

高等学校教学用书

电子及离子器件

DIANZI JI LIZI QIJIAN

成都电讯工程学院选编

人民教育出版社

高等学校教学用书



电子及离子器件

DIANZI JI LIZI QIJIAN

成都电讯工程学院选编

人民教育出版社



电子及离子器件

成都电讯工程学院选编

人民教育出版社出版

高等学校教学用书编辑组
北京宣武门外大街7号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第2号)

中央民族印刷厂印装

新华书店科技发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 15010·1073 开本 350×1163 1/32 印张 15 13/16 插页 1

字数 398,000 印数 0001—8,601 定价(7) 1.80

1961年8月第1版 1961年8月北京第1次印刷

目 录

緒論	1
第一章 电子发射与阴极	7
§ 1.1. 电子发射的物理基础	7
§ 1.2. 电子发射的形式	12
§ 1.3. 电子管中的实用阴极	19
§ 1.4. 新型阴极	37
第二章 二极管	44
§ 2.1. 概述	44
§ 2.2. 二极管内部的物理过程	45
§ 2.3. 二极管的特性曲线	54
§ 2.4. 二极管的静态参量	61
§ 2.5. 二极管的应用——整流作用	63
§ 2.6. 二极管的定额	66
§ 2.7. 二极管的类型与结构	67
§ 2.8. 电子管中的阳极	71
第三章 三极管	73
§ 3.1. 三极管的结构与控制作用	73
§ 3.2. 三极管中的电场	75
§ 3.3. 等效二极管和三极管中二分之三方定律	78
§ 3.4. 三极管的伏安特性和参量	81
§ 3.5. 三极管的放大作用	89
§ 3.6. 三极管在负栅运用时的栅极电流	99
§ 3.7. 三极管在正栅时的电流流通——电流的分配	102
§ 3.8. 三极管中的极间电容	108
第四章 多极管	110
§ 4.1. 屏栅四极管	110
§ 4.2. 五极管中的物理现象	115
§ 4.3. 五极管的特性曲线和参量	118
§ 4.4. 五极管的类型与结构	126
§ 4.5. 电子注功率管	130

§ 4.6. 五极管中阳极电流的双重控制	134
§ 4.7. 混(变)频的基本原理	136
§ 4.8. 多栅混频管	138
§ 4.9. 多栅变频管	140
§ 4.10. 电子管内的噪声	147
§ 4.11. 其他类型电子管及电子管的发展方向	155
第五章 振荡管	171
§ 5.1. 概述	171
§ 5.2. 振荡管结构的一般问题	173
§ 5.3. 振荡及调制三极管	179
§ 5.4. 振荡器、五极管	181
§ 5.5. 脉冲振荡管与脉冲调制管	182
§ 5.6. 大功率振荡管的运用	185
§ 5.7. 振荡管的现代发展方向	188
第六章 静电控制超高频管	190
§ 6.1. 概述	190
§ 6.2. 电子的渡越时间及渡越角	195
§ 6.3. 超高频率下电子器件中电流的流通——感应电流方程式	201
§ 6.4. 超高频率小讯号状态下平板二极管的工作情况	209
§ 6.5. 超高频率大讯号状态下二极管的工作情况	214
§ 6.6. 超高频率小讯号状态下三极管中的电子过程	216
§ 6.7. 超高频率大讯号状态下三极管中的工作特点	221
§ 6.8. 超高频四极管	224
§ 6.9. 静电控制超高频管的典型结构、参量及其应用与发展前景	226
第七章 调速管	234
§ 7.1. 速度调制与密度调制	234
§ 7.2. 双腔调速管的基本理论	239
§ 7.3. 双腔调速管放大器	245
§ 7.4. 多腔放大调速管	248
§ 7.5. 反射调速管	250
第八章 磁控管	262
§ 8.1. 多腔磁控管的工作原理和理论基础	262
§ 8.2. 多腔磁控管的结构	277
§ 8.3. 磁控管的电气特性	282
第九章 行波管和回波管	287
§ 9.1. 行波管的构造和作用原理	287

§ 9.2. 行波管中的物理过程	288
§ 9.3. 行波管的特性	293
§ 9.4. 回波管的构造及作用原理	299
§ 9.5. 回波管自激振荡器的电子调谐	302
§ 9.6. 行波管及回波管的分类及应用	304
第十章 超高频气体放电天线开关管	305
§ 10.1. 在超高频率下等离子区的某些特性	305
§ 10.2. 气体放电天线转换开关的一般特性	311
§ 10.3. 高品质因数谐振放大器	318
§ 10.4. 宽频带谐振放大器	324
第十一章 光电管	331
§ 11.1. 概述	331
§ 11.2. 实用的光电阴极	332
§ 11.3. 光电管的特性	335
§ 11.4. 光电倍增量	338
第十二章 电子束管	344
§ 12.1. 电子束管的一般构造和工作原理	344
§ 12.2. 聚焦系统——电子枪	345
§ 12.3. 偏转系统	357
§ 12.4. 荧光屏	363
§ 12.5. 示波管	365
§ 12.6. 雷达指示管	372
§ 12.7. 显象管	375
§ 12.8. 电视发送管——摄像管	378
§ 12.9. 变象管	380
§ 12.10. 记忆管	382
§ 12.11. 电子束变换器	383
第十三章 离子器件	385
§ 13.1. 激发和辐射, 电离和复合以及原子的亚稳状态	385
§ 13.2. 非自持放电	390
§ 13.3. 着火和崩溃	393
§ 13.4. 气体放电的全程伏安特性	398
§ 13.5. 辉光放电	399
§ 13.6. 弧光放电	401
§ 13.7. 冷阴极离子器件——稳压管	403
§ 13.8. 冷阴极离子器件——汞弧整流管与引燃管	406

§ 13.9. 冷阴极离子器件——辉光闸流管	409
§ 13.10. 冷阴极离子器件——单脉冲十进位计数器	410
§ 13.11. 热阴极离子器件——热阴极充气二极管	412
§ 13.12. 热阴极离子器件——闸流管	418
§ 13.13. 热阴极离子器件——脉冲闸流管	424
第十四章 半导体器件	427
§ 14.1. 半导体的物理性质	427
§ 14.2. 半导体的整流效应	433
§ 14.3. 半导体二极管	439
§ 14.4. 半导体三极管	444
§ 14.5. 晶体三极管的噪声概述	463
§ 14.6. 晶体管的基本应用	464
§ 14.7. 大信号运用	470
§ 14.8. 晶体管的发展	476
§ 14.9. 半导体光电器件	485
§ 14.10. 半导体热电器件	491

緒 論

現在是无綫电电子学蓬勃发展的时代。无綫电电子学日益广泛深入地应用到国民經济和国防建設的各个领域中，在这些领域中起着极其重要的作用。

无綫电电子设备作用的高度准确性，精密性和迅速性是其他仪器设备无可倫比的。借助于电子技术和电子设备，加速了各門科学技术的向前发展；提高了工农业生产中的劳动生产率，可以減輕人們繁重的体力劳动和脑力劳动；为国防建設提供了高度迅速可靠的强力武器；同时可以丰富人們的物质文化生活。

无綫电电子技术之所以具有如此巨大的作用，其主要原因之一是由于它采用了大量电子器件的結果。

电子器件是一切利用在一定媒质中所发生的电子現象而做成的器件的統称。

电子器件包括三个大类：电子的高真空器件，离子器件和半导体器件。

电子的高真空器件是控制或利用带电粒子在真空中的运动，以电子作为电荷的搬运者所做成的器件，又称为电子管或真空管，实际上其中压强只要在 10^{-6} 毫米汞柱以下，那末残余气体对电子管的运用就不会有什么影响。

离子器件是利用或控制带电粒子在气体媒质中的运动，气体分子被电离，由电子和离子共同参加电荷搬运作为基础的器件。

半导体器件是利用或控制带电粒子在固体中的运动的器件。特别是不同导电性质的固体交界面上所发生的电現象对半导体器件的工作十分重要。

电子器件的类型是多种多样的, 这里将各种主要类型的电子器件列成为表(0.1)所示, 以便从中了解其分类系统和相互联系。

电子器件是无綫电设备中的主要元件。显然电子器件的应用是无綫电技术发展中的决定性因素。因此人們常称电子器件是无綫电的心脏, 看来并不夸张。

事实上电子器件和无綫电电子学是紧密联系相互促进的。

在电子管方面, 1904年做出了二极管, 由于其单向导电的特性, 可以用来整流和檢波, 虽然在当时的技术上面存在一定的缺点, 并没有广泛获得应用, 但这却是电子管制造的起点。1906年, 在二极管的基础上, 在二极管阴极和阳极之間加入一个栅极, 做出了第一个三极电子管。实验表明: 栅极电位的改变, 会影响阳极的电子流, 如果其结构适当, 则很小的栅极电压变化可引起很大的阳极电流的波动, 即三极管具有放大作用。三极管发明后很快就被应用到无綫电通訊中, 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綫电发訊机摆脱了火花发报的原始状态。因此三极管的出现, 使得无綫电技术取得了很大跃进, 它使得无綫电技术趋于电子管化, 同时两者的进一步結合就形成所谓的无綫电电子学。

电子管, 特别是三极管使得无綫电技术得以高速度发展。同时无綫电技术也对电子管提出更高的要求。特别是在无綫电通訊频率提高的过程中, 要求有更完善的电子管。在1924—1930年相继出现了四极管和五极管, 克服了三极管使用在高频时显示出来的缺点。1930年后无綫电接收设备中超外差式电路的发明, 促使在1934年—1935年内出现了多栅混频管和多栅变频管。

此后, 电子管进一步的发展, 看来并不在于电极数目的繼續增加。而是在于改进结构工艺, 寻求新的工作原理。

随着无綫电技术工作频率进一步的提高, 特别是雷达的发展, 要求建立相应的能产生与放大超高频振荡的电子管。普通结构的电子管即

靜電控制電子管由於其極間電容，引線電感以及電子渡越時間的影響，在超高频波段工作時具有一定的局限性。為此目的，對於普通結構的靜電控制電子管的結構的改善進行了很多的工作。三十年代末期，做成了燈塔盞封管，它們在超高频下，仍然能使用。為了徹底消除這方面的局限性，人們不斷尋求新的原理，於1939年做成了應用速度控制的完全新穎的工作原理的調速管。其中利用了電子在電極間運動時的渡越時間進行所謂電流動態控制，目前這些管子一直在廣泛地使用着。

與此同時，在1938—1940年間出現了多腔磁控管。它能在厘米波段以至毫米波段產生大功率振蕩，這正是無線電定位技術所迫切需要的。

在1944—1946年間做成了行波管，其中利用了電子與電磁行波長久的相互作用的原理。行波管是最年青而且有很大發展前途的一種超高频電子管。在此基礎上又出現了電子波管及回波管，它們揭開了產生厘米波及毫米波振蕩的新的途徑。

電子束器件是這樣的一類電子的高真空器件，其中利用了聚焦的電子流。在電子束器件方面，應該說這類器件實際上在十九世紀就已經出現了。第一只示波管是1897年製造出來的，然而這只能算是現代電子束器件的雛型而已。廣泛地在電視接收機中使用電子束管還是本世紀三十年代以後的事。

在三十年代之初，電視技術和電子束器件的進一步結合，使得它們二者獲得了飛躍的進展，從1933年起超光電象管，1938年超正析象管到1950年的光阻管等一系列電視發送管的發展，使得電視技術的靈敏度更高，質量更趨完善，使得電視技術可以適用於各種各樣的專門用途，如工業電視，交通電視，電影電視等的需要。

在二次世界大戰時期，雷達也向電子束管提出了特殊而嚴格的要求，促使雷達專用電子束管——雷達指示管不斷提高與發展。

在電子光學成就的基礎上，為了提高光學顯微鏡分辨率，導致一種

新的电子束器件的誕生——电子显微鏡，由于电子显微鏡的巨大放大能力，使人类的眼界能进一步扩展到微觀世界中，它大大提高了人类認識物質世界的能力。

由于多路通訊的要求，在 30 年代曾出現了电子束轉換器，作为快速开关的电子束管成功地完成了几乎是无惯性的接續工作，它的进一步发展，导致新的功率更大的輻向电子束換接器的制造，使得編碼脉冲調制綫路得以真正实现。

至于光电器件的基础光电現象，早在 1887 年就已經被发现，并且对真空光电管和充气光电管进行了研究，得到实用的，性能优越的光电管。現在已广泛应用在有声电影，訊号設備以及控制电路中。

此后发明了光电倍增管，大大地提高了光电管的灵敏度，扩大了光电管的应用范围。随着半导体技术的发展，利用光电导效应和光伏效应的光敏电阻及光电池也同样得到广泛的应用。

在离子器件方面，虽然气体放电現象和气体放电理論在十八世紀就已开始研究。但并没有获得实际的应用。由于工业上的要求，特别是大功率整流电源的要求，才使得离子器件获得了相当迅速的发展，1908 年发明了水銀整流器，經過以后几年的改进，在大功率电源設備中直到現在还广泛地运用着。

水銀整流管出現后不久，相繼出現了充以汞汽或稀薄气体的离子管，并应用了热阴极，进一步改善了中小功率的电源設備。以后在此基础上出現了閘流管，它广泛用于一些控制綫路中。

1930 年出現了輝光放电穩压管，三、四年后又出現了电量放电穩压管。在大功率整流器的控制方面，由于 1933 年后引燃管的发明，得以有效的解决。

在半导体管方面，虽然 1895 年波波夫所表演的无线电訊号收发設備中的檢波器也可以算是半导体管应用的开端。但是在很长一段時間內并未得到人們很大的重視，因为在当时正是电子管襁褓之期，无线

电电子学对半导体管似乎并无迫切期望。当时看来，电子管好象已经是唯一稳定可靠的放大元件了，但从苏联学者在1922年发现晶体檢波器的負阻現象之后，激起了人們的研究兴趣，特别是二次大战中发展起来的雷达技术，对高频晶体檢波器的研究起了很显著的推动作用，开始比較广泛和深入的研究工作。但总的說来，这一时期人們对半导体的認識仅仅是初級阶段。

大战之后，曾发现經过特殊处理的鍍、硅作为檢波器可获得良好的結果。但受到当时制造工艺水平的限制并没有得到迅速的发展。这再一次清楚說明，科学发展和生产实践的密切联系，也反映了理論和实际的密切联系。

1947年提出的 $p-n$ 結理論，使人們对于晶体二极管檢波作用的認識更深入了一步。1948年发现了原始的点接触三极管具有放大作用，使人們第一次看到制造体积小，重量輕的电子放大器的可能性。放大作用的发现虽然是偶然的，但这应该看到它是长期生产实践經驗和科学研究成果的积累，是科学技术发展的必然結果。此后不久即制造了晶体三极管。这是晶体管的一个巨大跃进。晶体三极管能起电子管的某些作用，并有消耗功率少，寿命长，体积小，耐震动等优点，因而很快引起了人們的注意。此后晶体管就得到了很大发展。1948年制出点接触晶体管，1952年結合型晶体管，1953年面选型晶体管，1954年漂移型晶体管，1958年微合金扩散晶体管，柶式晶体管，隧道二极管等相繼出現。現在晶体管的制造已形成一个相当規模的工业部門，它和电子管，离子器件一起促进无綫电电子学的发展，并且各具特点，互有长短，相互补充，为我們的技术革命和技术革新提供了有力的工具；为生产全盘自动化，为人类进入宇宙探索其他天体开拓了宏偉的前景。

事物的发展决定于需要，电子器件今后的发展也不例外；由于无綫电电子技术广泛深入的应用到几乎是所有的科学技术部門中，在各种广播电视通訊，工业交通，医疗技术，計算技术，測量电量和非电量的参

数,自动控制和遥控技术,无线电定位技术,火箭技术,宇宙飞船,原子能技术,天文气象研究以及人們日常的物质生活和精神文化生活方面电子器件为它們开辟了极为广闊的道路,大大加深了这些部門的重要作用。

随着各种不同科学部門的要求,电子器件的发展是日新月异的。但是总括起来看,电子器件的发展方向主要是在朝着提高使用頻率,提高輸出功率,提高使用可靠性以及縮小体积、重量,降低器件噪音以及降低生产成本等方面进一步发展。

由于无线电设备中应用了各式各样的电子器件,所以深入研究电子器件的基本工作原理,了解它們的特性参量和应用情况,将是进一步掌握无线电技术知識的一个重要基础。

第一章 电子发射与阴极

§ 1.1. 电子发射的物理基础

1. 电子的物理性质

在讨论电子发射以前，先来复习一下电子的物理性质。电子是带有负电荷的质点。它的电量：

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 库；}$$

它的质量：

$$m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ 千克，}$$

故

$$\frac{e}{m} = 1.759 \times 10^{11} \text{ 库/千克。}$$

因为电子带有电荷，因此，如果电子处在电场中，在电场的作用下就会运动。

设电子所在点的电场强度为正，那么电子将受到一力 $F = -eE$ 。

在力 F 的作用下，电子将作加速运动。电子的速度和动能都将增加，电子的位置也由低电位点移到高电位点。假设电子在电场中某一点 A 开始运动， A 点的电位是 U_A ，电子具有和电场方向相反的速度 v_A 。在电场作用下，电子运动到 B 点，如果 B 点的电位是 U_B ，电子到达 B 点的速度为 v_B 。那么电子在电场运动中所获得的动能是 $\frac{1}{2}m(v_B^2 - v_A^2)$ 。

根据能量不灭定律，电子所获得的动能应该和电场对电子所作的功相等。电场对电子所作的功为 $e(U_B - U_A)$ 。

$$\therefore \frac{1}{2}m(v_B^2 - v_A^2) = e(U_B - U_A). \quad (1.1)$$

如果电子是由静止开始运动的即 $U_A = 0$ ，那么上式化简为：

$$\frac{1}{2}mv_E^2 = e(U_B - U_A). \quad (1.1a)$$

所以电子在电场中运动所获得的动能，只和它所经过的电位差有关，换句话说，电子在电场中任一点的速度，只和该点与电子运动起始点之间的电位差有关，假如这个电位差用 u 来表示，那么在该点电子的速度

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m}U} = 5.93 \times 10^5 \sqrt{U} \text{ 米/秒}, \quad (1.16)$$

其中 U 的单位为伏。

如果，电位差为 100 伏，那么电子最后将具有 6000 千米/秒的速度。

如果电子运动的速度方向和电场的方向相同，那么电子在电场的作用下作减速运动。电子动能的减小和电子对电场所作的功相等。如果二点之间的电位差大于电子具有的动能，那么电子就不可能到达该点，当电子的速度减到零以后，在电场作用下将返回去作加速运动。

在实用单位 (M. K. S 制) 中能量的单位是焦耳，电子的能量用此单位来表示显得太大。因此通常我们用电子伏作为单位来度量电子的能量，1 电子伏表示电子经过 1 伏加速后所获得的能量。

$$1 \text{ 电子伏} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 库} \times \text{伏} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 焦耳}。$$

采用这单位可以很快地来判断电子的运动，例如电子在电场中某一点的动能为 5 电子伏，如果电场中有一点比该点的电位低 6 伏，电子就不可能到达这一点。

2. 金属中自由电子的能量

金属由一定排列的结晶体组成，每一个结晶体内原子与原子之间保持一定的位置关系。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。至于最外层的电子，因同时也很接近附近的原子的缘故，任何一个原子都不足以束缚它们在自己

的周围。因此金属中每一个原子都变成正离子，正离子按一定的规律排列起来形成有规则的晶体点阵。原子所失去的电子能够在正离子间自由运动，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的存在。

金属中的自由电子具有一定的能量，费密-狄拉克统计公式说明金属中自由电子的能量分布为：

$$dN_w = \frac{8\pi\sqrt{2}m}{h^3} \frac{\sqrt{W}}{1 + e^{\frac{W-W_m}{KT}}} dW, \quad (1.2)$$

其中 W 是自由电子的动能 $(= \frac{1}{2}mv^2)$ ；

T 是绝对温度；

m 是电子质量；

h 是普兰克常数，等于 6.624×10^{-34} 焦耳·秒；

K 是波尔兹曼常数，等于 1.38×10^{-23} 焦耳/度；

dN_w 是每单位体积的金属内，动能在 W 和 $W + dW$ 之间的电子数目；

W_m 表示在绝对零度时，电子的最大动能，它等于：

$$W_m = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3N}{\pi} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (1.3)$$

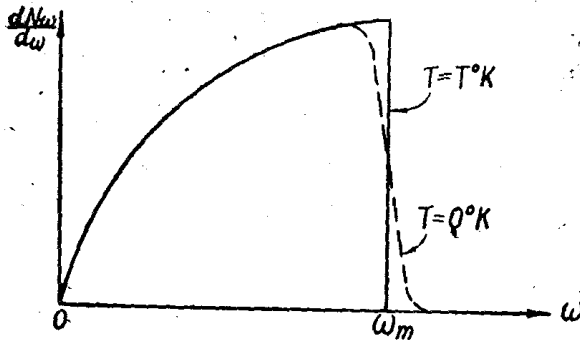


图 1.1

其中 N 是单位体积中的金属内自由电子的总数, 如图 1.1 所示。

如鎢每个原子中含有 2 个自由电子, 那末根据计算可得在 0°K 时电子的最大动能有 9.1 电子伏, 在室温下, 电子的最大动能还要大。很自然会产生这样的问题: 金属中的自由电子既然具有这样大的动能, 在常温下为什么不能逸出金属呢?

3. 逸出功

在金属内部的自由电子的确具有这么大的动能。这些自由电子在金属内部并不受到力, 因为在金属内部原子晶格中正离子对电子的引力实际上是各向对称的, 总的合力趋于抵消, 但是在金属表面却不然; 由于金属最表面的原子晶格的正离子外面不再有其他的正离子, 故如自由电子跑到最外层正离子外面时, 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, 阻止电子向金属外面运动。这就是说电子要想离开金属表面, 首先要克服这一个阻碍它的力。

如果认为电子不断地冲过最表面的正离子而跑向金属表面, 又不

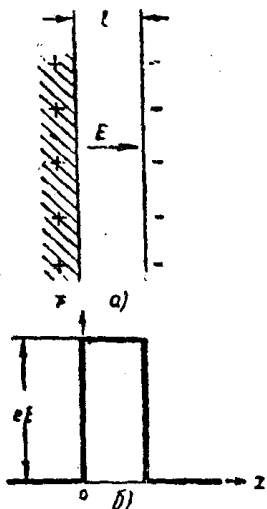


图 1.2 电子通过双电层时作用
在它上面的力的变化。

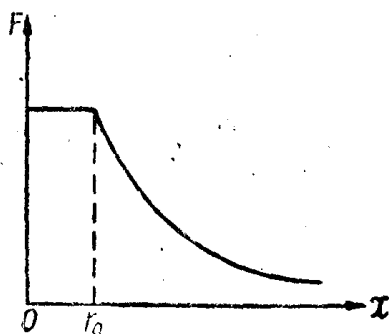


图 1.3