

阴极电子学的过去现在和将来*

张恩虬

(中国科学院电子学研究所)

提 要

本文讨论阴极电子学与物理学基础理论间的相互关系,从体效应中总结出来的固体理论,不能有效地解释电子发射的问题,因为电子发射主要地来源于表面。另一方面,各种形式的电子发射可用作探测固体表面的手段,对建立表面科学提供更多的信息。此外,文中对阴极电子学的性质和发展概况也作了论述。

一、引 言

阴极电子学是一门比较老的学科。如果从爱迪生效应(1884年)算起,快到一百年了。每个学科都要经历一段发生、发展到衰亡的过程。阴极电子学已经对近代科学技术做出很多的贡献,并且又出现发展缓慢、文章不多的情况。那么它是否已经到了衰老甚至垂死的阶段了呢?这是一个值得提出的问题。因为正确地回答这个问题,可使我们的力量放在刀刃上,这对快速地实现四个现代化是有益的。

要判断一门学科是否仍有生命力,应该根据两个基本点:(1)看它的基本科学问题是否完全被认识了;(2)看它的应用范围是否完全稳定,即指标是否已达到较高的水平,是否有在新的领域中应用的可能性等等。如果一门学科确已完成上面两点,那么只要在工业上加以发展便可,在科学上便没有进行研究的必要了。因为即使再研究,也是费力大而收效微的。本文的目的,就是具体地分析一下阴极电子学这门学科现在所处的阶段,判明它是否还有研究的价值。

二、光荣的历史

电子尚未被发现之前,人们已经观察到了电子发射现象。当时还不知道发射出来的东西是电子,所以错误地把它叫做热离子发射。可是电子发射使得汤姆逊测定电子的荷质比成为可能,从而发现了电子。后来便产生了一门应用很广的学科——电子学。

光子是人类接触得很多的另一个基本粒子。光的粒子说和波动说,曾是物理学中长期争论的问题。自麦克斯韦的电磁波学说提出以来,光即是一种电磁波得到了理论上和

* 1981年7月13日收到。

实验上的支持,波动说显然已获得全胜。在这种气氛之下,爱因斯坦根据光电子发射的实验事实:发射出来的电子的动能只与入射光的频率有关,而与光的强度无关,只有发射电子数目的多少,才与光的强度有关。他提出了著名的光电子发射方程,认为光子与电子的能量交换是一个量子过程,而光子在这过程中则表现出它的粒子性质。此后,密立根利用爱因斯坦方程以测定普朗克常数,与别的方法测得的相一致。证实了爱因斯坦的概念是正确的,从而建立了光子的波粒二象性,为量子论作出了重要的贡献。

当电子以一定的能量打到固体上,被它打出来的电子的能量分布如图 1 所示。能量低的电子(I)称为真正次级电子;另一组其能量与入射电子完全相等的电子(III)称为完全弹

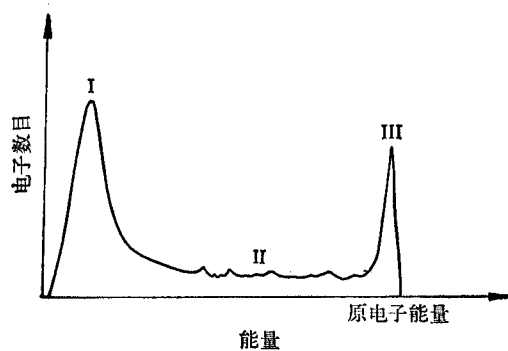


图 1 次级电子的能量分布图

Fig. 1 Secondary electrons as a function of primary bombarding energies

- I True secondary electrons
- II Inelastic reflection electrons
- III Elastic reflection electrons

性反射电子;能量在二者之间的电子(II)称为非完全弹性反射电子,我们将在后面讨论。戴维逊和革末在测量次级发射的过程中,发现了第(III)组完全弹性反射电子,当入射电子落到完整的晶体表面时,这些反射电子具有明显的角度分布,且其分布规律符合X光衍射的布喇格条件,说明电子和X光一样具有波的性质。此外,由晶格常数和衍射角所计算得的电子波长,与根据德布罗意物质波的公式由电压计算出的电子波长完全符合。这实验确立了电子的波粒二象性,从而为量子力学奠定了基础。

大家都知道,加一强电场可使电子发射出来。这是因为加上强电场可使发射体的表面势垒变薄,这时在真空的一边薛定谔波动方程也有解,即电子有穿过去的可能,称为隧道效应。所以场致发射现象是对薛定谔波动方程的一个有力验证。

从上面的几个事实可知:电子发射的观察和研究,对打开人类认识微观世界的大门起了作用。这是因为电子从固体发射出来的过程,牵涉到一些带根本性的问题,如电子的性质、光子的性质、电子与光子的相互作用、电子与电子的相互作用、表面势垒的性质,电子从束缚态过渡到自由态的机制等等。这些问题到目前有的解决了,有的还没有很好解决。那些已经解决的问题,则推动近代科学技术向前发展,如量子力学、固体物理、固体电子学等;那些还没有解决的问题,则成为当前的研究对象,如量子电动力学、表面科学、光电子学。

三、互相渗透 互相促进

关于阴极电子学的发展近况,已有很好的综述^[1]。本章只补充说明某些问题,使大家能进一步了解阴极电子学的特点,从而明确它所处的发展阶段。

学科之间总是互相促进的。既然阴极电子学对量子力学作过贡献,那么量子力学中的许多基本规律,自然是电子发射的基础。例如元素中的电子结构,对电子发射是起主要作用的。铯的化学性最活泼,它的逸出功也最低,但只在低温的光电发射体中合用。这是因为铯只有一个价电子,当它得到了这个电子的补充之后,便有可能脱离基底而蒸发,因而不适于作热阴极。而钡则有两个价电子,要使两个价电子同时获得补充的几率则小得多,因此钡的蒸发比铯难,可用作热阴极。良好的发射体,总是以元素周期表的左下角的元素和右上角的元素相配合。那么为什么氟不能起作用而只有氧能起作用呢?即使在光电阴极中铯也是与氧配而不是与氟配呢?这是因为氟的最外层只缺 1 个电子,得到电子补充之后,从量子数角度看便是稳定的了,只能起中毒作用,没有一分为二的性质。而氧的外层缺 2 个电子,它有一个正亲和势来接受第一个电子,但当接受了 1 个电子之后,再来第二个电子时其接受的亲和势便转变为负的。因此当氧的数量和位置合适时,对发射起促进作用,而当氧相对过量时,便起中毒作用^[2]。又如量子统计学中的费米能级,它不但具有普遍意义而且是研究电子发射的重要概念。

由于电子是从固体中发射出来的,人们都希望固体物理学能彻底地解决阴极的问题。但事实上却没有收到预期的效果。固体物理学中的能带论,虽然对金属和半导体等学科做出了辉煌的成绩,而在电子发射中则遇到困难。因为电子在固体内部运动的波函数是在三维无穷周期场的条件下求得的,当电子到达表面时,这个条件便被破坏了。过去我们总以为一种材料只有一个逸出功,因为电子在固体中运动是各向同性的。后来发现:在同一材料不同的晶面上,逸出功是不一样的,其数值可差到 1eV 以上。我们认识到:表面势垒是和原子排列的密度有关的;其关系的规律正是表面科学所研究的问题。即使在完整的单晶面上,其原子的排列情况也和体内的有所不同。由于表面上的原子所含的能量和体内的不同,为了使表面稳定,其表面能必须处于最低值,所以要重新调整(*Reconstruction*)。例如完整的氧化钡单晶,在体内 1 个钡邻近上下左右前后 6 个氧,氧也同样地邻近 6 个钡,在这种情况下电子的运动达到动态平衡。到了表面,1 个钡只邻近 5 个氧,上面那个氧不见了,氧也只与 5 个钡靠近,因此电子便处于新的条件下运动。认识电子在表面运动的规律,则比认识它在固体内部的难得多,这正是表面科学的出现,落后于固体物理的原因。而阴极问题的彻底解决,则更多地依赖于表面科学。

在表面科学的发展过程中,阴极电子学又一次起了重要作用。原因是观察和分析表面的工具大多数是根据电子发射的原理制成的。如扫描电子显微镜利用次级发射可以看表面的形貌。从图 1 的 II 部分,即非完全弹性反射电子中可以看到一些微小的起伏。如果将电子数目对能量微分,这些起伏便可以看得更加明显。它们反映出表面原子的特性,称为俄歇电子,从俄歇电子的能谱,可以测定表面上的元素。用 X 光或紫外光照射表面,分析它所发射出来的光电子的能谱,可看出元素,也可看出化学键,知道该元素是否处于

化合的状态。其它如电子衍射仪、场发射显微镜、场离子显微镜等都能有效地显示出表面的状态。

由于外延生长、离子溅散、超高真空等技术的发展,有助于获得原子清净的单晶表面,且可保持足够进行观察的时间。这样有助于弄清阴极的一些基本问题。钡在钨(110)面上吸附时,当逸出功达到最低时为 2×3 结构,原子数目为 2.35×10^{14} 个/cm²,并不是最密的单层排列。而到了紧密的钡单层时,逸出功反而达到最大值,随着层次的变厚,又回到纯钡的逸出功^[3]。使钡吸附在钨上,则室温下在(100)晶面上时逸出功随吸附度而上升,但在(110)晶面上则逸出功随吸附度而下降^[4]。由此可知,吸附后的逸出功变化,依赖于吸附原子和基底的电子态的互相配合;并不象以前那种单原子层偶极子理论那么简单。

实用阴极的表面更为复杂,基底是多晶,存在着裂缝、台阶、位错等,外来的杂质会吸附上去,体内的杂质会渗出来,且因温度、存放时间、工作寿命、真空状态等而发生变化,认识实用阴极的电子发射机制则比单晶面上吸附单一元素难得多。但由于技术上的迫切需要,人们还是从实践中摸索,不断地提高阴极的性能。如4:1:1配方的铝酸盐渍制阴极,在我国曾有过争论:一方认为这个配方必然会产生过多的自由钡,引起过量的蒸发;另一方则认为过多的氧化钡有可能与钨作用而产生钨酸钡,在钨酸钡Ba₃WO₆中氧多于钡,反而会吸附更多的自由钡。现在国际间的实践已经证明,在同一温度下,4:1:1配方是铝酸盐阴极中发射最大的,其发射与蒸发的比值也是最大的,见表1中最后两列。即使表面未金属化的4:1:1配方仍有很好的性能,国际间已普遍采用,如日本东芝用它作束管的阴极,西德选用它作直接电视广播卫星中大功率行波管的阴极。

表1 各种铝酸盐阴极的逸出功和电子发射性能,阴极激活后在1360K工作50小时^[5]

Tab. 1 Emission data from various aluminate dispenser cathodes, after activation and operation at 1360K for 50 hours

阴 极	理 查 森 数 值		场发射拒斥场数值		1418K 电子发射	1418 K 发射/蒸发 相对值
	ϕ_R (eV)	A_R (A/cm ² K ²)	ϕ_F (eV)	10—90%宽度 (eV)	1.5kV A/cm ²	
飞利浦A	1.78	16	2.23	0.19	15	2
飞利浦B	1.77	3	2.27	0.26	6	0.07
飞利浦M	1.67	5	1.93	0.16	21	3
飞利浦M (6000小时后)	1.45	0.5	2.74	0.25	6	3
S/M 公司 (4:1:1) _M	1.67	6	1.79	0.16	32	15

注:表中“M”表示金属化,即表面蒸上钡、钨等。S/M表示美国 Spectra-Mat 公司。

从表中还可发现:两种方法所测得的逸出功差异较大。理查森法测得的数值都比较小,互相之间也较相近,但与发射电流密度没有什么联系。拒斥场法的数值则与发射联系较好,其拒斥曲线10—90%的宽度表示逸出功分布的均匀性,数值小的逸出功比较均匀,这数值与发射的联系也是比较好的。我们知道:用理查森法测量时总是要降低阴极温度,此时的电流主要由低逸出功部分供应。从表中6000小时后那一行看,阴极经过蒸发、

中毒、溅散,有少部分的逸出功反而变低了,但大部分的逸出功变高了。因此发射变小, ϕ_R 变小, ϕ_F 变大,而 ϕ 的不均匀性变差。表中的数据表明:表面动态发射中心模型能反映出实用阴极的本质^[2]。

用钨粉混合 7% (重量) 的钽酸钡 $Ba_3Sc_4O_9$, 压制后在氢炉中 1570°C 烧结 15 分钟,然后用铝粉抛光并在氟利昂中超声洗净。激活后在 950°C 时可支取 10A/cm², 而在 1050°C 时可支取 35A/cm²[6]。这事实与上面的金属化一起考虑,说明虽然钡是电子发射的主要元素,但钽、钺、铌等对实用阴极的全面性能起着不容忽视的作用。

电子束加工和电子束仪器是近代技术的工具。它需要不用激活、耐中毒、工作温度低的阴极,因此硼化物又受到了重视。最近提出了六硼化钡阴极,可在 1000°C 时支取 0.5—1.0A/cm²,能满足上述的要求^[7]。

冷阴极是长期以来最为吸引人的。但由于稳定问题没有得到解决,应用受到很大的限制。随着高电压大电流相对论性电子束的应用,大功率毫微秒脉冲发生器的制成,针尖形状的保持已经不是十分重要的因素。当支取强大电流时针尖上的原子也蒸发出来,受电子轰击电离后又返回针尖,在针尖前形成一等离子体层,称为爆发式阴极。这种阴极在闪光 X 射线管、自由电子激光器等得到应用。随着微电子学技术的进展,已经有可能制造出大量相同的针尖。在直径为 1mm 的圆上,可做 5000 个尖,在约 250V 电压下可得 150mA。用 100 尖的作寿命试验,每尖支取 20 μ A, 23000 小时后仍然稳定。真空度的要求不高,在 10⁻⁷—10⁻¹⁰ 托范围内均可^[8]。负电子亲和势的冷阴极,过去存在着偏压把大部分电子都吃掉,能发射出来的电子不到万分之一的缺点。最近出现 5 层的磷化镓冷阴极,当中有一绝缘层以挡住到偏压极的电子,并且加成剂是渐变的,迫使电子在固体内运动的轨迹不易打到偏压极。效率可达 0.7%, 电流密度约为 1mA/cm², 电子速度分布的半高宽度为 0.3eV, 在硫化碲靶的视象管中已工作 3000 小时,尚未损坏^[9]。

光电阴极一直是一种研究得较多且又取得了明显成绩的。半导体技术的发展促使了 III—V 族负电子亲和势光电阴极的诞生,对电子的被激发和扩散过程,得到清楚的认识,但对电子通过表面 Cs—O 层而逸出的机制,则还需作进一步的研究。从应用观点看,近来将光电发射面直接成长在玻璃上而成的穿透式阴极,灵敏度为 1000 μ A/lm, 使得器件的设计大为简化,推动了夜视技术的发展。X 光天文学、真空紫外天文学是从更广泛的角度来了解宇宙。这就要求有特定光谱特性的光阴极。由于激光和光纤波导的出现,人类对光子的控制能力加强了,引出了一门崭新的光电子学。光电发射与光电子学有着密切的联系,估计二者之间将会互相促进。

次级发射中一个电子能打出多个电子,有放大作用,伏安特性中有负动态电阻,可以用作振荡,因此次级发射对电子器件很有用,其实磁控管就是靠这些过程工作的^[10]。但是次级系数高的发射体,往往在受电子轰击时易于分解。这是需要研究解决的矛盾。绝缘体有很高的次级发射系数。如果在表面建立一薄的导电层,使得次级电子发射之后,电荷不致于过份积累,使电势自动地变到系数为 1 的数值,便可以有应用的价值。微通导板就是根据这个概念制成的。它是象增强器中的重要部件。如果制成盘香式的单管,就是高增益的倍增器,对微弱电流的放大很有效。

自释电子发射是加上机械应力使金属产生形变时所放出的电子。自释电子的研究对

金属学有帮助,也可以从另一角度了解电子发射的本质。

电子学原来是研究信息传递的学科,但近来它的技术有向能源方面渗透的趋势。在太空中截获太阳能,将之转变为微波的计划,需要大功率、高可靠、高效率、长寿命的微波管,这就对阴极提出严格的要求。利用热电子发射时吸收能量,可以直接发出直流电,而不需要蒸汽涡轮和发电机。当它与其它装置联合应用时,总效率达到 60%。为了产生的电压高,阴极的逸出功要大,而阳极的逸出功要小。现在是充入铯蒸汽,铯很少吸附在高温的阴极面上,而多数吸附在低温的阳极上,从而降低了阳极的逸出功。

四、先人后己 前途似锦

阴极电子学有一个特点,就是“先天下之忧而忧,后天下之乐而乐”。拿一个电子管的设计来说,首先要有阴极性能的全部数据,才能选择合适的阴极。当管子制造出来了,全部参数合格了,管子的设计和制造的任务就算完成。但阴极的任务只能说完成了一半,必须等到有了足够长的寿命,才能证明这种阴极是好的。阴极电子学曾对人类认识微观世界起了先锋作用。又对人类探测表面状态起了耳目的作用。但可惜的是:阴极本身的问题还没有得到很好的解决。

从理论上说,即使纯金属单晶面,逸出功的计算尚未臻完善,更不用说实用阴极的发射机制了。热阴极和光阴极,仍有很多技术指标需要提高,应用范围也在扩大之中。场发射和次级发射的应用才刚刚开始。虽然扫描俄歇电子谱仪的束直径已小到十分之几微米,对微区分析显示出它的威力,但要精细地揭露发射中心的性质则还嫌不够,因为发射中心的大小估计为埃(\AA)的数量级。这就给电子光学和弱电流放大提出了尖锐的课题。X光电子能谱仪所激发的都是内层的电子,而电子发射最活跃却是外层的电子。看来要针对阴极问题进行研究,有发展可见光电子谱仪的必要。

热电发射、光电发射、场发射、次级发射、自释电子发射只是激励的方法不同,电子逸出的机制则是一样的。然而值得注意的情况是:国际间尚未见那个专家或单位对各种发射进行联合的研究。这是因为阴极的研究本身很难,进行一个方面的工作已经非常吃力,无暇顾及其它。同时也说明,阴极的研究尚处于分头探索时期,还没有达到联合攻关的阶段。因此前面还有许多工作等待我们去做。

从人类认识客观的历史过程看,没有办不到的事。飞天、登月等等都实现了。但每个发明创造的发生,都有它一定的客观条件,这是绝对不能超越的。那么阴极电子学的发展是否条件还不具备呢?我看是还要努力再创造一些条件,但由于近代技术发展很快,表面科学所积累的数据与日俱增,测量技术精益求精。估计阴极问题的突破,如果大家工作得好的话,当在本世纪之内。

参 考 文 献

- [1] 高怀蓉,福州大学学报,1980年,第1期,第1页。
- [2] 张恩虬,物理学报,25(1976),23。
- [3] D. A. Gorodetsky and Yu. P. Melnik, Surface Science, 62(1977), 647。
- [4] S. Zuber, Z. Sigorski and J. Polanski, Surface Science, 87(1979), 375。

-
- [5] D. Jones, D. McNeely and L. W. Swanson, *Applications of Surface Science*, **2**(1979), 232.
[6] A. Von Oostrom and L. Augustur, *Applications of Surface Science*, **2**(1979), 173.
[7] 会田敏之等, 日本金属学会志, **43**(1979), 10.
[8] I. Brodie and C. A. Spindt, *Application of Surface Science*, **2**(1979), 149.
[9] T. Sukegawa, H. Kan, T. Nakamura, H. Katsuno and M. Hagino, *Journal Appl. Phys.*, **50**(1979), 3780.
[10] 张恩虬, 电子学通讯, **1**(1979), 1.

THE DEVELOPMENT OF CATHODE ELECTRONICS

Zhang En-qi

(Institute of Electronics, Academia Sinica)

The interactions between theories of physics and cathode electronics are discussed. Some laws in solid state physics, derived from bulk effect, can not be effectively applied to electron emission which is mainly a surface phenomenon. On the other hand, most effects of electron emission can be used to probe a solid surface, giving more information to the building up of surface science. The present status and trend of development of cathode electronics are also discussed.