

高等学校教材

电子器件

应根裕 徐淦卿

清华大学出版社

内 容 简 介

本书介绍常用电子器件的工作原理、结构和主要参量,以讲述器件内的物理过程为主。

全书共分10章。前4章介绍电子发射和真空电子器件(栅控管、光电倍增管、电子束管和微波电子管);第五—九章介绍半导体器件,包括双极型晶体管、场效应管、集成电路、光电器件和微波半导体器件;最后一章介绍激光器件(气体激光器、固体激光器和半导体激光器)。

本书为全国高等工科院校物理电子技术专业规划教材,也可供生产、使用各类电子器件的科技人员参考。

电 子 器 件

应根裕 徐淦卿 编著

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京昌平区振南排版厂排版

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

☆

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 25.5 字数: 595 千字

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数: 0001-5000

ISBN 7-302-00386-6/IN·7 (课)

定价: 5.05 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986—1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材 1986—1990 年编审出版规划,由《电子物理与器件》教材编审委员会《电子物理与器件》编审小组组织征稿、评选、推荐出版的。

本教材由清华大学应根裕和南京工学院徐淦卿合编,西安交通大学钱慰宗担任主审。

本课程的参考学时数为 70 学时,其主要内容为介绍各类电子器件的工作原理。全书共分 3 篇 10 章。

第一篇共 4 章,主要介绍真空电子器件及电子发射,着重介绍电子束管和微波电子管。真空电子器件在电视、微波、夜视、大功率发送等方面仍有广泛的用途,有些管种虽然已基本不使用,但其中所包含的一些物理概念具有普遍意义,所以仍略为提及,以引出这些重要概念。

第二篇共 5 章,涉及固体器件的主要类型,包括双极型半导体器件、场效应器件、集成电路、半导体光电器件和微波半导体器件。

第三篇简要地介绍各类激光器的工作原理,篇幅不多,但有关激光器的主要物理概念都提及了。

电子器件是各种电子设备和电子仪器的核心。本书的目的是使读者对电子器件的工作原理有一个基本了解,这对于电子器件的研制者和使用者都是十分必要的。

由于电子器件的迅速发展,无论是半导体器件,还是真空电子器件都处于巨大的变革之中。本书力求介绍给读者的是当前仍在广泛使用着的各种电子器件,并扼要指出发展方向。全书以讲述器件工作的物理过程为主,辅以少量必要的数学手段。由于各种电子器件所涉及的物理原理十分广泛,实施的方法往往又十分巧妙,所以本书对于巩固与深入理解各种电子物理规律也是很有益的。

本教材由应根裕编写第一、二、三、六、七、八章,徐淦卿编写第四、五、九、十章。应根裕统编全稿。参加审阅工作的还有西安交通大学张屏英。

由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一篇 真空电子器件

引言	1
第一章 热电子发射与栅控电子管	2
§ 1.1 热电子发射	2
1.1.1 热阴极的基本参量与器件对它的要求	2
1.1.2 纯金属阴极	3
1.1.3 原子薄膜阴极	4
1.1.4 氧化物阴极	5
1.1.5 其它类型热阴极	8
1.1.6 次级电子发射	9
§ 1.2 二极管	13
1.2.1 空间电荷限制流的概念	13
1.2.2 形成空间电荷限制流的物理解释	14
1.2.3 平板二极管的二分之三次方定律	16
1.2.4 实际特性曲线与二分之三次方定律的差别	16
§ 1.3 三极管	17
1.3.1 三极管中的电位分布	18
1.3.2 等效二极管	20
1.3.3 三极管的电流流通规律及其参量	22
1.3.4 三极管放大器	25
§ 1.4 多栅管	26
1.4.1 三极管应用的局限性	26
1.4.2 四极管	27
1.4.3 五极管	28
1.4.4 束射四极管	30
§ 1.5 栅控管的局限性	32
习题	33
第二章 光电发射与光电倍增管	36
§ 2.1 光电发射的基本规律和主要参量	36
§ 2.2 半导体的光电发射	37
§ 2.3 实用光电阴极	41
§ 2.4 负电子亲和势 (NEA) 光电阴极	44
§ 2.5 光电倍增管的工作原理	47
§ 2.6 实用次级电子发射体	49
§ 2.7 光电倍增管的结构	51
2.7.1 阴极区	51
2.7.2 电子倍增系统	52
§ 2.8 光电倍增管的参数和特性	54
§ 2.9 光电倍增管的发展	57
§ 2.10 象管	59
习题	62

第三章 电子束管	64
§ 3.1 摄像管	64
3.1.1 工作原理	65
3.1.2 摄像管靶面	66
3.1.3 摄像管的参量	69
3.1.4 摄像管的电子光学系统	72
3.1.5 微光摄像管	75
3.1.6 单管彩色摄像管	76
§ 3.2 黑白显象管	79
3.2.1 人眼的生理特点	79
3.2.2 对显象管的要求	79
3.2.3 显象管的主要部件	81
3.2.4 显象管中为提高亮度与对比度所采取的措施	85
§ 3.3 彩色显象管	87
3.3.1 色度学简介	87
3.3.2 彩色显象管的发展史	90
3.3.3 精密一列式自会聚彩色显象管	93
3.3.4 自会聚原理	95
3.3.5 彩色荧光屏的涂复	100
3.3.6 其它类型彩色显象管	100
§ 3.4 示波管与定位管	102
3.4.1 示波管	102
3.4.2 定位管	104
习题	105
第四章 微波电子管	107
§ 4.1 感应电流	107
§ 4.2 电子流与电场的能量交换	109
§ 4.3 双腔速调管	111
4.3.1 概述	111
4.3.2 高频电场对电子的速度调制	111
4.3.3 输入间隙的电子注负载	113
4.3.4 群聚过程	114
4.3.5 群聚电流的谐波分析	117
4.3.6 输出谐振腔间隙中的能量交	118
§ 4.4 双腔速调管放大器、振荡器和倍频器	119
4.4.1 双腔速调管放大器	120
4.4.2 双腔速调管倍频器	121
4.4.3 双腔速调管振荡器	121
4.4.4 多腔速调管	122
§ 4.5 反射速调管	125
4.5.1 概述	125
4.5.2 小信号反射速调管群聚理论	126
4.5.3 反射速调管谐振腔间隙的电子导纳	128
4.5.4 反射速调管振荡器	129
4.5.5 反射速调管的电子调谐	131
§ 4.6 行波管的小信号理论	133
4.6.1 概述	133
4.6.2 电子注与行波场的相互作用	134
4.6.3 行波管的小信号理论	136
§ 4.7 行波管的参数和特性	141
4.7.1 输入-输出幅值特性	141
4.7.2 行波管的效率	142
4.7.3 带宽	143
4.7.4 行波管自激振荡的抑制	144

§ 4.8 返波管	146
4.8.1 周期慢波系统的空间谐波	146
4.8.2 返波管的工作原理	148
4.8.3 返波管的振荡区	149
4.8.4 返波管的电子调谐	151
§ 4.9 磁控管中电子与高频场的相互作用	152
4.9.1 磁控管概述	152
4.9.2 静态磁控管中的电子运动	153
4.9.3 磁控管的谐振系统	157
4.9.4 相互作用空间内的高频场结构	150
4.9.5 磁控管中电子与高频场的相互作用	161
§ 4.10 磁控管振荡器	164
4.10.1 自激条件	164
4.10.2 磁控管振荡的稳定性	165
4.10.3 磁控管的电子效率	167
4.10.4 磁控管的工作特性和负载特性	168
4.10.5 磁控管的频率调谐	169
4.10.6 磁控管的典型特性参数	171
§ 4.11 正交场放大管	171
4.11.1 分布发射式正交场放大管	171
4.11.2 注入式正交场放大管	173
§ 4.12 回旋管	178
4.12.1 概述	178
4.12.2 回旋管中电子的静态运动	178
4.12.3 回旋管中电子的群聚	180
4.12.4 回旋管的典型结构和参数	181
习题	182

第二篇 半导体器件

第五章 双极型半导体器件	185
§ 5.1 半导体中载流子的统计分布和非平衡载流子	185
5.1.1 载流子的统计分布	185
5.1.2 非平衡载流子	187
§ 5.2 PN结	190
5.2.1 概述	190
5.2.2 平衡PN结	191
5.2.3 PN结空间电荷区中的电场	193
5.2.4 PN结的伏安特性	195
5.2.5 PN结的电容	200
5.2.6 PN结的击穿	202
§ 5.3 半导体二极管	203
5.3.1 整流和检波二极管	203
5.3.2 开关二极管	205
5.3.3 稳压二极管	207
§ 5.4 晶体管的直流特性	208
5.4.1 晶体管中的电流传输	208
5.4.2 电流放大系数和晶体管的放大作用	212
5.4.3 晶体管的静态特性曲线	212
5.4.4 晶体管的静态参数	214
§ 5.5 晶体管的频率特性	216
5.5.1 晶体管的等效电路	216
5.5.2 晶体管的高频参数	218
§ 5.6 晶体闸流管	222

5.6.1 晶闸管的结构与基本特性	222
5.6.2 晶闸管工作原理	223
5.6.3 晶闸管的主要特性参数	225
§ 5.7 单结晶体管	225
习题	227
第六章 场效应器件	230
§ 6.1 结型场效应晶体管 (JFET) 与肖特基场效应晶体管 (MESFET) 的工作原理	231
6.1.1 硅与砷化镓中电子速度-电场效应	231
6.1.2 原理简述	231
6.1.3 工作过程的物理分析	233
6.1.4 场效应器件的参量	238
§ 6.2 MESFET的结构及应用	239
§ 6.3 绝缘栅场效应晶体管 (MOSFET)	240
6.3.1 理想MOS结构的特性	240
6.3.2 MOS场效应管的特性	245
6.3.3 短沟道MOS场效应管	250
6.3.4 不挥发存储器	252
§ 6.4 电荷耦合器件 (CCD)	256
6.4.1 SCCD 工作原理	256
6.4.2 BCCD 工作原理	262
6.4.3 CCD的应用及展望	263
习题	265
第七章 半导体集成电路	267
§ 7.1 半导体集成电路的种类及其特点	267
§ 7.2 双极型半导体集成电路的基本制造过程	268
7.2.1 集成电路主要工艺流程	268
7.2.2 光刻	270
§ 7.3 集成电路中的有源元件	273
7.3.1 集成电路NPN晶体管	273
7.3.2 集成电路PNP晶体管	273
7.3.3 集成电路二极管	275
§ 7.4 集成电路的无源元件	277
7.4.1 集成电阻器	277
7.4.2 集成电容器	279
7.4.3 互连	281
§ 7.5 隔离技术	283
§ 7.6 MOS场效应集成电路	286
§ 7.7 集成电路构造举例	288
习题	290
第八章 半导体光电器件	292
§ 8.1 电致发光器件	292
8.1.1 电致发光屏 (EL)	292
8.1.2 发光二极管 (LED)	294
§ 8.2 光检测器	302
8.2.1 光敏电阻	303
8.2.2 光电二极管	305
8.2.3 光电三极管	313
8.2.4 光电红外探测器	314
§ 8.3 太阳能电池	317
8.3.1 理想太阳能电池的效率	317
8.3.2 实际PN结太阳能电池	321
8.3.3 硅太阳能电池的发展方向	325
8.3.4 太阳能电池的近况与展望	327
习题	328

第九章 微波半导体器件	330
§ 9.1 变容二极管	330
9.1.1 PN结电容-电压的一般关系	330
9.1.2 变容二极管的等效电路及特性参数	331
9.1.3 变容二极管的动态特性	333
§ 9.2 阶跃恢复二极管	334
§ 9.3 PIN二极管	336
9.3.1 PIN二极管的直流特性	336
9.3.2 PIN二极管的高频特性	337
9.3.3 PIN二极管的等效电路和参数	337
§ 9.4 雪崩渡越时间二极管	339
9.4.1 碰撞雪崩渡越时间模工作原理	340
9.4.2 崩越模雪崩二极管的等效电路和电路参数	342
9.4.3 俘获等离子体雪崩触发放越模的工作原理	343
§ 9.5 隧道二极管	345
§ 9.6 体效应二极管	347
9.6.1 双谷模型和负微分迁移率	347
9.6.2 电子的积累和不稳定性	349
9.6.3 偶极畴	350
9.6.4 振荡模式	351
习题	352

第三篇 激光器件

第十章 激光器件	355
§ 10.1 概述	355
§ 10.2 辐射与物质的相互作用	356
10.2.1 自发辐射、受激辐射和受激吸收	356
10.2.2 光谱线的宽度	359
§ 10.3 光的受激辐射放大	361
10.3.1 实现光放大的条件	361
10.3.2 增益系数和增益饱和	362
§ 10.4 光的自激振荡	365
§ 10.5 光谐振腔	366
10.5.1 光谐振腔的形式	366
10.5.2 谐振条件	367
10.5.3 多纵模和单纵模振荡	368
10.5.4 横模	369
§ 10.6 气体激光器	370
10.6.1 氢氦激光器	370
10.6.2 氩离子激光器	373
10.6.3 二氧化碳分子激光器	376
10.6.4 气体激光器特性	379
§ 10.7 固体激光器	379
10.7.1 概述	379
10.7.2 固体激光器的工作物质	380
10.7.3 泵浦光源和泵浦腔	383
10.7.4 固体激光器的输出特性	384
10.7.5 激光调Q	385
10.7.6 固体激光器的性能	386
§ 10.8 半导体激光器	386
10.8.1 分布反转的条件	387
10.8.2 增益系数和阈值条件	388
10.8.3 半导体激光器的特性	390
10.8.4 异质结激光器	391
10.8.5 半导体激光器的特性参数	392
§ 10.9 自由电子激光器	392
习题	394

第一篇 真空电子器件

引 言

电子器件是各种电子设备的核心，是决定整机智能化、数字化、集成化的关键，电子器件的发展速度和技术水平决定了电子技术和电子工业发展的速度和水平。

真空电子器件通常指基于真空和气体中电子（离子）的各种效应而产生、放大、转换信号的有源器件，主要包括收信放大管、发射管、微波管、摄像管、显示管、真空光电器件、充气管、真空开关管、X光管、新型光源以及气体激光器等。

自爱迪生发现热电子发射现象和真空中自由电子导电现象以来，真空电子器件的发展已整整一百年了。50年代以来半导体器件和集成电路的崛起结束了电子管的一统天下，并且对现今各类真空器件存在着不同程度的竞争，例如普通收信放大管已被半导体器件所代替。但是因为电子在真空中运动和载流子在固体中运动不同，决定了真空电子器件在诸如工作频率、功率容量、耐压、热耗散等方面有无可比拟的长处，所以就总体而言，真空电子器件与固态器件的关系不是后者代替前者，而是相互补充，相互渗透，相互促进。

从美国、西欧、日本等主要发达国家的资料来看，除了收信放大管等少量几类管种外，真空电子器件的产量、产值、销售额均逐年增长，根据近期预测，今后一段时期内还将保持这种势头。我国情况更是如此。

本篇将对四大类管种（栅控电子管、真空光电器件、电子束器件和微波电子管）进行原理性介绍。有些管种，例如普通二、三极管已无多大实用价值，但是从这些管中所引出的一些重要概念是其它真空电子器件所常用的，因此，为了叙述的完整性，仍将提及。

第一章 热电子发射与栅控电子管

§ 1.1 热电子发射

物体内部电子的能量随着温度升高而增大。当把物体加热到足够高的温度时,其中有一部分电子的能量就足以克服表面势垒逸出体外进入真空,这样得到的电子发射叫热电子发射。这是真空电子器件中最常用的一种获得电子发射的方法。通常称热电子发射体为热阴极。

1.1.1 热阴极的基本参量与器件对它的要求

热阴极的基本参量为:

(1) 阴极工作温度 $T_k(K)$ 能够保证支取足够的电流密度,又能使阴极稳定工作的温度称为阴极的工作温度。显然工作温度越低,热阴极越有效。

(2) 发射电流密度 $J_k(A/cm^2)$ 热阴极作为真空电子器件的电子源,最主要的性能指标就是它可能提供的最大电流密度,这就是热阴极工作温度下的发射电流密度。阴极有效工作面积 S_k 决定以后,则阴极的发射电流 $I_0 = J_k S_k$ 。

(3) 阴极寿命 $\tau(h)$ 保持一定的发射能力稳定工作的期限称为阴极寿命。

(4) 阴极的发射效率 $\eta(mA/W)$ 热阴极的发射效率用 1 瓦加热功率所得到的发射电流,即 $\eta = I_0/P_f(mA/W)$ 。式中 P_f 为阴极加热功率。

真空电子器件对热阴极的共同要求为:

(1) 工作温度低,发射电流密度大 工作温度低且发射电流密度大意味着发射效率高,而这只有采用逸出功 ϕ 小的热阴极才能达到。研制低逸出功的阴极始终是阴极研究的主要方向。

(2) 在工作温度下蒸发较小 热阴极大都在 1000K 以上才能有足够的发射电流密度,在这样高的温度下真空中的阴极材料必然会有明显的蒸发。有些金属材料的逸出功很小却不能作为热阴极材料的原因正是受蒸发的限制。

通常希望阴极发射本领大(即逸出功小)且蒸发小,综合这两方面的要求,可用优劣系数 F 表示: $F = \phi/T_s \times 10^3(eV/K)$ 。式中 T_s 是材料的饱和蒸气压为 $1.3 \times 10^{-3} Pa$ 时所对应的温度(K)。

(3) 稳定性好 器件在制作和运用过程中,器壁和电极都会释放出各种气体使阴极发射能力下降(称为中毒)。阴极的稳定性就是指抗毒性。

(4) 耐轰击,溅射小 器件中的电子在电磁场作用下的运动过程中会使器件内的残余气体电离,形成正离子。在电场作用下正离子将轰击阴极,引起阴极溅射,造成阴极发射表面损坏和电极间绝缘破坏。因此要求阴极耐轰击,溅射小。

(5) 高温下机械性能好 真空电子器件要求阴极具有严格的几何形状和尺寸, 所以要求阴极材料易于加工成形, 且在高温工作时不变形。

1.1.2 纯金属阴极

金属中自由电子的能量分布符合费米统计规律, 即

$$\frac{dn}{dE} = f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/(kT)] + 1} \quad (1.1-1)$$

式中 E_F 为 费米能级, E 为电子所处的能态, k 为玻尔兹曼常数, dn 为单位体积中对应于能量 E 到 $E + dE$ 间隔中的电子数。

在金属表面存在一个势垒 W_a , 只有垂直于表面且动能大于 W_a 的电子才有可能克服势垒逸出金属, 这就是图 1-1 中阴影线内的那一部分电子。图中右边表示金属表面势垒, 左边为固体中电子分布函数。曲线 1 对应于 $T=0K$, 全部电子的能量都小于 E_F , 所以没有任何发射电子; 曲线 2 对应于温度较低的情况, 能量大于 W_a 的电子数极少, 所以实际上也观察不到热发射; 曲线 3 对应于阴极工作温度, 能量大于 W_a 的电子数较多, 有相当大的热发射电流。

热发射电流密度 J_k 与材料逸出功 ϕ_M 和工作温度 T 的关系可利用 (1.1-1) 式并经过运算求得:

$$J_k = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\phi_M}{kT}\right) \quad (1.1-2)$$

式中 A_0 为发射常数, 对于所有金属其理论值为 $120.4A \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$; ϕ_M 为逸出功, 也等于 $W_a - E_F$, 所以逸出功就是在绝对零度下使一个导电电子脱离金属所需要的最小能量。

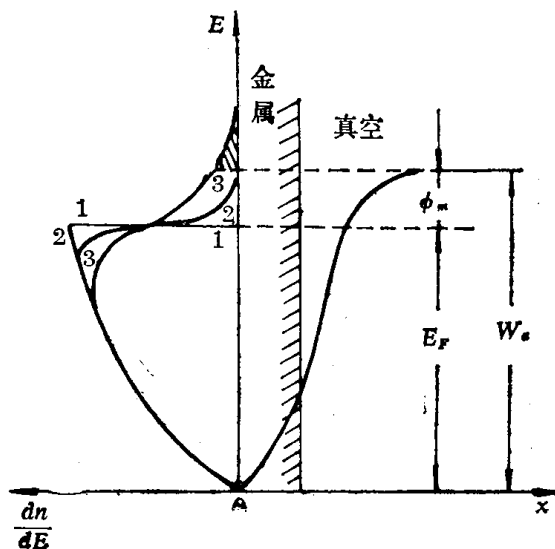


图 1-1 金属表面势垒和金属内电子密度按能量的分布

(1.1-2) 式就是著名的纯金属热电子发射公式, 也称为李查生-德施曼公式。

由 (1.1-2) 式可知, 逸出功对热发射电流影响很大, 若 $T=1000K$, 逸出功减小 $1eV$, 则 J_k 增加 10^5 倍; 同样, 若 ϕ_M 保持不变, 而 T 由 $1000K$ 增加到 $1500K$, 则 J_k 增加 10^4 倍。但 T_k 的增加会引起材料强烈的蒸发, 所以降低逸出功的意义就更大了。

表 1-1 中给出若干金属材料的 ϕ_M 、 T_s 与优劣系数 F 。

对纯金属阴极材料的要求是逸出功小, 熔点高, 蒸发率低, 高温下不变形, 化学稳定性好, 且原料丰富, 易于加工, 成本低。因为一般纯金属的 ϕ_M 约为 $4eV$, 所以工作温度必须在 $2000K$ 以上才会有实用的发射电流。综合上述要求, 在金属材料中以钨最合适。通常将它制成钨丝形式。但钨丝在高温下易再结晶, 故掺入 Al_2O_3 、 SiO_2 等予以改善, 这种钨丝的牌号为 $WA1$ 。也可用钼、钽制成带状阴极。

纯金属阴极在真空电子器件中已使用不多, 但在要经常曝露大气的电子束仪器中仍

表 1-1 几种金属的 ϕ_M 和 T_e 值

材 料 参 数	Cs	Th	W	Mo	Ti	Ta	Pt	Hf(铪)
$\phi_M(\text{eV})$	1.9	3.4	4.5	4.2	3.9	4.1	5.3	3.65
$T_e(\text{K})$	320	1910	2860	2230	1600	2680	1360	2350
$F = \frac{\phi_M}{T_e} \times 10^3$	5.9	1.8	1.6	1.9	2.4	1.5	2.8	1.65

大量使用。

1.1.3 原子薄膜阴极

纯金属阴极的发射效率很低，只有几个 mA/W ，远远不能满足器件的要求。

解决钨丝阴极在高温下再结晶的措施之一是掺入含量为 0.5—1 % 的 ThO_2 ，这种钨丝阴极经过适当热处理后，发射可以增加约 2×10^5 倍。这是由于含 ThO_2 的钨丝经过适当热处理后，在钨表面形成了钍原子薄膜，使逸出功大大降低。

研究表明，基底金属表面吸附正电性原子后，在表面形成一个偶极层(见图 1-2)，使总体的逸出功大大降低。这就是原子薄膜阴极发射效率高的原因。表 1-2 列出几种薄膜极阴的逸出功。

表 1-2 几种薄膜阴极的逸出功

薄膜阴极名称	逸出功 (eV)	基金属逸出功 (eV)	薄膜金属逸出功 (eV)
Th-W	2.7	4.5	3.4
Ce-W	2.7	4.5	2.8
La-W	2.7	4.5	3.3
Ba-W	1.6	4.5	2.5
Cs-W	1.5	4.5	1.9
Th-Mo	2.6	4.2	3.4

从表中可以看到用铯作薄膜金属具有最小的逸出功。但铯极易蒸发，故不宜作热阴极。而 Th-W 和 Ba-W 则得到了广泛的应用，至今在大多数大功率广播发射管中采用碳化钍钨阴极。

单纯的钍钨阴极中， ThO_2 被钨还原所需的温度高，钍原子与钨原子之间结合力不强，蒸发较大，尤其在工作温度下，还原补充的钍原子少，扩散困难，造成钍原子供应不足，因此发射不稳，寿命较短。经过碳化的钍钨阴极，在 1950—2000K 的工作温度下，发射电流密度可达 $2\text{—}3\text{A/cm}^2$ ，发射效

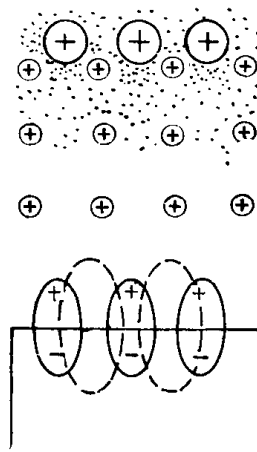


图 1-2 金属表面的正电性原子构成偶极层

率约为 50mA/W，在良好真空下寿命可达 10^4 小时。

钽钨阴极的碳化是将已经定形好的阴极在碳氢化合物（如苯、汽油等）蒸气中进行高温加热，碳氢化合物分子在与高温阴极表面接触时分解出碳。如果工艺条件控制得好，则碳与钨化合成层状 W_2C ，后者结构疏松，利于钽原子扩散到阴极表面。

Ba-W 阴极比 Th-W 阴极的发射效率高，但钡原子比钽原子活泼，不能储存于钨中。所以敷钡钨阴极多采用浸渍或压制型热阴极。

1.1.4 氧化物阴极

氧化物阴极是碱土金属（Ba, Sr, Ca）氧化物制成的发射体的简称，它的逸出功低，工作温度低，发射效率大于钽钨阴极和钨阴极，所以在真空电子器件中使用最为广泛。表 1-3 中给出这三种阴极性能的比较。

表 1-3 氧化物阴极、纯钨阴极、钽钨阴极的比较

阴极类型	工作状态	ϕ_M (eV)	T_k (K)	η (mA/W)	J_k (A/cm ²)
纯钨阴极	连续或脉冲	4.52	2400—2700	6—10	1
钽钨阴极	连续或脉冲	2.63	1950—2000	40—100	2
氧化物阴极	连续	1.0—1.2	950—1100	100—250	0.1—0.5
	脉冲	1.0—1.2	950—1100	2×10^4	10—50

一、氧化物阴极的结构和工艺

1. 氧化物阴极的结构

氧化物阴极的结构有直热式和间热式两种。直热式和纯金属阴极一样，加热电流直接流过基金属使阴极工作在高温下。如果器件要求等电位的电子发射体，则必须采用间热式阴极。间热式阴极是用钨丝外涂 Al_2O_3 绝缘层作为加热灯丝，使阴极基金属工作于高温（见图 1-3）。在许多真空电子器件中需要等位阴极，所以大多使用间热式阴极。

2. 涂层材料

氧化物涂层的原始材料是称为三元碳酸盐的（Ba, Sr, Ca） CO_3 ，而不是直接使用（Ba, Sr, Ca）O。这是因为前者在空气中稳定，而后者很易与空气中的水蒸气结合，生成发射能力很差的氢氧化合物，例如 $BaO + H_2O \rightarrow Ba(OH)_2$ 。碳酸盐加热可以分解为氧化物和 CO_2 ， CO_2 则可以在排气时被抽掉。

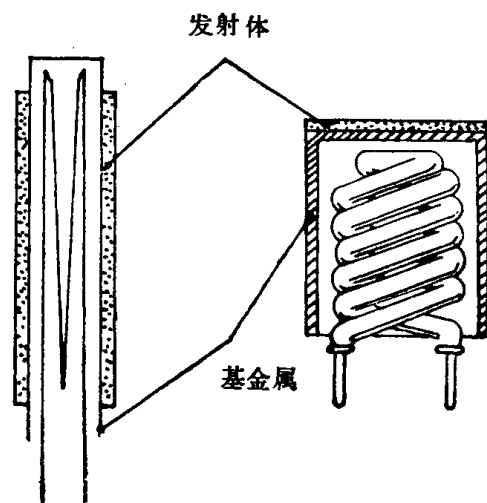


图 1-3 间热式阴极

BaO, SrO 和 CaO 的逸出功分别为 1.65eV, 2.1eV 和 2.4eV。BaO 的逸出功最小, 但蒸发率也最大。实践发现 BaO 与 SrO 的等克分子百分比固溶体的逸出功比 BaO 的还要小, 而且蒸发也比 BaO 的小。加入 CaO 是为了增强涂层与基金属间的结合能力。这三者之间最佳的克分子比为 $\text{BaCO}_3 : \text{SrCO}_3 : \text{CaCO}_3 = 50 : 40 : 10$ 。也有不使用 CaCO_3 , 而只用 BaCO_3 加 SrCO_3 (称为二元碳酸盐) 制作涂层的。

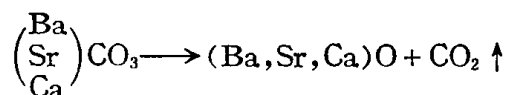
氧化物是用电泳或喷涂的办法涂敷在基金属上, 形成厚度为几十到上百微米厚的疏松多孔涂层。

3. 基金属

基金属不只是起机械支持作用, 还要能提供适量的激活剂以使涂层中 BaO 还原出自由钡。间热式阴极几乎都用镍作基金属, 但纯镍还原 BaO 产生自由钡的速率很慢, 所以必须在镍中加入激活剂, 例如 Si, Mg, Ca, Zr, Al, W 等。激活剂量要合适, 过多了会使涂层中的钡消耗过快, 过少则会使涂层中的自由钡浓度不足, 影响发射。

4. 氧化物阴极的分解和激活

在装入器件以前, 氧化物阴极涂层还不具备热电子发射能力。在装入真空电子器件以后, 在排气过程中经过下述反应, 进行分解:



分解过程从 700K 开始, 首先是 CaCO_3 分解, 然后依次是 SrCO_3 , BaCO_3 。起始以单一的氧化物晶粒的形态存在, 只有当阴极温度升到 1050K 以后才形成氧化物固溶体, 并且晶粒逐步长大, 基金属中的激活剂不断扩散出来与氧化物发生还原反应。通常分解温度最高达 1000—1100K, 阴极不再放气, 分解过程完成。

这时阴极已有一点发射, 但数值小, 且不稳定, 还必须经过激活才能获得良好而稳定的发射。

阴极激活有还原激活和电流激活两个过程。还原激活是把阴极加热到 1200—1350K, 维持 1—5 分钟。这个过程又称“闪烁”, 使基金属表面的激活剂与 BaO 反应生成自由钡, 并向阴极表面扩散。

电流激活是在阴极加热的时候, 阳极稍加电压, 支取电流。由于涂层有一定的电阻, 故当发射电流流过时, 在涂层上就有一定的电压降, 并产生电场。这个电场可使 BaO 电解, 并使 Ba^{2+} 向基金属运动, 在基金属处还原成钡原子。钡原子则借助于高温又向涂层中扩散。

电流激活的温度不超过 1150K。整个激活过程应在尽可能高的真空度下进行。自由钡的产生主要靠还原激活, 电流激活起补充作用。

二、氧化物阴极的发射机理与运用特性

1. 发射机理

对于氧化物阴极的发射机理, 曾提出过不少模型, 其中以半导体发射模型最为成功。现简介如下。

涂层可看作一个半导体。测试表明, 激活不好的涂层表现为 P 型性质, 激活良好的

涂层表现为N型性质。基质为BaO，其禁带宽度为3.8eV，构成施主的是晶格间隙里的钡原子或氧负离子缺位，处于两个施主能级 E_{D1} （1.4eV）和 E_{D2} （2.3eV）；构成受主的是钡缺位或杂质原子，处于受主能级 E_A （约为3eV）。外逸出功 χ （也称电子亲和势）与表面情况有关，但表面钡的覆盖肯定使逸出功降低。 χ 约为0.7—1.0eV。氧化物阴极的能带模型如图1-4所示。用这个模型可以说明氧化物阴极的很多性质。

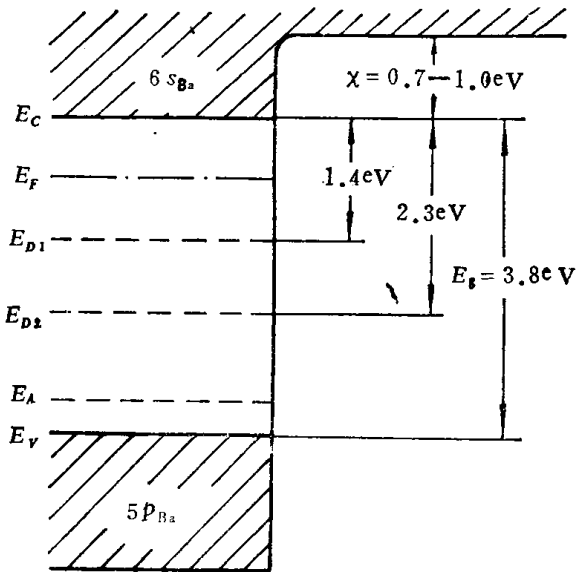


图 1-4 氧化物阴极能带模型

例如，对于激活不好的阴极，受主浓度大于施主浓度，呈P型，费米能级处于价带顶与 E_A 之间，这时内逸出功约为3/2eV。对于激活不充分的阴极，自由钡浓度虽已超过受主浓度，但还不足，虽呈N型，但费米能级处于 E_{D2} 与导带底之间，这时内逸出功约为(2.3/2)eV。仅对于良好激活的阴极，

自由钡浓度才足够大，使费米能级处于 E_{D1} 与导带底之间，这时内逸出功最小，约为(1.4/2)eV，所以热发射最大。

2. 氧化物阴极的运用特性

(1) 平均支取的电流密度 从纯金属阴极支取的最大电流受限于阴极的热发射能力。由于氧化物阴极涂层的非金属性，支取电流流经涂层电阻将产生电压降，并使涂层局部发热，所以氧化物阴极的平均支取电流密度远小于它的热发射能力。一般氧化物阴极长期稳定工作所允许的平均支取电流密度只有0.1—1A/cm²。

(2) 脉冲发射 氧化物阴极的脉冲发射电流密度很大，可达100A/cm²，其最大值受限于火花放电。当外加强场支取高电流密度时，逸出功低的局部表面支取电流比较大，发热升温也就比较大，结果使发射更大，这种恶性循环最终会使该处表面的BaO蒸发，发生火花放电，导致阴极损坏。

在脉冲持续时间，脉冲发射电流有衰减现象，脉冲越宽，衰减越大。其原因可能是：①在大电流密度轰击下，阳极出气，使阴极中毒；②涂层压降使Ba离子向基金属方向位移，形成缺乏钡原子的表面层，使发射下降；③发射电子带走能量，使涂层表面温度降低。

(3) 中毒 氧化物阴极的发射能力受环境气氛影响很大。

器件真空度下降后，主要是氧气造成阴极中毒。氧气对阴极有很强的去激活作用。氧气中毒的临界压强为 10^{-3} Pa。

在排气过程中主要是扩散泵油蒸气使阴极中毒。因为油蒸气是碳氢化合物，在炽热的阴极表面会分解成碳和氢，碳沉淀在阴极表面，使阴极表面逸出功增加。

水蒸气能使阴极严重中毒，且难以恢复，因为形成的Ba(OH)₂不易分解。

硫、氯对氧化物阴极也是十分有害的杂质。

所以真空电子器件的零件在清洗、去气以及整管排气工艺中稍有疏忽, 便会使阴极发射下降, 而使管子报废。

3. 改进型氧化物阴极

针对氧化物阴极涂层电阻率大、热传导性差的缺点已研究了不少改进措施:

(1) 采用纯镍作基金属, 在涂层中加钐等激活剂, 这样可避免形成中间电阻层;

(2) 海绵镍阴极: 在基金属上烧结一层海绵镍, 再浸入掺有激活剂的碳酸盐, 从而使涂层的导电与导热性大大提高, 牢固度也增加了;

(3) 粉敷镍阴极 (CPC 阴极): 将碳酸盐粉末外面包一层镍膜, 再烧结在基金属上。CPC 阴极的工作温度在 950—1100K 之间, 支取电流密度可达 $0.5\text{--}1\text{A}/\text{cm}^2$, 发射均匀, 耐离子轰击和耐打火等特性均优于普通氧化物阴极。

1.1.5 其它类型热阴极

氧化物阴极 (包括改进型) 不能满足超高频大功率真空器件的要求, 其主要表现为: (1) 不能满足大电流密度特别是长脉冲大电流密度的要求; (2) 氧化物阴极抗毒性差, 曝大气后不易恢复发射性能, 而许多大型器件中真空条件恶劣, 甚至处在动态系统中; (3) 氧化物阴极表面的不均匀性和非金属性使它不适宜用在要求表面精度高的情况下; (4) 氧化物阴极不耐高能电子或离子轰击。

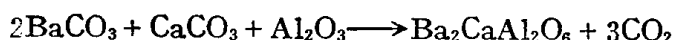
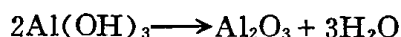
针对氧化物阴极的上述缺点, 发展了一系列新型阴极。

一、钨钨类型阴极

这类阴极的基金属是海绵状钨, 活性物质仍是钨盐 (钨酸钨或钨酸钨)。有压制式与浸渍式两种。现以浸渍式钨酸盐钨阴极的制造工艺为例进行说明。

1. 钨酸盐制备

将 BaCO_3 , CaCO_3 和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 以一定比例配好, 经研磨后在 800°C 氢炉中烧结。烧结中的主要反应为



生成的钨酸钨钙是难熔盐, 熔点高, 蒸发小, 阴极工作温度可以提高, 所以可得到大发射电流密度。

2. 海绵状钨基体的制备

钨海绵是由钨粉压制烧结而成的多孔性金属骨架, 既是良导体, 又是活性物质的储存室。要求其孔度为 20—30%, 且均匀一致。钨海绵硬而脆, 为便于加工, 必须先浸铜, 即将包有无氧铜皮的钨海绵在氢炉中加热到 1400°C , 使铜浸透钨海绵。浸过铜的钨海绵便可采用机加工方法加工成形, 然后在稀硝酸中浸泡数天, 再在真空炉中高温处理, 使浸入的铜彻底去掉。

3. 渍入钨酸盐

将钨酸盐用毛笔刷在钨基上, 再在氢炉中加热至 1700°C , 保温数分钟, 阴极就制成了。

钨酸盐阴极不用分解。激活是在 $1200\text{--}1250^\circ\text{C}$ 下进行, 这时的主要反应为