

# 电子离子器件

上册

聶 訊 編

内部教材

北京科学教育編輯室出版

1962.3

电 子 离 子 器 件

上 册

基 础 篇

北京科学教育編輯室出版

开本:  $787 \times 1092^{1/16}$  · 印张:  $8\frac{1}{2}$  · 字数: 295,200

1962年3月初版

1962年3月第1次印刷 印数: 1—1190

定价: 1.16 元

# 目 录

## 绪 论

- §1. 电子管的分类及结构..... 1
- §2. 电子管的发展简史及其在现代科学技术中的地位..... 3
- §3. 本课程的性质特点及要求..... 5

## 第一章 电子管的阴极

- §1. 电子发射的基本理论..... 4
  - (一) 电子的物理性质..... 6
  - (二) 金属中的电子发射..... 8
  - (三) 激活面的电子发射..... 11
  - (四)  $N$ 型半导体的电子发射..... 12
  - (五) 电子发射的几种形式..... 12
- §2. 热阴极的类型、构造和性能..... 13
  - (一) 热阴极的参量..... 13
  - (二) 氧化物阴极——半导体阴极..... 20
  - (三) 钍钨阴极——激活面阴极..... 24
  - (四) 钨阴极——纯金属阴极..... 25
  - (五) 热阴极的运用..... 26
  - (六) 新型阴极..... 28

## 第二章 二极管

- §1. 二极管中的空间电荷效应..... 33
  - (一) 管内电位电场的分布..... 33
  - (二) 电子运动的情形..... 35
  - (三) 电流的性质..... 36
  - (四) 阳极电压对阳极电流的控制作用..... 36
  - (五) 空间电荷限制电流与阳压的关系——二分之三方定律..... 38
- §2. 二极管的静特性曲线和静参量..... 41
  - (一) 二极管的静特性曲线..... 41
  - (二) 二极管的静参量..... 50

### §3. 二极管的应用

- (一) 二极管的整流作用.....59
- (二) 二极管的检波作用.....61

### §4. 电子管中的阳极

- (一) 阳极上产生的物理过程.....61
- (二) 阳极的形状和阳极的材料.....63

### §5. 二极管的结构、类型和定额

- (一) 二极管的结构.....64
- (二) 二极管的类型.....65
- (三) 二极管的定额.....65

## 第三章 三极管

### §1. 栅极的控制作用.....68

### §2. 等效电压

- (一) 等效电压的概念.....73
- (二) 等效电压公式的推导.....74
- (三) 三极管中的总电流.....76

### §3. 三极管中的电流分配

- (一) 电子的折射.....77
- (二) 电流分配的物理过程.....78
- (三) 电流分配系数  $k$ .....80

### 三极管的特性曲线

- (一)  $I_a-U_g$  曲线和  $I_g-U_g$  曲线.....81
- (二)  $I_a-U_a$  曲线和  $I_g-U_a$  曲线.....85
- (三) 特性曲线的转换.....86
- (四) 不良真空对特性曲线的影响.....86
- (五) 三极管在负栅运用时的栅极电流.....88

### §5. 三极管的静参量

- (一) 参量的定义、意义及其求法.....90
- (二) 参量间的关系——内部方程.....98
- (三) 参量与电极电压的关系.....93

### §6. 三极管的极间电容.....95

### §7. 接收放大三极管的类型和结构

- (一) 电压放大三极管.....96
- (二) 功率放大三极管.....96

## 第四章 多极管

### §1. 帘栅四极管

|                    |     |
|--------------------|-----|
| (一)三极管的基本缺点        | 98  |
| (二)帘栅的作用           | 99  |
| (三)四极管的静特性曲线       | 101 |
| § 2. 五极管           |     |
| (一)抑制栅的作用          | 103 |
| (二)五极管的电流分配        | 105 |
| (三)五极管的静特性曲线       | 106 |
| (四)五极管的静参量         | 111 |
| (五)五极管接成三极管        | 114 |
| (六)变跨导管            | 115 |
| (七)五极管的类型与结构       | 117 |
| § 3. 电子注功率管        |     |
| (一)低频五极管的缺点        | 119 |
| (二)电子注功率管抑制二次电子的原理 | 119 |
| (三)结构特点            | 120 |
| (四)特性曲线            | 121 |
| § 4. 多栅变(混)频管      |     |
| (一)五极管中阳极电流的双重控制   | 123 |
| (二)变频的基本原理         | 125 |
| (三)多栅混频管           | 126 |
| (四)多栅变频管           | 127 |
| § 5. 高跨导管          |     |
| (一)具有密栅的四、五极管      | 132 |
| (二)阴栅电极管           | 132 |
| (三)二次发射管           | 134 |
| § 6. 复合管及电子调谐指示管   |     |
| (一)复合管             | 136 |
| (二)电子调谐指示管——电眼     | 137 |
| § 7. 电子管的噪声        |     |
| (一)电阻上的噪声          | 139 |
| (二)电子管内的噪声         | 140 |
| (三)噪声的表示方法         | 142 |
| (四)电子管内噪声的计算       | 144 |
| (五)减少噪声的途径         | 144 |
| § 8. 电子管的发展方向      | 145 |

# 緒 論

## §1 电子管的分类及結構

### (一) 什么是电子管

电真空器件是指一切利用在真空中或气体中发生的电现象而做成的器件的统称。它分为两大类。第一类是不放电的真空器件，其中电流通过金属或合金等导体，如白炽灯、热电偶、稳流管等，这不是我们研究的对象。第二类是放电的真空器件，简称电子管，它们工作的基础在于利用真空中或气体中自由电荷的运动。具体说，电子管是一个玻璃或金属的管子，里面放入一些金属电极并抽成高度真空而构成的器件。在各电极上加电压来控制管内带电质点的运动，便可以使电子管做各种不同的工作。

一般电子管是抽到高度真空的（管内气体压强减小到  $10^{-5} \sim 10^{-7}$  毫米水银柱高以下），由于管内气体非常稀薄，气体分子很少有机会和运动的电子发生撞击，因此电子无阻碍的在电极间运动，和在理想的真空中一样。这样的管子叫真空管。有些管子在抽成高度真空后再充入少量惰性气体或水银（工作时蒸发成汞汽），但管内还是保持較低的真空（ $10^{-4}$  到几个毫米水银柱高）。工作时，气体分子受运动的电子撞击而大量电离。結果在管内有电子运动，也有正离子运动，这样的电子管叫做充气管或离子管，有时也称气体放电管。

### (二) 电子管的分类

由于电子管应用的广泛，世界各国所生产的电子管品种非常繁多。它们的原理、性能和用途可以通过适当的分类来掌握。电子管可以按照许多不同的方法分类，如按电极数目、阴极构造、冷却方法、外部形状等等。最常用的分类方法是按能量转换的性质和用途来分。

数量最多的一大类是转换电能的电子管。用来把电能从一种形式转变为另一种形式的所有真空管与充气管都属于这一类，其中包括将交流转变为直流（整流）、将直流转变为交流（其中没有外加信号时叫振盪；有外加信号时叫放大）、改变频率（变频）等等的电子管。它们广泛用在各种通信设备的电路中及其它使用电子管的设备中。

另一类是由光能变电能的电子管，包括各种光电管、电子析象管、光电转换器等。主要用于自动控制、有声电影、传真电报、电视等设备中。

最后一类是由电能变光能的电子管，包括各种示波管、电子显象管、指示管等。主要用于雷达、电视和测量技术。

### (三) 电子管的结构

由于电子管的种类很多，它们的外形和内部构造差别极大。为了说明电子管在构造上和其它器件相比所独有的特点，现在把应用最广泛的小型真空管为例加以研究，我国北京电子管厂就大量生产这类管子。它的管壳是玻璃的，下端做成平底，针状的管脚在管底上排成一圈。管脚在管内同各个电极相接。使用时将管子插在无线电设备中的管座上，各个电极就通过管脚与管外的线路接通。为了保证不漏气，穿过玻璃的一段金属线的膨胀系数必须与玻璃接近，因此通常用铁镍合金一整段或者用杜美线（外壳是铜的，铁镍合金线）和镍管脚两段作成。管内的空气是在制造过程中通过管顶的排气管抽出的。在管壳的玻璃中或电极的金属中总会存留一些气体，应当在抽真空时尽量除去。为了使玻璃“去气”，在抽气过程中要将管子放在特制的烘箱中加热到  $400-500^{\circ}\text{C}$  的温度。为了使电极去气，还要把正在抽真空的管子放在高频交变磁场中，磁场在电极中感应出很强的电流，使电极发热直到红热。抽气完畢以后，立刻将排气管用火头熔封，因此在管顶上留下一个小尖头。为了得到更高的真空并且长期保持，在装配电极时，同时在管内也装上一片吸气剂。在电子管封闭后加热吸气剂使它蒸发而附在管壁上，同时与管内残余气体发生化学作用。吸气剂通常用各种钡化物吸气剂（使管泡内壁变黑），旧式的也用金属镁（在管泡内壁形成银白色薄膜）。

在管壳内金属电极系统中，最中心的白色细管是阴极，里面还装有用来加热阴极的热丝（也叫灯丝）。最外面的金属筒是阳极。在中间是几个绕成螺旋状栏栅的栅极。（使用时热丝通过电流而发热，使阴极热到发红而发射电子。阳极上加有高的正电压，能吸引电子。电子从阴极飞向阳极必须穿过栅极的缝隙，因此栅极上的电位可以控制到达阳极的电子数目。）在装到管壳里面以前，要将做好的阳极和栅极放在特制的氢气炉中加热到  $900-1000^{\circ}\text{C}$  以除去表面的油污和其它杂质。为了保持电极系统的牢固性和使它们在管内固定不动，还采用了一些辅助零件如钎成特殊形状的云母片、金属的小夹带、小筒以及支柱等。

另外有许多常用的电子管采用软的引出线，它们需要在下端装上一个胶木的管底，引出线就接到管底上的各个管脚。也有的管子的栅极单独由管顶引出，使用时要安上“栅帽”。还有的管子用特殊的铁皮作外壳，电极装在平底上。金属电子管在构造上更加坚固，并且有良好的电屏蔽。但是在制造时不能用高频加热法来使内部电极去气。

## §2 电子管的发展简史及其在现代科学技术中的地位

电子管的发展与它在通信方面的应用是分不开的。为了叙述的方便，通常总是和应用在一起。一般分成以下四个时期来叙述。

(一) 1904 年以前——远在 1873 年俄国科学家洛得金就发明了照明用的电灯泡，这是第一个电真空器件。1883 年美国爱迪生发现如果在电灯泡里封入一个电极，若是将它与灯丝正端相接则线路内就有电流流过，反之就没有。这种在一定条件下可以有电流通过真空的现象，当时还无法解释，就把它叫成爱迪生效应。现在我们知道这是因为电子从烧热的灯丝逸出后飞向有正电位的电极，将灯丝经过电流计到另一个电极的电路接通了。这就是最简单的二极管的工作原理。1888 年俄国科学家斯托列托夫利用电弧所发的光照射到锌板上，发现了

光电效应，并且确定被光照射出的是带负电荷的粒子。1897年英国科学家汤姆逊通过一些利用电子束的管子的实验，确定有电子存在并求出了电子电量与质量的比。在这一段时期中所发现的电的现象都没有用到技术上。由于科学家们从实践中逐渐认识了物质的结构，并且在理论的研究方面，取得了很大的进展，于是便给了电真空器件的发明奠定了基础。

(二) 1904年~1920年——1904年制出了第一个真空二极管，由于二极管具有单向导电的性能，因此可以在接收机中进行检波。虽然当时的二极管在技术上还不够完善，它的应用还不够广泛，但这却是电子管制造的起点。电子管的发明是无綫电技术发展中的一个划时代的变革。1906年第一个三极管制造出来了，就是在二极管阴极和阳极之间再放入一个栅栏状的电极（栅极）而作成的。由于三极管可以放大，因此电子管就很快地应用到无綫电通讯中，从而大大提高了接收机的灵敏度。三极管的振荡作用（1913）使得无綫电发射机摆脱了火花发射的原始状态，由于三极管的出现，使得无綫电技术取得了很大的跃进，它使得无綫电技术趋于电子管化，同时两者的进一步结合就形成所谓的无綫电电子学。

由于电子管的出现，特别是三极管，使无綫电技术在很短的几年内有了很大的发展，同时无綫电技术的发展，反过来又要求有更完善的电子管，而这些要求就迫使电真空方面科学研究和工程技术人員加紧研究并创造出新型的，质量更好的电子管。

(三) 1920~1940年——1920年以后广播事业蓬勃发展。在使用的频率范围方面，也从长波过渡到中波和短波（就是向着更高的频率方面发展），这就需要有比三极管更完善的电子管，因为三极管有很大的极间电容，在高频时不能得到很好的放大作用。

在1924年做成了具有两个栅极的四极管。不久以后（1930~1931年）又做出了五极管（有三个栅极）来代替它，这样就解决了极间电容的问题，克服了三极管使用在高频时显示出的缺点。

由于无綫电接收设备中超外差式电路的发明，促使新型多栅变频管的出现（1934年~1935年）；很多各式各样的复合管出现以后，使得无綫电接收机中的电子管数目大大减少了。

以后随着电视与调频无綫电的出现，使得光电管、电子束管、某些超高频电子管以及充气管得到了很大的发展。到这时为止，电子管已发展到比较完善的地步。

以上的二、三极管和电极更多的电子管，通常称为普通的电子管，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是具有静电场的特征。

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，提高工作可靠性，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。

(四) 1940年以后——在1940年以后，电子管和无綫电技术的相互关系表现得特别明显。这时，无綫电技术解决了精通和利用超短波的问题（包括米波、分米波和厘米波波段）。在这样高的频率下，普通的电子管由于受管中极间电容，引线电感，高频损耗以及电子在极间运动的渡越时间等限制，完全失去了作用。为了克服普通结构的电子管，不能用于超高频的缺点，人们不断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段和毫米波段获得广泛应用。它们是近代无綫电定



位、微波多路通訊等方面的主要元件。

現在科學家還在進行巨大的工作來開拓波長更短的亞毫米波領域，並已取得了顯著的成就。

近十幾年來，半導體器件得到了蓬勃的發展，當1948年第一個半導體三極管（晶體管）出現後，由於它能起某些電子管的作用，就迅速的吸引了各方面的注意。半導體器件的優點是：消耗功率少，壽命長，體積小，重量輕，結構堅實，耐震等。但是晶體管在使用上也受到某些限制，如輸出功率小，工作頻率不高，噪聲大，工作溫度不高，受輻射影響大等。在低頻低功率的情況下，用晶體管來代替電子管是完全可以的，但是晶體管並不能全部代替電子管，實際上，兩者不是互相排擠，而是互相補充，互相促進，各有其發展前途。

本課程的範圍僅限於討論靜電控制的電子管，因此對其它類型的電子器件的發展簡史不一敘述了。

至於電子管的應用，是很難詳盡地描述，現在電子管的應用，並不只限於通訊，它已廣泛地滲透到國民經濟、國防建設和科學技術的各個領域中去。

無線電電子學的發展，有力的幫助人類更深刻地、更正確地認識物質世界的規律，並利用這些規律來為人類服務。無線電電子學，是人們向自然作鬥爭和進行階級鬥爭的强有力的武器。

近十幾年來，無線電電子學的應用，已經遠遠超出早期的無線電通訊與廣播等範圍，而為科學技術的很多領域开辟了廣闊的道路，並且大大加速這些部門的發展。例如：無線電定位、導航、電視、遙控、天文、氣象、測量技術、計算技術、火箭技術等等。

無線電電子學，在國民經濟各部門中的技術革新和技術革命中起着重要的促進作用，它為生產過程的全盤自動化開創了宏偉的前景。無線電電子學的運用，已深入到國民經濟的各個部門，如工業生產、交通運輸、醫藥衛生、文化教育、科學研究等事業的各个方面，加速了我國社會主義建設。

無線電電子學的應用，不僅可以減輕人們繁重的體力勞動，而且可以部分地使人們從繁瑣的腦力勞動中解放出來。在這方面，其意義的深遠，目前尚難估計。原子能利用方面所取得的輝煌成就，也和無線電電子學有着非常緊密的聯繫。

人造衛星、宇宙火箭、載人飛船的勝利返航，首先在蘇聯相繼發射成功，這是社會主義制度的偉大勝利，也是無線電電子學光輝成就的標誌，因為如果沒有各式各樣的無線電電子學儀器設備，要想實現宇宙航行，並在地球上進一步探索天體的祕密是不可能的。無線電電子學儀器設備的無可比擬的優越性，在於它具有極迅速的作用速度和異乎尋常的精確的靈敏度，這是任何其它方法所不能比及的。

無線電電子學之所以能取得如此巨大的成就，其主要原因之一是由於應用了多種多樣品質優良的電真空器件的結果。如無線電設備中的放大和振盪等。其重要地功能正是借助電真空器件才得以實現的。電真空器件是無線電設備中最重要元件。電真空器件的品質直接決定了無線電設備的最重要的技術性能，電真空器件的應用和發展，對於無線電電子學的應用和發展具有決定性的意義，而且是互相促進的，它已成為現代科學技術中不可缺少的器件。因此人們常說它在建設中起着重要的作用。由於無線電電子學的設備中應用了各式各樣的電真空器件，所以深入研究電子器件的基本工作原理，了解它們的特性、參量 and 應用情況，將

是进一步掌握无线电电子学知识的一个重要基础。

电真空器件虽然如此重要，但在过去半封建半殖民地的旧中国，反动统治阶级是不重视本国工业的发展的，因此那时虽然有一两家电子管制造工厂，但主要是属于装配性质的。一切原料及半成品都得从外国进口。例如我们国家产钨很多，但在过去自己却不能锻造，还得将原料低价出口再买回高价的钨丝。

自1949年中国人民革命胜利后，在伟大的中国共产党的领导下，由于党和政府的关怀，我国电真空工业是从无到有的飞跃的发展起来了。首先在南京一个电照厂设立了电子管组，并且迅速发展成了现在的南京电子管厂。目前该厂除了能生产成批的接收放大、整流及振荡管等类型外并且已制成功了磁控管、速调管等用于超高频方面的新型电子管。1956年10月15日，由苏联帮助建设的、具有最新技术装备的北京电子管厂也正式投入生产。从此我国的电子管工业就进入了一个新的阶段。1958年大跃进以来，不但原有的厂规模扩大、产品增多，并且又陆续兴建一批大小不等的电子管厂。由于我们采取了两条腿走路的方针，土洋并举，因此在许多非无线电厂中克服了技术上和材料上的困难，用土办法生产出大批合乎要求的电子管。目前电真空器件的原材料，绝大部分都能自制，现在国产电子管的品种和数量已经基本上可以满足不断扩大的经济建设和国防建设的要求。由于电子管工业和其它无线电工业的发展，每年都要生产大量的通信设备和其它电子学设备，除供应国民经济各部门和国防事业外，还可以出口一部分。现在一方面通信和广播的设备已经普及到全国每一个角落，无线电已成了人民群众生活所不可缺少的东西；另一方面许多最先进的无线电电子学成就正在被我们掌握。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，可以预料在无线电电子学方面达到十二年科学规划要求，一定会提前实现。

### §3 本课程的性质，特点及要求

电子管是一门技术基础课。通过它为今后学习有关无线电各门课程打下一个基础。因为任何一个无线电机，总可以分为电子管元件和线路两大部分。没有优良的电子管而企图做出良好的无线电机是不可能的，同样只有优良的电子管而没有优良的线路也不行。因此只有深入透彻地了解和掌握电子管的原理和特性后，才能更好地应用到电路中去，才能为专业课程的学习打好基础。

本课程的教学目的是：使同学掌握各种电子管的工作原理、特性曲线、简单的结构、用途和参量范围。至于电子管的制造、设计等方面的讨论则非本课程的任务。

由于电子管种类繁多，因此不可能，也不必要在本课程中详细研究它们中的每一个型号。有一些电子管因为应用范围很窄我们也不讲。还有一些电子管它的工作原理与普通电子管完全不同如超高频管（速调管、磁控管、行波管）这些管子将在微波技术中和其他专业课程中讲授。此外半导体管在近年来有很快的发展。它将放在“半导体器件和线路”课程中来讲。

本课程的特点是：叙述多、概念多、特性曲线多。这些特性曲线都是分析问题的工具，因此必须对它给予足够的重视，同时还要熟练地掌握这些曲线。

# 第一章 电子管的阴极

本章内容包括两大部分：(1)电子发射，也就是如何获得自由电子。(2)各种常用阴极的特性、参量及运用。

## §1 电子发射的基本理论

### (一) 电子的物理性质

根据近代物理学的理论，电子是具有微粒和波动双重性的，带有最少的负电荷的基本粒子。

电子所带的电量是： $e = 1.602 \times 10^{-19}$  库仑

电子的静质量是： $m_0 = 9.106 \times 10^{-31}$  千克

当电子以速度  $v$  运动时它的质量是：
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$$

式中  $c$  是光速。在一般电子管中，电极上电压不超过 1 万伏时， $v \ll c$ ，电子质量的变化是难于觉察到的，因此  $m \approx m_0$ 。但在电压很高时，电子速度接近于光速的时候，就必须考虑到电子质量的改变。

电子的波动性表现在运动的电子可以认为是具有一定波长  $\lambda = \frac{h}{mv}$  的波，式中  $h$  是普朗克恒量。通常  $\lambda$  约为 1 埃（即  $10^{-8}$  厘米）和伦琴射线的波长相近。

由于一般电子管内部的尺寸远大于电子波的波长，所以在管内空间电子的运动，完全可用经典力学把电子当做质点来研究。但在研究电子在金属内部运动的情形时，由于电子波的波长和金属内原子间的距离为同一数量级，就必须用波动力学将电子当做波动来处理。深入地探讨波动力学的方法在本课程中是不可能的，同时也不必要。因此在下面只引用一些结论。

下面讨论一下电子在静电场中运动的情况。

设有  $A$   $B$  两点，它们的电位分别为  $u_A$  及  $u_B$ ，并令  $u_A < u_B$ 。在这两点间有一电子由  $A$  运动到  $B$ 。设在  $A$  点的速度为  $v_A$ ，因受电场  $E$  的加速，动能增大，故到达  $B$  点时速度增加到  $v_B$ 。这动能的增加是由于电场力所做功的结果；因此得下式：

$$\frac{1}{2} m v_B^2 - \frac{1}{2} m v_A^2 = e(u_B - u_A)$$

現在看一特殊情况，即  $v_A = 0$ ， $v_B = v$ ， $u_B - u_A = u$ ，則上式变为

$$\frac{1}{2} m v^2 = eu$$

$$v = \sqrt{\frac{2eu}{m}} \quad (1.1)$$

$$= 5.91 \times 10^5 \sqrt{u} \text{ 米/秒}$$

$$= 600 \sqrt{u} \text{ 千米/秒}$$

在一般小型电子管中，阳极与阴极間的电位差约为 100 伏到 200 伏，因此电子飞向阳极的速度为 6000—8400 千米/秒。在大型管中，当阳极电压为一万伏时，电子到达阳极时速度则为  $8 \times 10^7$  米/秒即 8 万千米/秒。此速度约为光速的  $\frac{1}{5}$ 。計算此时的质量  $m = 1.02m_0$ ，如此証明以前假定在一般情况下，电子质量近似地不变是正确的。

电子以这样高的速度飞越在电子管中各极間距离时，所需要的时间是极短的，只有十亿分之一秒左右（即  $10^{-9}$  秒）。

根据公式 (1.1) 可以得出两点結論：

### 1. 电子的运动几乎是無慣性的

电子受电场力的作用后，可以由静止，很快地达到非常大的速度，这是因为电子的荷质比非常大的緣故，所以我們可以初步的认为电子在电场控制下的运动是无慣性的，也就是說电子在电场作用下，瞬間間就可以从阴极到达阳极。举例如下：

例：一电子管阳极和阴极間距离为三毫米，当阳极电压为 100 伏时的速度多大？电子从阴极到阳极所需要的时间是多少？

解：  $v = 600 \sqrt{u} = 6000 \text{ 千米/秒}$

$$\text{所需时间 } T = \frac{S}{v} = \frac{3 \times 10^{-3}}{\frac{1}{2} \times 6 \times 10^6} = 10^{-9} \text{ 秒}$$

这說明了，当电子管的栅极电压做非常迅速的改变时，甚至是以无线电中常用的高频来改变时，这时由阴极到阳极的电子流还可以随着电压频率改变。但是当电子从阴极飞到栅极或阳极所需的时间与电压变化的周期相比而不能忽略时，这种电子管内的电子无慣性就不能保持了。实验証明，当信号电压的频率达到  $10^8$  赫兹或更高时（超高频范围内）电子的渡越时间就显得相当大了。这样由于电子的慣性的緣故，使普通构造的电子管不能用在这种超高频范围内。

### 2. 电子的速度决定于 $\sqrt{u}$

电子在电场中运动的速度完全决定于电子所经历的电位差。当我们考虑到电子的初速为零，并从零电位出发时，电子在电场中任一点的速度即决定于该点的电位。从上面公式中知电子的动能和速度的改变都是电场引起的，因此经常要用电位差来計算速度与动能。如果集

用电子伏特做能量单位要方便得多。一电子伏特就是一个电子经过一伏特电位差所引起的动能改变量。它与焦尔的关系由定义可知：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 电子伏特} &= e \text{ 库仑} \times 1 \text{ 伏特} \\ &= 1.6 \times 10^{-19} \text{ 焦尔} \end{aligned}$$

这样用电子伏特做能量单位时，电子动能的改变在数值上便与所经过的电位差数值一致了。采用这单位可以很快的判断电子的运动。如电子在电场中某一点的动能为5电子伏特，如果电场中有一点比该点的电位低6伏，则电子就不可能到达这一点。

有时电子的速度也可以用对应的电位差来表示，如100伏的速度，即表示与100电子伏特的动能所相当的速度亦即电子经过100伏电位差所具有的最终的速度。

## (二) 金属中的电子发射

### 1. 金属中自由电子的能量

金属都具有晶体结构，就是原子或离子按一定格式整齐排列起来的结构，每个原子的内层电子，由于原子核吸引力的束缚，只能在原子核的附近围绕原子核旋转至于最外层的价电子，因同时要受到相邻原子核的强烈影响，使得它们不再分属于各自的原子，而是全部价电子被共有化了，它们脱离了原来的原子核的约束，而在整个金属中自由的做不规则的运动，它们沿着各种方向在原子间（实际上是离子）运动，不断地改变着自己的速度和动能，如图1-1所示，这些电子称为自由电子。金属导电的性能就是由于有这些电子存在。

金属中自由电子是具有一定能量的，由于金属中自由电子的密度非常大（每立方厘米体积内大约有 $10^{23}$ 个），同时按照包利不相容原理，没有两个电子的能量是全同的，因此要详尽地，微观地去说明每一个电子在不同时间所具有的动能是完全不可能的。

正如同在人口统计中，要按每一个人的确实的数学年龄（从年、月、日到时、分、秒等）来统计是不可能而且不必要的。通常是列举在一个年龄范围内有多少人口，比如从20岁起不满21岁有多少人，从21岁起不满22岁有多少人等等。所举的年龄范围愈窄，这统计的真实性就愈大。

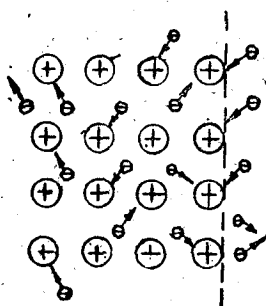


图1-1 金属中的电子

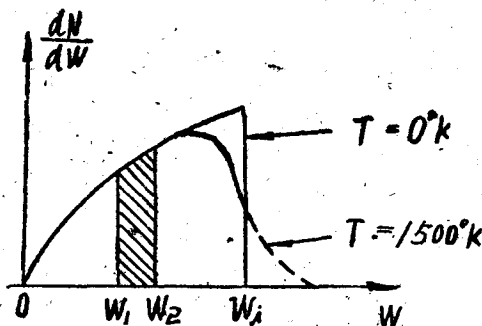


图1-2 金属中自由电子运动的分布

所以同样地在一大群自由电子中，虽然无法详尽地说明每一个电子在不同时间所具有的

动能，但从统计的观点或统计的观点来看，动能介于  $W$  和  $W + \Delta W$  之间的电子数目  $\Delta N$  却是可以举出的。比值  $\frac{\Delta N}{\Delta W}$  叫做单位能量范围内的电子数目，它的极限值当  $\Delta W \rightarrow 0$  就变成

$\frac{dN}{dW}$ 。通常用  $\frac{dN}{dW}$  作纵坐标， $W$  作横坐标，画出自由电子的动能分布。它们间的函数关系就是统计的分布函数。

按照量子统计方法求出的金属中自由电子的动能是适合于费密——狄拉克的统计公式

$$dN_W = \frac{8\pi\sqrt{2}m^{\frac{3}{2}}}{h^3} \cdot \frac{\sqrt{W}}{1 + e^{\frac{W - W_i}{KT}}} dW$$

其中  $W$  是自由电子的动能 ( $= \frac{1}{2}mv^2$ )

$T$  是绝对温度

$m$  是电子的质量

$h$  是普兰克常数，等于  $6.624 \times 10^{-24}$  焦耳·秒

$K$  是波尔兹曼常数，等于  $1.38 \times 10^{-23}$  焦耳/度

$dN_W$  是每单位体积内，动能在  $W$  和  $W + dW$  之间的电子数目

$W_i$  表示在绝对零度时，电子的最大动能，它等于：

$$W_i = \frac{h^2}{8m} \left( \frac{3N}{\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \text{焦耳}$$

其中  $N$  是单位体积中的金属内的自由电子总数。

对于  $T = 0^\circ K$  及  $T = 1500^\circ K$  两种情况的能量分布函数曲线，如图 1-2 所示。图中横坐标代表自由电子的动能，而纵坐标  $\frac{dN}{dW}$  代表沿能量分布的电子密度。图中实线表示在  $0^\circ K$  时的电子动能的分布。从图中可看出，即使  $T = 0^\circ K$ ，电子还具有一定的动能，这时电子可能具有的最大动能是  $W_i$  ( $W_i$  叫做费米能级，或称费米界)  $W_i$  的数值随金属种类而不同。在曲线下面，介于  $W_i$  和  $W_2$  之间的面积  $N' = \int_{W_i}^{W_2} \left( \frac{dN}{dW} \right) dW$  代表动能介于  $W_i$  和  $W_2$  之间的自由电子的数目。显然曲线所包的面积也就代表单位体积金属中全部自由电子的数目。

当  $T = 1500^\circ K$  时，如图中虚线所示，从曲线的变化上，可以看出，动能较低的自由电子分布几乎没有改变，动能较大，而小于  $W_i$  的电子数目减少，另外出现了一些动能超过  $W_i$  的电子，有的电子的动能接近于无限大。但是动能愈大，电子数目愈少。从理论和实验都可以证明，温度愈高，动能超过  $W_i$  的电子数目也愈多。在室温情况下，电子动能分布曲线与  $0^\circ K$  时的曲线几乎一样。

对于图 1-2 应注意下面两点：

- (1) 金属中自由电子所佔的能级是不连续的，但是由于级数繁多，间隔很近，图中难以表示出来，因此好似连续分布一样。
- (2) 图中能量  $W$  零点是以自由电子所具有的最低能量，做为起始能量级。

## 2. 电位壁垒和逸出功

由上面已經知道金属中的自由电子，即使在绝对温度为零的情况下，也具有一定的动能，但是由实验知道，在低温时是没有电子发射的，也就是没有电子从金属中跑出来。那么，为什么它们不能脱离金属表面而发射出来呢？

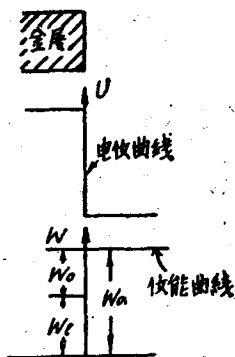


图1-3 位壁壘的組成

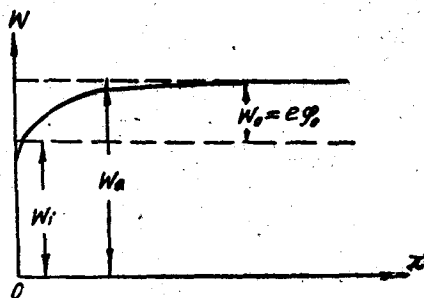


图1-4 金属内外电位和位能的大致分布

在金属内部的自由电子，已具有一定的动能。这些自由电子，在金属内部受的力却是平衡的，因此可以说，这些电子在金属内部不受力。这是由于在金属内部，原子晶体格子中的正离子对电子的引力是各向对称的，总的合力趋于抵消的缘故。但当电子飞到金属表面时，情况就不同了。由于金属表面晶格中的正离子，外面不再其他的正离子，故电子所受到的合力就不再抵消为零了。总的合力方向是指向金属内部，正是这个力阻止电子向金属外面运动。这就是说，欲使电子离开金属表面，首先要克服这一阻碍它的电场力。

由于自由电子杂乱无章的运动，使得任何时刻总有一部分电子跑到最靠近表面的一层正离子的外面，而又不断地被上面所说的合力拉回到金属内部。从宏观看来，任何时刻金属表面都有一层电子，它们和金属表面的一层正离子组成了一个偶电层，负电朝外，正电朝内，厚度约为一埃。移向金属的表面的自由电子，一方面受正离子的引力，另一方面还受着这层宏观看来好象静止的偶电层的阻力。理论与实验证明，电子通过偶电层所做的功，就等于  $W_0$ 。它也代表电子逸出金属表面时，克服其它电子的阻力所做的功。由于偶电层非常薄，在图1-3中这一段位能的变化无法表示，就变成一根垂直线了。

那么凡是能克服偶电层阻力的电子，是否都能从金属表面逸出呢？

当电子越过偶电层，离开金属表面以后，金属表面便因静电感应对电子产生一吸引力，要把电子拉回来。电子就必须克服这个吸引力，才能完全脱离金属。用来克服这个吸引力的能量，称为逸出功。正负电荷间产生的吸引力  $F$  可以由静电学中的镜像法求出，而电子为了逸出表面到达  $x$  处所需要克服这个吸引力所做的功是  $\int_0^x F dx$ 。

注意，在  $x > r_0$  ( $r_0$  约10倍于原子间距离) 时， $F$  才能按库仑定律来计算。在  $x < r_0$  的这一段，电子所受的力应按波动力学计算。

因此电子从金属内部到距离金属表面处所需要做的功是：

$$W = W_0 + \int_0^x F dx$$

理論上，要在  $x = \infty$  时电子才算完全脱离金属。这时电子所要作的总功是：

$$W_{\infty} = W_i + \int_0^{\infty} F dx = W_i + W_0$$

但实际上，只要  $x > 10^{-4}$  厘米，电子所受的吸力已经极小，就可以当做电子是脱离金属了。

由上面讨论可知，在室温时，要使自由电子逸出金属，必须具有足够的能量。换句话说，即自由电子在金属内部的位能低于电子在金属外部的位能。而电子从低位能点到高位能点它本身必须做功。这种位能的差别相当于一个壁垒，阻碍电子从金属内部逸出，因此叫做位能壁垒或简称位壁垒。这个壁垒也可以用相应的电位差来表示，因电子从高电位点到低电位点，它本身必须做功，故可以解释为金属内部电位高过金属外面的电位。如图 1-4 所示。

电子为了克服位壁垒的障碍，从金属中逸出时所必须作的功是  $W_{\infty}$ ，而在绝对零度时金属内部电子可能具有的最大动能是  $W_i$ 。由上已知  $W_{\infty} > W_i$ ，所以在绝对零度时不会有电子发射出来。为了使电子有可能发射出来，至少必须增加  $W_{\infty} - W_i = W_0 = e\varphi_0$  的能量， $W_0$  叫做逸出功。换句话说，逸出功  $W_0$  是在绝对零度时为了克服位壁垒的阻力必须给金属内部电子添加的最小能量。

通常逸出功用电子伏特作单位，并且用  $\varphi_0$  来表示。 $\varphi_0 = \frac{W_0}{e}$ ，在数值上和用伏特作单位的一样。用实验方法求出的一些纯金属的  $\varphi_0$  值见表 1-1。表 1-1 上的数值都是指完全纯金属而言。如果金属微有不洁净或去气不良，逸出功就可能有显著的变化。在电子管的制造工艺中，这点非常重要。

表 1-1

| 金 属                | 铯    | 钡    | 钙    | 锶    | 钍    | 钼    | 镍    | 石墨   | 钨    | 汞    | 钨    | 铁    |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\varphi_0$ (电子伏特) | 1.81 | 2.11 | 2.24 | 2.60 | 3.35 | 4.07 | 4.30 | 4.40 | 4.41 | 4.52 | 4.52 | 4.77 |

### (三) 激活面的电子发射

如果在金属表面复盖一单原子层带正电性的金属（即金属的逸出功较底金属为小者）那么金属的逸出功就大大减低，即电子容易从金属中逃逸出来。逸出功降低的原因是由于表面的金属把它的一部分价电子给了底金属（也可以说表面上钍原子的两个价电子受了钨原子的吸引偏向内部），以正离子状态吸附在底金属的表面上。在底金属的表面上形成了偶电层（厚度约为  $3 \times 10^{-8}$  厘米），因而在偶电层中产生了很强的电场（象电容器中的电场，不影响外面）。当电子由金属内部向外发射时，在通过偶电层的过程中，受到这电场的加速，因而更容易跑出来，因此发射能力大大增加。

钍钨丝的运用温度实际上已经接近钍的熔点，但钍原子还不致于蒸发，就是由于钨与钍之间的结合力的缘故。因而只有表面是单原子层时才行。如果有两层钍原子时，那么外层的钍原子因为缺乏钨的结合力必将蒸发出去。

如果在金属表面吸附一层负电性的元素，那么所形成的偶电层的极性和上面所谈到的相



反，也就是說逸出功將有所增加。

激活面的逸出功比表面復蓋的單原子物質的逸出功還要小。例如鎢的逸出功是4.52，鈦是3.35而敷鈦的鎢則只有2.36電子伏特，即較純鈦的逸出功還小。

#### (四) N型半導體的電子發射

半導體能級的结构是在滿帶與導帶之間隔著很窄的禁帶。半導體的導電是由于在純鎢或硅中加入了金屬雜質，由于金屬雜質的價電子的存在，改變了原來的能帶的分布。在導帶下面產生了新的雜質能級。對N型半導體講這種能級是靠近導帶的底部的，如圖1-5。

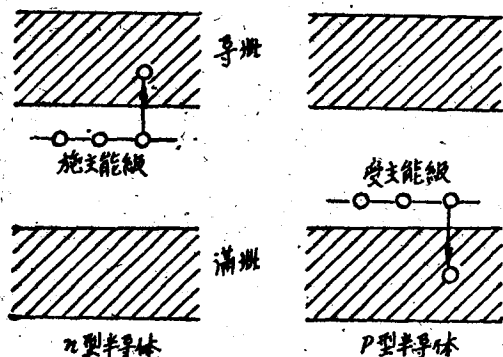
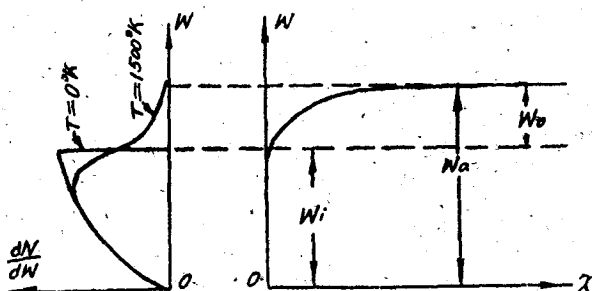


圖1-5 雜質半導體的能級結構



(塗黑的小塊面積代表動能超過 $W_a$ 的電子數目)。

圖1-6 熱電發射的必要條件

因此只要很小的熱的刺激或其它外界的影響，就足以使電子從雜質局部能級（對N型半導體講也稱為施主能級）昇到導帶而能逸出。半導體發射的逸出功由二部分組成：外逸出功和內逸出功。外逸出功和金屬的定義相同，就是從最高能級逸出所需之功；內逸出功是電子由雜質能級昇到導帶所做的功。因為雜質能級很接近導帶，因此內逸出功很小。而N型半導體的外逸出功比金屬小，這是由于在半導體晶體點陣的節點上一般都是中性原子，而對金屬說則全部是正離子。因此半導體的總逸出功小於金屬，故發射能力最強。

#### (五) 電子發射的幾種形式

根據前面的討論，我們知道，電子要克服位勢壁壘的阻礙，從金屬中發射出來，必須具有至少為 $W_a$ 的能量，而 $W_a$ 比金屬中 $T=0$ 時自由電子的最大動能 $W_i$ 還要大。超過 $W_i$ 的能量必須從外面供給。由于獲得這部分額外能量方法不同，可以把電子從金屬表面的發射分成下列四種形式：即熱電發射、強場發射、光電發射和二次發射。其中以熱電發射具有最廣泛的實用價值，所以我們着重研究它。

##### 1. 熱電發射

##### (1) 熱電發射的條件與規律。

先看上圖1-6，這圖的右邊畫出了金屬表面位勢壁壘的分布，左邊畫出轉了 $90^\circ$ 的電子動能分布圖。我們知道，當溫度升高的時候，有一部分電子的動能也升高，大於 $W_a$ ，其中有少量的電子動能可能超過 $W_a$ 。如圖中塗黑的小塊所代表的。是不是動能大於 $W_a$ 的電子都