

# 阴极电子学

刘学志 编著

科学出版社

# 阴 极 电 子 学

刘学恂 编著

科 学 出 版 社

1980

## 内 容 简 介

本书详细地介绍了各种电子发射的机理,各种阴极的结构和性能,同时还介绍了一系列与之有关的现象及其解释。

全书共分五章,即热电子发射、场致电子发射、光电子发射、次级电子发射以及重粒子轰击阴极表面时的现象和自释电子发射。

本书介绍的内容虽属实验物理学的范畴,但对实验和仪器并未作太多叙述,而把重点放在对各种发射现象的研究结果和物理原理的讨论上。

本书可供从事电真空器件研制工作的科研人员和工程技术人员阅读,也可供大专院校有关专业师生参考。

## 阴 极 电 子 学

刘学恣 编著

\*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

石 家 庄 地 区 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1980年4月第一版 开本:787×1092 1/32

1980年4月第一次印刷 印张:16 1/2 插页:1

印数:0001—8,450 字数:376,000

统一书号:15031·260

本社书号:1625·15-7

定价: 2.05 元

## 前 言

阴极电子学是物理电子学的一个分支，它是一门主要研究固体的电子和离子发射的学科，所以有时也把它称做发射电子学。

阴极电子学虽是一门新兴的学科，但在这方面已经积累了大量实践经验和文献资料，并且现在还在逐年增多。

本书是根据国内外的大量文献资料编写而成的，也包括编著者自己的工作。本书在内容的选择上尽力贯彻“少而精”的原则，给出这门学科里的基本物理现象，它们的机理，以及有关的实际知识和发展趋向。叙述中尽可能作比较全面的介绍，并给出来源，供读者研究思考。同时还给出了重要的图表数据，以供查用。

几十年来国内外在阴极电子学方面进行了大量研究工作，但一直没有重大的突破。最近国内在热电子发射方面，发表了三篇“关于热电子发射理论的评述”文章。在总结了实用热阴极的长期生产实践和科学试验的结果后，对“单原子层和偶极子理论”和“氧化物阴极的半导体模型”提出了不同看法，提出了“动态表面发射中心”的发射理论。国外在光电子发射方面，做出了负电子亲合势发射体，它利用负电子亲合势表面的概念和单晶吸附材料，使得能在实际上可以获得的材料限度内，设计不同波长的有效光电发射体。从此将打破索默所说的，发展光阴极主要是靠“运气和聪明的推测”的局面。所以说负电子亲合势光阴极的成功是发展光阴极的突破。可以想见，在这些基础上，阴极电子学必将有更大的进展。

阴极电子学虽然属于实验物理学的范畴，但本书对实验和仪器并未作太多叙述，而把重点放在对各种发射现象的研究结果和物理原理的讨论上。力图使读者对各种发射现象有一个比较明确的物理概念，对发射机理有一个比较全面的了解。

阴极电子学既是以固体的电子理论为基础的，所以书中讨论了固体理论和半导体理论的某些问题，此外，在很多情况下，研究发射现象，必须熟悉带电粒子在两电极间运动的规律，所以对这一方面也作了介绍。

由于编著者水平有限，时间仓促，书中一定有许多错误和不当之处，请读者批评指正。在编写过程中，张恩虬、卞彭、李小琼、陶兆民、叶毓林、许泽裕等同志，以及四机部 1412 所和清华大学的同志审阅了有关章节，提出了许多宝贵意见，在此一并致谢。

**编著者**

# 目 录

绪论 阴极电子学的内容 .....	1
第一章 热电子发射 .....	4
§ 1 热电子发射现象 .....	4
§ 2 热阴极的分类 .....	7
§ 3 有效热阴极(制备、性能和参量) .....	13
3-1 纯金属阴极 .....	18
3-2 薄膜阴极 .....	25
3-3 厚涂层阴极 .....	45
3-4 金属陶瓷阴极(储备式阴极) .....	97
3-5 其他新的发射材料 .....	110
3-6 结语 .....	111
3-7 热子 .....	113
§ 4 有效热阴极的应用 .....	117
4-1 用于小功率和中功率电子管的阴极 .....	118
4-2 用于大功率电子管的阴极 .....	118
4-3 磁控管用的阴极 .....	120
4-4 电子束管和速调管用的阴极 .....	121
4-5 离子器件用的阴极 .....	123
4-6 气体放电光源用的热阴极 .....	124
§ 5 热电子发射的规律 .....	126
5-1 固体中的电子 .....	126
5-2 热电子发射方程 .....	149
5-3 逸出电子的一些性质 .....	154
§ 6 费米能级、逸出功和接触电势差 .....	156

6-1	费米能级 .....	156
6-2	逸出功 .....	170
6-3	金属的内电势和内外接触电势差 .....	191
<b>§ 7</b>	<b>电场对发射的影响和发射电流的测量</b> .....	<b>200</b>
7-1	减速场下的电流 .....	201
7-2	加速场下的电流(肖特基效应) .....	204
7-3	空间电荷限制下的电流 .....	204
7-4	理想二极管 .....	209
7-5	从加速场电流(饱和电流)外推求零场电流 .....	211
7-6	测量发射电流的脉冲法 .....	212
7-7	测量发射电流的低温法 .....	214
7-8	测量阴极活性的新方法 .....	215
<b>§ 8</b>	<b>阴极温度的测量</b> .....	<b>217</b>
8-1	物体在高温时的辐射 .....	218
8-2	能量温度 .....	220
8-3	亮度温度 .....	221
8-4	颜色温度 .....	222
8-5	光测高温计 .....	223
8-6	光谱辐射系数的测定 .....	225
8-7	温差电偶法 .....	227
8-8	电阻法 .....	228
8-9	谐波分量法 .....	229
<b>§ 9</b>	<b>逸出功的测量</b> .....	<b>233</b>
9-1	理查森直线法 .....	233
9-2	量热法 .....	237
9-3	接触电势差法 .....	239
9-4	结语 .....	241
<b>第二章</b>	<b>场致电子发射</b> .....	<b>244</b>
<b>§ 10</b>	<b>金属尖端的外场致电子发射</b> .....	<b>245</b>
10-1	场致电子发射的定性说明 .....	246

10-2	金属场致发射的实验研究 .....	250
10-3	尖端场发射的稳定问题 .....	254
10-4	尖端场致发射的实际应用 .....	255
10-5	场致发射的定量方程 .....	257
10-6	场致发射方程的推导 .....	264
10-7	温度对场致发射的影响——热场致发射 .....	273
<b>§ 11</b>	<b>半导体的外场致发射 .....</b>	<b>282</b>
11-1	半导体的外场致发射的理论 .....	282
11-2	半导体场致发射的实验研究 .....	283
<b>§ 12</b>	<b>内场致发射 .....</b>	<b>289</b>
12-1	在内部存在强场的介质(半导体)中可能产生的 主要效应 .....	289
12-2	介质薄膜(介质涂层)的内场致发射 .....	293
12-3	肖特基势垒冷阴极 .....	309
12-4	反向偏压半导体 p-n 结的电子发射体 .....	310
12-5	负电子亲合势冷阴极 .....	313
12-6	结语 .....	315
<b>第三章</b>	<b>光电子发射 .....</b>	<b>317</b>
<b>§ 13</b>	<b>金属的光电子发射 .....</b>	<b>318</b>
13-1	斯托列托夫定律 .....	319
13-2	爱因斯坦定律 .....	319
13-3	光电子的能量分布的实验研究(爱因斯坦定律 的验证)和发生光电效应的深度 .....	321
13-4	金属的光电效应的光谱特性曲线, 光的极化的 影响 .....	327
13-5	金属的光电子发射的理论 .....	335
<b>§ 14</b>	<b>半导体和绝缘体的光电子发射 .....</b>	<b>347</b>
14-1	本征半导体和绝缘体的光电子发射 .....	348
14-2	杂质半导体的光电子发射 .....	351
14-3	半导体的和金属的光电子发射的对比 .....	353



§ 15 有效(实用)光阴极 .....	356
15-1 作有效光阴极的材料应具备的条件 .....	356
15-2 有效光阴极简介 .....	357
15-3 氧铯光阴极 .....	362
15-4 铋铯光阴极 .....	372
15-5 铋银氧铯光阴极 .....	376
15-6 多硷金属光阴极 .....	378
15-7 负电子亲合势光阴极 .....	380
15-8 其他光阴极 .....	384
<b>第四章 次级电子发射 .....</b>	<b>387</b>
§ 16 金属的次级电子发射 .....	388
16-1 金属的次级发射系数 .....	388
16-2 金属的次级电子的初速分布 .....	402
16-3 金属的次级发射的理论 .....	412
16-4 金属的次级发射的其他特征 .....	427
§ 17 半导体和绝缘体的次级发射 .....	430
17-1 半导体和绝缘体的次级发射系数的测量方法 .....	430
17-2 半导体和绝缘体的次级发射系数的测量结果 .....	435
17-3 绝缘体和半导体的次级发射的机理 .....	440
§ 18 有效次级发射体 .....	442
18-1 半导体型的有效次级发射体 .....	445
18-2 氧化物型的有效次级发射体 .....	448
18-3 合金型的有效次级发射体 .....	451
18-4 负电子亲合势次级发射体 .....	456
18-5 玻璃次级发射体 .....	456
18-6 透射式次级发射体 .....	461
§ 19 热阴极的次级发射 .....	465
<b>第五章 重粒子轰击阴极表面时的现象和自释电子</b>	
<b>发射 .....</b>	<b>473</b>
§ 20 重粒子轰击下的电子发射 .....	473

20-1	撞出系数 $\gamma$ .....	474
20-2	被撞出电子的速度分布 .....	476
20-3	重粒子撞出电子的理论 .....	477
20-4	半导体和绝缘体在离子轰击下的电子发射 .....	479
<b>§ 21</b>	<b>表面电离现象</b> .....	<b>480</b>
21-1	测量离子发射的方法 .....	480
21-2	沙哈-郎缪尔方程及其应用 .....	482
21-3	离子发射与时间的关系和它的应用 .....	489
<b>§ 22</b>	<b>阴极溅射</b> .....	<b>490</b>
22-1	阴极溅射系数和离子的“效率” .....	491
22-2	阴极溅射的其他特性 .....	493
22-3	阴极溅射的理论 .....	494
22-4	离子撞击固体表面所引起的离子发射现象 .....	495
<b>§ 23</b>	<b>自释电子发射</b> .....	<b>498</b>
	<b>参考文献</b> .....	<b>505</b>
	<b>中外人名对照表</b> .....	<b>514</b>

## 绪论 阴极电子学的内容

在所有的真空的和充气的电真空器件中，电子发射过程——电子从阴极逸入真空器件的高真空中，或充气器件的气体媒质中的过程——起着重要的作用。在阴极上除了有电子发射之外，在一定性质的气体和阴极表面下，还能引起所谓表面电离过程，即撞击阴极的气体分子或原子的电离过程。在技术电子学中的某些特殊情况下，除了阴极的电子发射之外，还得考虑阳极的正离子发射和吸附在阴极上的负离子发射。

因此，阴极电子学的主要内容就是研究金属、半导体和绝缘体的电子和离子发射。

所有的物体里都含有大量的电子，但是这些电子在常态下所具有的能量都不足以逸出物体。因此要把它们从物体里释放出来，必须另外给予它们能量，或者设法把阻碍它们逸出物体的力消除。这样，不论是从科学系统性来看，或是从实用体系来看，都最好是按照电子获得的外加能量和克服阻碍它们逸出的力的方式来分类。由此电子发射过程主要分为下列四种基本形式。

(1) 热电子发射。给予电子能量的方式是加热物体。电子在物体内部无序热运动的能量随温度的增高而增大。其中有的电子就能够克服抑制它们逸出的阻力而逸出物体。

(2) 场致电子发射。又称冷发射或自电子发射。它是在物体表面上加以很强的电场，大大地削弱了阻碍电子逸出物体的力，再借所谓隧道效应而产生的发射。

(3) 光电子发射。亦称外光电效应，以与电子不逸出物

体的内光电效应区别开。它是以光辐射的形式给予电子能量的。电子在吸收了足够大的光量子的能量后，就可能逸出物体。

(4) 次级电子发射。靠轰击物体表面并穿入物体内部的电子把动能传递给物体内的电子，使它们得到足够的能量而逸出。

我们将对这四个主要方面，特别是热电子发射作比较详细的介绍。然而除了上面提到的四个主要方面之外，尚有重粒子轰击阴极表面时的现象和新近才引起较多注意的所谓自释电子发射 (exoelectron emission, экзо-электронная эмиссия)。

重粒子轰击阴极表面时的现象是很复杂的，它包括：(1) 在重粒子轰击下的电子发射 (离子-电子发射)，(2) 在重粒子轰击下的表面电离，(3) 在重粒子轰击下的阴极溅射。在这些方面我们将作简要的介绍。

至于自释电子发射，由于发射电流很小，不能作为电真空器件的电子源，但它对表面状态很敏感，在固体的表面问题研究中可能有用处，所以我们对它也将作简要的介绍。

上面所说的，只是按激发电子的方式不同来分类的，便于认识电子发射的过程和在不同条件下应用它们。但它们之间往往互相渗透。例如，在磁控管中，由于有电子回轰阴极，所以是热电子发射和次级电子发射同时起作用。又如，对于一般的光阴极，热发射与光电发射相比较是很小的，可以忽略不计。但在应用光阴极的微光夜视器件中，由于灵敏度大大提高了，所以热电子发射和场致电子发射 (即所谓无照暗电流)，便成了一个需要认真考虑的因素。

阴极电子学是物理学的一个分支。要研究电子怎样从固体中逸出到真空中，便要研究电子在固体中运动的规律，这就

是固体物理学。实践证明：有效的电子发射体都是些化合物，而不是纯金属。这就要研究生成化学键后的电子运动规律，即所谓化学动力学；研究各种元素结合后的电子能态和核力场的关系，以利于找出新的电子发射材料。电子发射必然要通过表面，而固体表面对电子来说是凹凸不平的，表面经常受到电磁辐射，电子和离子的轰击，因此表面状态是复杂多变的。这就给阴极电子学的研究带来一定困难。近年来表面科学有了很大的发展，这必将对阴极电子学起很大的促进作用。

阴极电子学在不长的时间内就成为一门重要的学科，是与无线电技术和电真空器件的发展分不开的。阴极电子学的每一重大进展，无一不是在生产的迫切需要下得到的；而每当它得到进展后，又反过来促进了生产。例如氧化物阴极在1904年就发现了，但是一直到二十年代有了无线电广播，迫切需要具有高效率阴极的电子管时，它才获得了较大的发展。很明显，由于氧化物的发展，又反过来促进了电子管生产和无线电技术的发展。近代的新型阴极也都是在超高频管等的要求下研制出来的。

目前向阴极电子学提出的要求，在理论方面是深入研究各种发射现象的机理，在实用方面是做出具有优良性能（效率高、电流密度大、总电流大、噪声低、可靠性高、寿命长等等）的阴极。

阴极电子学虽然在较短的时间内就发展成为一门独立的学科，但是它还远远不能满足生产和科学发展的要求。因而这就给阴极电子学工作者提出了艰巨而重大的任务，并展现出广阔的发展前景。

# 第一章 热电子发射

## § 1 热电子发射现象<sup>[1~4]</sup>

热电子发射是在二百多年前观察空气中灼热物体的电荷损失时发现的。当时由于存在有空气，就使这种现象的研究复杂化了。后来在 1883 年爱迪生在白炽灯泡中另加一个电极

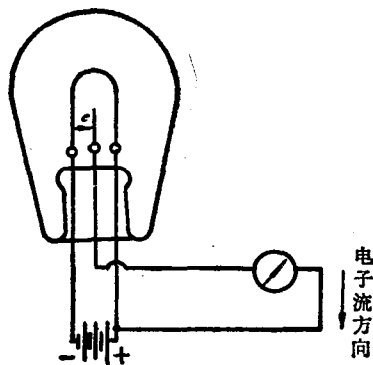


图 1-1

（图 1-1），便第一次在真空中观察到了这一现象，即观察到当灯丝之间的另一电极接于电源的正端时，在检流计中将会有电流流过；而当另一电极接于电源的负端时，就没有电流。当时把这一现象称做爱迪生效应。爱迪生效应的本质直到 1897 年才被汤姆森揭示。他在确定

电子的电荷  $e$  与质量  $m$  的比值的实验中证明灼热物体发射的电荷是电子。

后来进一步作实验，用纯金属，例如钨丝作阴极和另一金属板作集电极，做成一个二极管（图 1-2）。加热灯丝到发光。当集电极上加正电压时，就有电流如图里箭头所示，表示有电子从阴极发射出来。此发射电流最初随着集电极电压  $U$ 。很快地上升，继而较慢，最后几乎不变。我们称这时的电流为饱

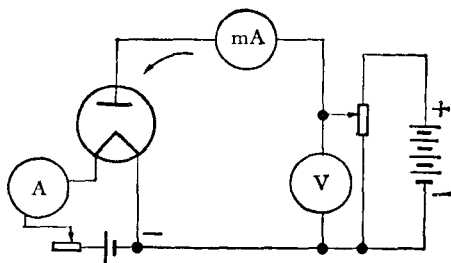


图 1-2

和电流  $I_s$  (实际上它仍随  $U_a$  有极微小地上升)。当我们把饱和电流  $I_s$  与发射这电流时的温度  $T$  的关系画成曲线, 则如图 1-3 所示。从图可见发射电流密度随温度的变化非常快。例如, 当  $T$  从 2400 K 增到 2500 K 时 (即约增高 4%), 发射电流就增大 150%。实际上实验数据在很大的范围内都近似地符合于下列方程:

$$j_s = ae^{-b/T}, \quad (1-1)$$

其中  $a, b$  是两个实验常数。对于许多不同金属, 其  $a$  的数值是很相近的, 但是其  $b$  的数值则不相同。

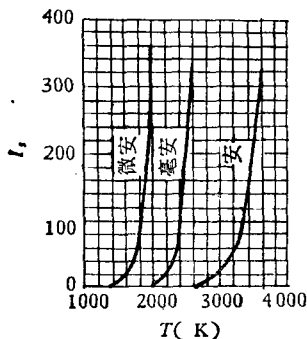


图 1-3

后来经过理查森、杜什曼等人的更深入地研究和更精确地推导, 得到所谓理查森-杜什曼发射方程, 或简称理查森发射方程:

$$j_s = A\bar{D}T^2 e^{-e\phi/kT}, \quad (1-2)$$

式中  $j_s$  为阴极发射的电流密度 (安/厘米<sup>2</sup>),  $A=120$  安/厘米<sup>2</sup>·度<sup>2</sup>, 是普适的发射常数,  $\bar{D}$  是阴极表面的平均电子透射系数,  $T$  是阴极的绝对温度,  $e\phi$  为逸出功, 就是使电子逸出阴

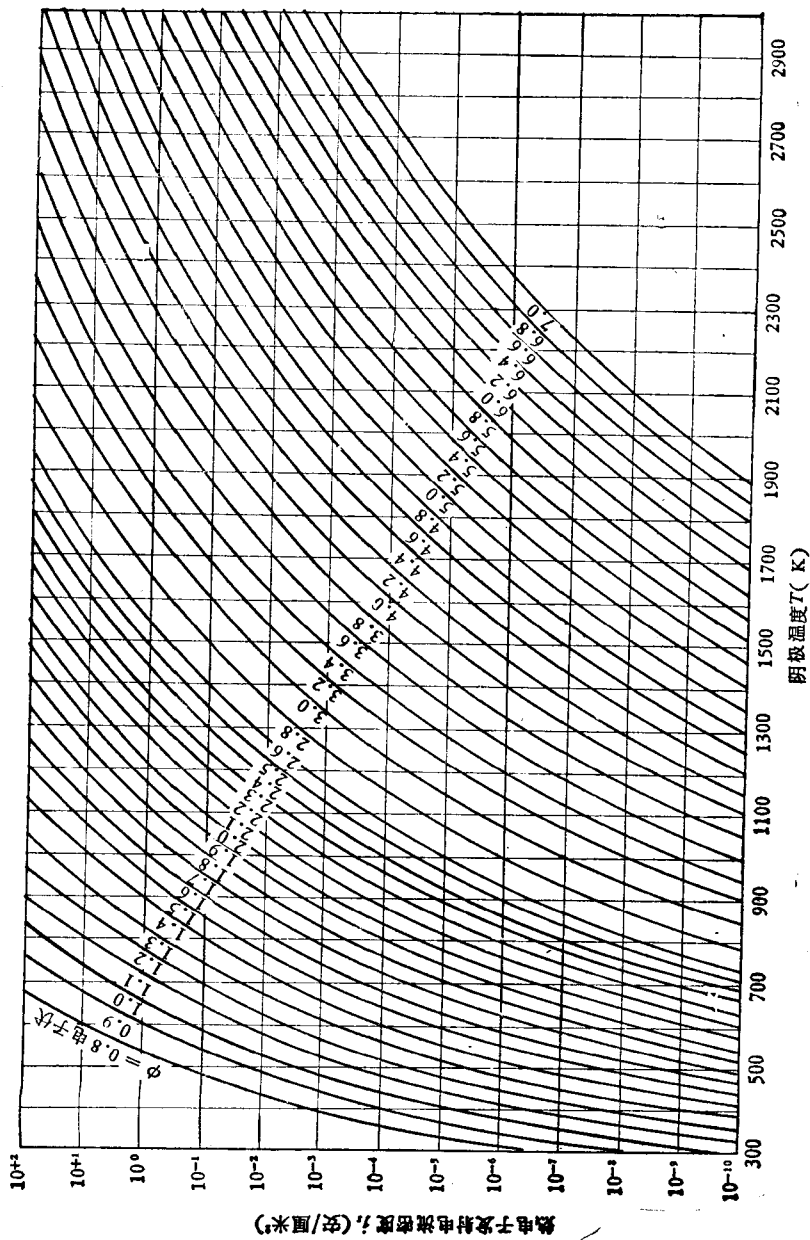


图 1-4

不同逸出功  $\phi$  (电子伏) 下, 饱和电流密度  $j_s$  (安/厘米<sup>2</sup>) 与温度  $T$  (K) 的关系曲线



极所需的最少能量,  $k=1.38 \times 10^{-23}$  瓦·秒/度, 是玻耳兹曼常数。

这是一个最一般化的公式, 它表明热电子发射与发射体的温度和电子逸出功有密切关系(图 1-4)。关于这个公式, 后面还将详细讨论。

在此以后, 对热电子发射的研究主要是, 发射本领与阴极物质的物理、化学性质之间的联系, 发射本领与外界作用因素之间的关系等等方面。对有效热阴极应用的研究也很重视。

## § 2 热阴极的分类

为了解决实际需要, 为了摸清各种物质的发射性能, 在一定理论指导下, 过去几十年内曾对周期表中有可能应用的元素, 及其化合物进行过大量的系统的实验研究。找到了很多热电子发射体。现在按它们的制备材料分为四大类型。

(1) 纯金属阴极。

(2) 薄膜阴极, 即在金属上覆盖以活性物质薄膜的阴极。

(3) 厚涂层阴极, 在多数情况下, 这类阴极是在金属芯子上涂敷一层较厚的电阻较大的发射物质层做成的。

(4) 金属陶瓷阴极, 这类阴极在发射本质上一般是薄膜阴极和厚涂层阴极的组合, 但在结构上并不是前三类阴极的组合变体。它的化学成分是复杂的, 它是用多孔的金属基底浸渍以活性物质做成的, 或者是把金属(主要是难熔金属)粉末和作为活性物质源泉的化合物的混合物在高压下压实, 然后在高温下烧结做成的。这类阴极由于有大量活性物质储备, 或者说有大量活性物质补给, 所以又称做储备式阴极, 或者补给式阴极。更由于它们问世较晚, 所以也称做新型阴极。