和 阴 极

著 者: 陈 德 森

出版者: 人 民 邮 电 出 版 社

北京东四6条19号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号)

印刷者: 北 京 市 印 刷 一 厂

发行者: 新 华 书 店 北 京 发 行 所

经售者: 各 地 新 华 书 店

开本 787×1092 1/32

1965年12月北京第一版

印张 3 18,32 页数 57

1965年12月北京第一次印刷

印刷字数 31,000 字

印数 1—8,450 册

统一书号: 15045·总1530—无446

定价: (科4) 0.38 元

前 言

无綫电电子学是二十世紀中发展最迅速、应用最广泛的科学技术部門之一。解放以来，在党的正确领导下，我国的无綫电电子学有了巨大的发展。

在今天，成千上万的收音机分布在全国各地，电视机的应用也日渐广泛。强大功率的电台把革命思想播送到全国和世界各地。在工业上，无綫电电子学帮助我们管理工厂，操纵机器；X光机帮助我们检查鋼件内部的伤痕；計数器帮助我们統計各种数据；计算机帮助我们进行許多复杂的运算。在农业上，它帮助我们預測暴风雨的来临，帮助我们檢驗谷物和木材的湿度；也可以帮助我们开拖拉机。在医院里，X光机是医生检查体内病况的得力助手。在国防上，雷达监察着祖国的海洋和天空，通信把各个軍种、兵种的指战員連成一体。无綫电电子学也是科学技术人員認識世界、改造世界的工具，在宇宙飞行、在射电天文学以及其他科学的各个领域中都起着巨大的作用。它是为阶級斗争、生产斗争和科学实验三大革命运动服务的有力工具。

我們知道，在收音机、电视机、电台、X光机、雷达等等电子设备中，起着主要作用的是电真空器件。可以说它是电子设备的“心脏”。电真空器件是利用被控制的电子在真空中的运动来工作的。它必須有一个供应电子的源，这就是阴极。阴极的好坏对器件的质量有很大的影响。阴极发射終止，器件也就失效了。因此，可以说阴极又是电真空器件的“心脏”。

电子发射与阴极的应用不仅仅局限于电真空器件中，它还在使我们能看到单个原子的电子显微镜中；用在能获得能量

08310

巨大的“电子炮弹”的电子迴旋加速器中；用于精細的电子束加工中；它也是使原子反应堆的热能直接轉变成电能的一个可行的方法。

从本世紀初期研究和应用电子发射起，60多年以来，它已經形成一門重要的学科——阴极电子学。这是与无綫电和电真空器件的发展分不开的。阴极电子学的重大进展，都是在生产的迫切要求下取得的。而每当它取得成就后，又反过来促进了生产。例如，1904年就有了氧化物阴极，但是一直到二十年代，在无綫电广播迫切要求具有高效率阴极的电子管以后，这种阴极才获得了較大的发展。另一方面，它的发展又对电子管的生产发生了巨大的影响。近代的新型阴极也都是在超高频管的要求下发展起来的。

物体里含有大量的电子。在通常的状态下，这些电子是不能离开物体的。要得到电子发射，目前最普遍采用的方法是加热物体，使电子获得額外的能量而跑出来。这种方法称为热电子发射。因为它应用最广，所以本书用較多的篇幅在第一章至第四章中介绍。用光照射或电子轰击使物体内部电子获得額外能量而产生的发射，称为光电发射和二次发射。这两种电子发射分别在第五、六章中討論。在第七、八章中介绍利用外加电场来获得发射的方法。这种方法称为冷电子发射。它包括場致发射、自持发射、P-N結发射和薄膜冷发射等。这些发射虽然还处在研究阶段，尚未得到广泛的应用，但是从它們显露的特性来看，有好些比热阴极优越的地方，是有很大发展前途的。

作者

編者的話

无綫电电子学是一門发展极为迅速的科学技术，在我国社会主义建設的很多方面都有广泛的应用。在今天，从事无綫电电子学的专业队伍正在不断扩大，在工农业生产和科学实验中要求学习和应用这門技术的人也日益增多。为了使无綫电电子学更好地为我国社会主义建設服务，加强普及无綫电电子学知識已經是一件十分迫切的事情。为此，中国电子学会决定成立“无綫电电子学知識丛书”編輯委员会，組織編写这套丛书，分册介紹本学科的各项基本知識、实际应用和发展趋向。我們希望努力做到概念正确清楚，理論联系实际，讲述深入浅出。主要讀者对象是无綫电电子学有关部門的管理干部和初級技术人員，其他专业的电子技术人員，以及有一定基础的无綫电爱好者。

我們热烈希望广大讀者共同推动这一項工作，提出需要編写哪些书籍，并对已出版各书的内容和写法批評指正。来信請寄北京东四6条19号人民邮电出版社图书編輯室。

“无綫电电子学知識丛书”編輯委员会

目 录

編者的話	
前 言	
第一章 純金属的热电子发射和純金属阴极	1
金属中的电子 自由电子的速度	3
电子离开金属受到的阻力 逸出功	4
金属的热电子发射現象	9
判別热电子阴极优劣的标准	12
純金属阴极 鎢阴极	14
第二章 原子膜阴极	17
金属表面存在別种物质的单原子膜对发射的影响	17
鎢鈷阴极和碳化鎢鈷阴极	19
鎢銀阴极和新型的銀供給系統	22
鎢鈹阴极及其在热电子发电上的应用	27
第三章 氧化物阴极	28
氧化物阴极的发射本质	29
氧化物阴极是怎样制成的	32
直热式与旁热式	34
中毒現象与真空卫生	35
涂层的电导率及其对連續吸取电流的限制	39
巨大的脉冲发射率	40
电火花現象	41
氧化物阴极的寿命	44
阴极的噪声和低噪声氧化物阴极	47
氧化物阴极的应用及其显露的缺陷	50
新型的氧化物阴极	53
第四章 其他热电子阴极及热电子阴极的总结	58
其他热电子阴极	58

热电子阴极的运用.....	60
各类热电子阴极特性的比较.....	63
各类热电子阴极的应用范围.....	64
热电子阴极的发展方向.....	66
热电子阴极固有的缺陷.....	67
第五章 光电发射和光电阴极.....	69
光电发射现象和基本规律.....	69
光电阴极的类型和参量.....	72
氧铯光电阴极.....	75
铯铯光电阴极.....	77
光电阴极的应用和发展.....	78
第六章 二次电子发射.....	80
二次电子发射现象.....	80
二次电子发射的基本规律.....	81
实用的二次发射体.....	85
二次电子发射的应用.....	87
第七章 场致电子发射.....	90
场致发射的基本规律.....	90
场致发射阴极的类型与特性.....	93
影响场致阴极稳定性的因素.....	94
场致阴极的应用和展望.....	95
离子管中的场致发射阴极.....	97
第八章 氧化镁型自持发射冷阴极及其他新型阴极.....	99
氧化镁型自持发射的基本规律.....	99
氧化镁冷阴极的特性.....	102
P-N 结发射.....	104
薄膜冷发射——隧道发射.....	106

第一章 純金屬的热电子

发射和純金屬阴极

稍为注意一下就会发现：有电子管的收音机、电视机以及各种各样的电子仪器，在工作时，电子管的玻璃壳内有一个灼热的电极，在大型电子管中，这个电极甚至会发出耀眼的强光，象电灯泡一样。这个发热的电极，就是发射电子的电子源，称为阴极。一經加热，这个阴极就会发射出电子。这样就出现一个问题：电灯泡内灼热的灯絲会不会发射电子呢？会的，最初发现电子发射现象的实验正是用的电灯泡。我們在灯泡的灯絲旁放置一块金属板，把这个金属板接到电源的正端，灯絲接到負端，如图 1 所示，这时若将灯絲温度加高到白热，就会发现外电路中有电流流通。如果我們把金属板接电源負极，灯絲接电源正极，外电路中就没有电流。如果灯絲不加热，外电路中也沒有电流。这种现象，可以說明传导电流的是从白热灯絲发射出来的电子。在金属板接正灯絲接負时，灯絲发射出来的电子被金属板对灯絲产生的正电场拉过去，就构成了电流。而在金属板接負端灯絲接正端时，灯絲发射出的电子被負电场阻止在阴极表面上，出不来，因此外电路沒有电流。灯絲不加热沒有电子发射，当然也不会有电流。这种具有单方向导电电流的两个电极的灯泡是近代二极管的雛形。发射电子的灯絲又称为阴极(热电子阴极)，接收电子的金属板叫做阳极。

早在 1883 年，爱迪生 (Edison) 就发现了这种灼热的灯絲有电子发射出来的现象。不过当时他既沒有解释，也沒有加以利用。直到 1904 年，这种现象才被用来制造第一个电子管——两极管。两极管可以把交流电变成直流电，并且很快就被应用

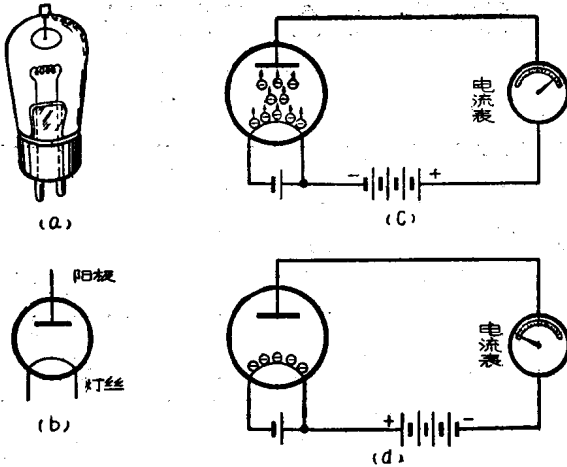


图 1 热电子发射的实验
(a) 二极管的构造, (b) 二极管的符号, (c) 发射电子被拉上阳极, (d) 发射电子被阻止在阴极表面上

于高频振荡的检波。1906年制成了热电子阴极三极管，三极管具有把小的电信号放大的作用，因此很快就被应用到无线电通信中，从而大大提高了接收机的灵敏度。三极管的振荡作用使得无线电发信机摆脱了火花发报的原始状态。因此，三极管的出现，使得无线电技术取得了很大的跃进。随着电子管的应用与发展，电子发射与阴极也得到愈来愈广泛的应用与改进。

最初研究的是纯金属的热电子发射现象，因此最早的电子管阴极也无例外地采用纯金属。现代虽然发展了许多种热阴极，但是并不能完全代替纯金属阴极。纯金属阴极在实际应用上仍占有一定的地位。因此，我们先从纯金属的热电子发射谈起。

金属是导电性能很好的材料。高悬在电杆上的输电线是

銅、鋁或其他金屬制成的，連接各種電器的也是金屬導線。我們知道金屬是靠它的電子運動來傳送電流的。既然金屬內存在着大量電子，為什麼在常溫下它們不能跑出金屬以外？怎樣才能使電子從金屬中跑出來？要解答這些問題，首先要知道金屬中電子的性能和阻礙電子跑出來的力。

金屬中的電子 自由電子的速度

我們知道，任何物體的原子，都是由原子核和繞核按一定規律不斷運動的電子組成。原子核帶的是正電，電子帶的是負電。依靠正負兩種電荷的相互吸引力，原子核把電子拉住，使它在一定的軌道上跑，正象太陽拉着地球、火星、金星等行星，使它們按一定的軌道繞日旋轉一樣。每個原子本身在電氣上是呈中性的，因為它核中的正電荷完全被繞核旋轉的電子的負電荷所平衡。

電子和原子的聯繫並不是絕對不能分開的。在一定條件下，離核較遠的外層電子會脫離原子。在失去電子的情況下，整個原子就帶正電，因為它核中的正電荷已經不能被核周圍電子的負電荷所平衡了。有時，原子也能從外面捉住幾個多餘的電子，原子的電子電荷就超過了核的正電荷，於是原子的電荷便成為負的了。電子的個數不合定額的原子叫做離子。缺少一個或幾個電子的原子，是正離子；具有過剩的電子的原子，是負離子。

金屬象任何物體一樣，是由金屬原子按一定規律排列構成。當大量原子有規則地排列成晶體時，因為原子與原子之間距離很近，原子最外層的電子（即價電子）由於離原子核較遠，此時將不單單只受它本身所屬的原子的影響，也受到相鄰原子核的強烈影響。這樣就使得這些外層電子不再是分別地屬

于晶体中各个原子，而是为整个晶体中的原子所共有。这些电子可以在金属中各原子間自由来去，因之称为自由电子。大家知道的金属导电性就是因为有这些自由电子存在的緣故。失去电子的金属原子，变成了正离子。

自由电子在金属的正离子間运动时，与金属离子或与其他电子不断地碰撞，而使它的运动方向和速度不断改变，因此它的运动是杂乱的。金属中平均每立方厘米約有 10^{28} 个自由电子。这么多的电子运动速度各各不同；要推断每个自由电子的运动状态是一件不可能的事。不过把自由电子按照它具有的速度或能量来分类，用統計的方法来推算速度在某一范围内的电子数目有多少，这是可能的。自由电子的速度在零和某一最大值之間。在绝对零度时，它們也不靜止，不过最快的电子动能不超过某一最大值 W_i 。当金属溫度升高时，自由电子获得額外能量，运动速度加快，这象鍋內的水分子受热而运动加快一样。有一部分电子的能量要超过 W_i 。溫度愈高，电子的速度愈大。在室溫下，自由电子平均速度达 100 公里/秒，它比近代火箭还快十倍！

很自然会产生这样的問題：金属中的自由电子既然具有这样大的速度，在常溫下为什么不能跑出金属以外去呢？

电子离开金属受到的阻力 逸出功

金属內部的自由电子虽然具有很大的动能，有从金属中跑出去的趋势，但在金属边界处，电子受着两种阻止它飞出去的力量。

首先，飞到金属边界的电子与在金属内部运动的电子不同。在金属内部，自由电子周围都是正离子，这些正离子对自由电子的作用力是互相抵消的。在金属表面，情况就两样了。

由于金属表面的正离子外面不再其他的正离子，如果自由电子跑到最外层的正离子外面时，它所受到的只有向金属内部拉的力，阻止电子向金属外面运动，使它的速度不断减小，最后，又被拉回到金属内部。这种飞出与飞回的过程是不断进行着的(图 2, a)。这样一来，在金属表面始终存在着一层电子，它和在金属最外表面的一层正离子形成了一个偶电层，如图 2, b 所示。移向表面的自由电子，一方面受到正离子的吸引力，另一方面还受着电子层的斥力。这就是阻碍电子飞出的第一种阻力，它的大小与电子在绝对零度时具有的最大能量 W_i 相当。也就是说，只有具有能量比 W_i 大的电子才能克服偶电层的阻碍。

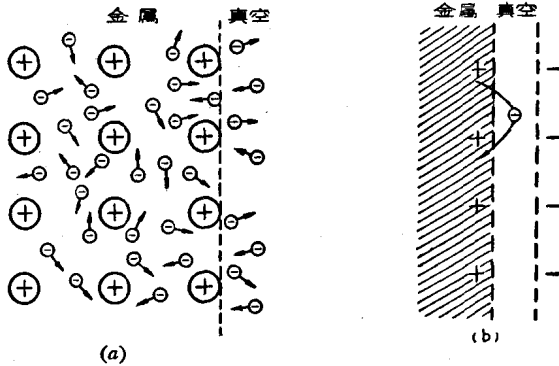


图 2 金属表面的偶电层

- (a) 自由电子在金属内部和表面运动的不同情况，
 (b) 自由电子跑出表面时受到偶电层阻力的示意图

金属的温度总高于绝对零度，例如我国的气温通常在摄氏零度（相当于绝对温标 273 度）以上，在这样的温度下，有部分电子的能量大于 W_i 。照说这部分电子能克服偶电层而从金属表面逸出。但事实上，在室温下观察不到电子发射现象。这

是因为在偶电层之外，电子还受到第二种阻力的緣故。

当电子飞离金属表面时，金属内部负电荷减少，因而金属由原来的电中性变为带正电荷。这样便产生对飞离电子的吸引力，要把电子拉回去。这个吸引力的大小可由电象法来确定，即离开金属表面距离为 x 的电子所受到金属的吸引力，等于在金属表面背后相同距离 x 处，有一与电子电荷相等的正电荷对该电子的作用，如图 3 所示。二电荷距离愈远，则吸引力愈小，当电子离开金属表面足够远（大于 10^{-6} 厘米）时，吸引力接近于零，可以认为电子脱离了金属。这种吸引力叫做电象力。由于电象力的存在，使得在室温下最快的电子也不能逸出。

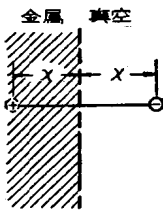


图 3 电子离开金属表面时，在金属中产生了正电荷

电子离开金属时受到的吸引力，与物体离开地面受到的地心引力相象。我们晓得，物体向上运动时，要克服地心引力做功。例如，向上抛一物体，物体在离开手时有一个初速度，也就是说，具有一个初动能。在向上运动时，受到地心引力的作用，速度逐渐减小，达到一定高度时，速度减到零。这时物体的动能全部变为势能，以后物体被地心引力拉回地面。只有速度巨大（11 公里/秒）的多级火箭，才能克服地心引力而离开地球，电子离开金属表面也要克服偶电层与电象力做功，因而电子运动的速度逐渐下降，当速度降至零时，又被拉回。要不被拉回，只有电子的速度足够大，大到可以克服电偶层与电象力的作用力。

电子在金属表面受到的阻止它逸出的作用，可以用图 4, a 的电位曲线图来表明。图中通过 0 的垂直线（纵轴）代表金属

和真空的交界面。和交界面垂直的直線 OX (橫軸) 表示离开金属表面的距离。沿纵軸表示空間各点的电位的大小, 而且从 O 向上的方向表示負电位。这样画是比較方便的, 因为电子带有負电荷, 某一点的电位越負, 电子在这一点上时所具有的位能就越大, 它到达这一点时就需要消耗更多的动能。这样, 图中曲綫上越高的地方, 就表示电子越难到达的地方。

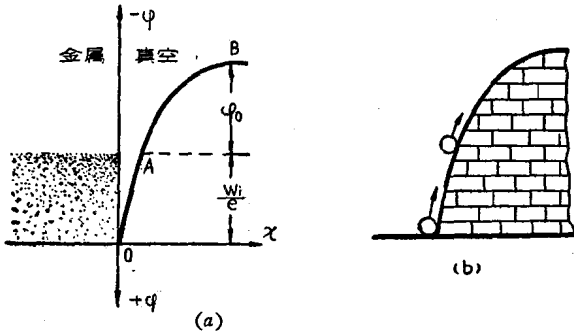


图 4 金属—真空界面上的电位壁垒
(a) 电位壁垒, (b) 电位壁垒与小坡的类比

图中曲綫中的 OA 段, 相当于金属表面偶电层的电位降落, 前面說过, 电子达到 A 点所需的能量与电子在绝对零度的最大能量 W_i 相当, 因此, A 点的高度为 $\frac{W_i}{e}$ (e 为一个电子的电量)。但是具有能量 W_i 的电子还不能飞出金属以外, 它还必須克服电象力的吸引力, 因此它必須再吸收 $e\phi_0$ 的能量, 才能到达图中的 B 点, 基本上克服金属对它的吸引力, 脱离金属对它的影响。这个能量 $e\phi_0$ 就称为“逸出功”。換句話說, 逸出功就是为了使具有最大能量 W_i 的电子逸出金属而要供給它的最小能量。

当然, 逸出功是可以用工的单位, 即用尔格来量度的。不

过，由于电子电荷量是固定的，因此我们可以引用以电子伏特来量度功的概念。一个电子伏特相当于一个电子从电位为 1 伏特的区域移到电位为零的区域时，所需作的功，它等于 1.6×10^{-12} 尔格。用电子伏特来量度功是很方便的，因为一个电子所作的功在数量上决定于电子在电场内最初与最终所在位置之间的电位差。例如，对于图 4, *a* 的情况来说，逸出功就等于 φ_0 电子伏特。

如果用地心引力来比喻电子在金属表面受到的阻碍，那末图 4, *a* 中的电位曲线便相当于小坡 (图 4, *b*)。当一个物体滚上小坡时动能渐渐减少，而位能渐渐增加。物体能否爬上坡顶，要看它的能量是否大于坡顶的位能。若物体具有的能量不能超过坡顶，那末，物体运动到中途，速度减到零，以后就又滚回来。金属中的电子和这相似，电子在爬电位“坡”时，因位能逐渐增大而动能逐渐减小。如果电子所具有的能量不足以克服电位“坡”的阻碍时，运动到中途，动能减少到零，于是又折回金属体内。所以在金属表面好象存在一道壁垒，阻碍着自由电子的外逸，我们把它称为电位壁垒。

很明显，电子具有的能量必须超过电位壁垒的高度才能逸出金属。在绝对零度时，最快的电子已具有能克服偶电层的能量 φ_0 ，这相当于图 4, *b* 中的小球已处在坡半腰上。只需再给电子加上克服电象力那一部分位能所需作的功，就可以使速度最快的自由电子脱离金属，这相当于处在半坡上的小球，要它越过坡顶，只需给它加入克服上半部小坡所需的功就行了。这部分功就是逸出功。

不同的物质具有不同的逸出功。几种物质的逸出功值列于下表中。

物质名称	铯	钠	钨	铟	钙	钪	镧	铷	铊	铍
逸出功 (电子伏特)	1.93	2.28	2.51	2.6	2.76	3.35	3.8	3.93	4.13	4.24
物质名称	铜	铁	硼	汞	钨	银	镓	金	铕	铂
逸出功 (电子伏特)	4.29	4.49	4.5	4.52	4.52	4.55	4.61	4.89	4.94	5.36

不論用什么手段，只要能使金属内的自由电子获得足以克服逸出功的額外能量，它們就可以跑出金属，构成电子发射。除了前面所說的加热阴极的方法外，用光照射阴极以及用电子轰击阴极的方法，都可以使金属内的自由电子获得足以克服逸出功的額外能量。用加热的方法获得的电子发射称为热电子发射，相应的阴极，称为热电子阴极。用光照射和用电子轰击的方法获得的发射，分别称为光电发射和二次发射。这二类电子发射现象将在后面給予詳細的討論。

金属的热电子发射现象

低溫时，金属内部的自由电子因能量太小，不能越过表面的电位壁垒。倘若把金属的溫度升高，一部分自由电子可能获得充分的能量，冲过电位壁垒，离开金属。金属的溫度愈高，金属内自由电子的动能大于逸出功的电子数就愈多，因此，发射电流也愈大。道舒曼 (Dushman) 推导出热电子发射电流密度与阴极溫度的关系式：

$$J_e = AT^2 e^{-\frac{e\phi_0}{kT}}$$

式中， J_e ——发射电流密度 (或称发射率)，单位是安/厘米²；

A ——对于大多数金属是一个常数，等于 60.2 安/厘