

高等学校教材

# 微波器件原理

杨祥林 主编 张兆镗 张祖舜 编



电子工业出版社

# 微波器件原理

杨祥林 主编 张兆镛 张祖舜 编

电子工业出版社

## 内 容 简 介

本书介绍微波器件的基本原理，重点讨论各类微波器件中荷电粒子与电磁场的相互作用和能量转换机理，对器件的结构、特性和应用也作了简要介绍。

全书共分五章，即微波三、四极管，速调管，行波管，正交场微波电子管，微波半导体器件。与以前编写的《微波电子管原理》相比，作了较多的删减，并增写了变阻管、变容管、微波晶体管、雪崩管、转移电子器件等固体器件的内容，使教材更为精炼、新颖、丰富。

本书是全国高等工科院校电子物理与器件专业统编教材之一，对微波、雷达、通信、电子对抗等专业也有参考价值，并可供有关工厂、研究单位的工程技术人员参考。

## 微波器件原理

杨祥林 主编 张兆镛 张祖舜 编

责任编辑：龚兰方

\*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

科技情报印刷厂印刷

\*

开本：787×1092 1/16 印张：23.25 字数：536.7千字

1985年4月第1版 1985年5月第1次印刷

印数：50000册 定价：4.80元

统一书号：15290·95

## 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工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》、中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践，师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者，各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，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

本书系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审定和推荐出版。

本书由南京工学院杨祥林担任主编，西安交通大学钱慰宗担任主审。编审者均依据电子物理与器件编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅。

本课程的参考教学时数为80学时。全书内容包括了当代科学研究和整机设备中广泛应用的几种主要的微波器件。前四章为微波电真空器件，约60学时内容；第五章为微波半导体器件，约20学时内容。第一章概述静电控制电子管原理和电子管的高频效应，分析微波三、四极管中的渡越时间、时空图、感应电流和能量转换等电子现象，这也是其它许多微波器件的共同基础。第二章讨论利用渡越时间效应的电子流动态控制方法和速调管的基本原理，分析速调管的物理过程和基本特性，对速调管的结构和参数也进行了介绍。第三章论述了电子流与行波场的相互作用原理和行波管放大器，包括传统的慢波放大器和发明不久的快波放大器（回旋行波放大器），对螺旋线和耦合腔链两种慢波结构的参数特性进行了详细的讨论。第四章介绍正交场微波电子管的原理和结构特性，包括磁控管振荡器和各种前向波放大器。

随着科学技术的进步，最近二十年来，固态微波器件在微波领域得到了迅速发展，成为微波领域中另一类重要的器件，与微波电真空器件并驾齐驱，在中小功率范围内有逐步取代微波电真空器件的趋势。所以第五章专门讨论微波固态或半导体器件，较详细地介绍了变阻管、变容管、微波双极晶体管、微波场效应管、雪崩管和体效应管等的工作原理和物理过程。为加强联系实际和加深对器件原理的掌握，对结构工艺和电路应用也作了必要的介绍。

本书属专业课教材，涉及到的基础知识面较广，其中主要有电磁场理论、电子线路、半导体物理、微波技术、电子光学、电子器件材料与工艺。为避免教材内容庞杂，凡前修课中已有的公式和结论，一般均直接加以引用，而不予重新推导。由于学时和篇幅有限，对手册上可以查找的许多器件具体结构参数的设计计算未予过多注意，而着重分析各种微波器件中带电粒子流与电磁场间相互作用的物理概念、物理过程及实现有效能量转换的方法和条件。书中打\*号者属于选讲内容。为配合课程教学和加深对教材基本内容的理解，各章后面均附有一定数量的习题。

本书由南京工学院杨祥林编写第一、二、三章，成都电讯工程学院张兆镛编写第四章，南京工学院张祖舜编写第五章，杨祥林统编全稿。本书由西安交通大学钱慰宗审阅第一、二、三、四章，张屏英审阅第五章。南京工学院许大信同志协助整理全书图稿，编写了习题，校阅文稿并提出宝贵意见，这里表示诚挚的感谢。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

|                                 |            |                               |              |
|---------------------------------|------------|-------------------------------|--------------|
| 绪论 .....                        | (1)        | 1.7-5 微波三、四极管的应用范围 .....      | (40)         |
| § 1 微波器件的发展简史 .....             | (1)        | <b>第二章 速调管 .....</b>          | <b>(43)</b>  |
| § 2 微波器件的应用 .....               | (4)        | § 2.1 概述 .....                | (43)         |
| <b>第一章 微波三极管和四极管 .....</b>      | <b>(7)</b> | 2.1-1 电子流的动态控制原理 .....        | (43)         |
| § 1.1 概述 .....                  | (7)        | 2.1-2 速调管的发展和分类 .....         | (44)         |
| 1.1-1 真空二极管 .....               | (7)        | § 2.2 电子注的速度调制原理 .....        | (45)         |
| 1.1-2 真空三极管 .....               | (8)        | 2.2-1 理想间隙的速度调制 .....         | (45)         |
| 1.1-3 电子管的高频效应 .....            | (11)       | 2.2-2 电子注耦合系数 .....           | (46)         |
| § 1.2 电子渡越时间和渡越角 .....          | (13)       | 2.2-3 输入间隙的电子注负载 .....        | (48)         |
| 1.2-1 电子渡越时间和渡越角 .....          | (13)       | § 2.3 电子注的漂移群聚 .....          | (50)         |
| 1.2-2 电子运动时空图 .....             | (14)       | 2.3-1 单段漂移空间的群聚 .....         | (50)         |
| § 1.3 微波器件中的感应电流原理 .....        | (17)       | 2.3-2 群聚电流的谐波分析 .....         | (53)         |
| 1.3-1 自由电荷运动引起的感应电流 .....       | (17)       | 2.3-3 空间电荷与大信号非线性效应 .....     | (55)         |
| 1.3-2 拉姆定律 .....                | (19)       | <b>§ 2.4 能量转换效率</b>           |              |
| 1.3-3 稳定状态下电子流的感应电流 .....       | (20)       | <b>和双腔速调管放大器 .....</b>        | <b>(59)</b>  |
| 1.3-4 密度调制电子流通过平板间隙时的感应电流 ..... | (21)       | 2.4-1 输出间隙中的能量转换 .....        | (59)         |
| § 1.4 电子注与电场的能量交换 .....         | (23)       | 2.4-2 双腔速调管放大器 .....          | (61)         |
| 1.4-1 电子流与电场间的能量转换 .....        | (23)       | 2.4-3 双腔速调管的其他用途 .....        | (64)         |
| 1.4-2 作用电场的建立和能量摄取 .....        | (25)       | 2.4-4 双腔速调管的应用和典型参数 .....     | (68)         |
| 1.4-3 摄取电子注能量的高频耦合系统 .....      | (26)       | § 2.5 空间电荷波原理 .....           | (70)         |
| § 1.5 小信号状态下的电子现象 .....         | (27)       | 2.5-1 无界电子注中的空间电荷波方程 .....    | (70)         |
| 1.5-1 等效二极管和渡越角 .....           | (27)       | 2.5-2 空间电荷波的性质及分布 .....       | (74)         |
| 1.5-2 小信号条件下三极管的输入电导 .....      | (28)       | 2.5-3 漂移管对空间电荷波的影响 .....      | (77)         |
| 1.5-3 阴极发射能力引起的频率限制 .....       | (30)       | § 2.6 多腔速调管 .....             | (81)         |
| § 1.6 大信号状态下微波三、四极管中的电子现象 ..... | (31)       | 2.6-1 多级群聚的定性分析 .....         | (82)         |
| 1.6-1 阴极发射电流 .....              | (31)       | 2.6-2 多腔速调管放大器增益的近似分析 .....   | (85)         |
| 1.6-2 微波三极管中的电子运动 .....         | (34)       | 2.6-3 输出功率和幅值特性 .....         | (86)         |
| 1.6-3 微波四极管中的电子现象 .....         | (35)       | 2.6-4 频宽 .....                | (87)         |
| § 1.7 微波三、四极管放大器和振荡器 .....      | (35)       | 2.6-5 多腔速调管的结构 .....          | (90)         |
| 1.7-1 基本电路的选择 .....             | (35)       | 2.6-6 特种结构的多腔速调管 .....        | (95)         |
| 1.7-2 微波三、四极管振荡器及放大器的结构 .....   | (37)       | 2.6-7 多腔速调管的应用和典型参数 .....     | (97)         |
| 1.7-3 高频运用对微波三、四极管结构设计的要求 ..... | (38)       | § 2.7 拒斥场中的电子群聚和反射速调管原理 ..... | (100)        |
| 1.7-4 微波三、四极管的典型结构 .....        | (38)       | 2.7-1 拒斥场中的电子群聚 .....         | (101)        |
|                                 |            | 2.7-2 反射速调管谐振腔间隙的电子导纳 .....   | (103)        |
|                                 |            | 2.7-3 反射速调管振荡器 .....          | (105)        |
|                                 |            | <b>第三章 行波管 .....</b>          | <b>(111)</b> |
|                                 |            | § 3.1 概述 .....                | (111)        |

|                              |              |                                |              |
|------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------|
| 3.1-1 行波管的基本原理和结构 .....      | (111)        | 和截止特性 .....                    | (190)        |
| 3.1-2 行波管的发展和分类 .....        | (114)        | 4.2-2 静态磁控管中的阳极电流 .....        | (194)        |
| §3.2 行波管的小信号理论 .....         | (114)        | §4.3 磁控管中的谐振系统 .....           | (198)        |
| 3.2-1 行波场对电子注的作用 .....       | (115)        | 4.3-1 磁控管谐振系统的谐振模式 .....       | (198)        |
| 3.2-2 电子流对行波场的作用 .....       | (117)        | 4.3-2 谐振系统的谐振频率 .....          | (200)        |
| 3.2-3 行波管的特征方程及其解答 .....     | (119)        | 4.3-3 相互作用空间内的高频场结构 .....      | (204)        |
| 3.2-4 行波管的小信号增益 .....        | (121)        | 4.3-4 电子与行波的同步 空间谐波 .....      | (206)        |
| §3.3 行波管小信号理论的进一步讨论 .....    | (123)        | §4.4 磁控管中振荡的自激 .....           | (208)        |
| 3.3-1 普遍情况下的特征方程 .....       | (124)        | 4.4-1 自激的产生 .....              | (208)        |
| 3.3-2 起始损耗和增益计算 .....        | (128)        | 4.4-2 磁控管的等效电路 .....           | (209)        |
| §3.4 输出功率、效率和非线性现象 .....     | (130)        | 4.4-3 磁控管中的相位聚焦和电子挑选 .....     | (210)        |
| 3.4-1 输出功率和效率 .....          | (130)        | 4.4-4 磁控管的同步电压 门槛电压 工作电压 ..... | (212)        |
| 3.4-2 输入-输出幅值特性 .....        | (131)        | §4.5 磁控管振荡的稳定性 .....           | (216)        |
| 3.4-3 提高效率的方法 .....          | (134)        | 4.5-1 非兀模式振荡的不稳定性 .....        | (216)        |
| 3.4-4 非线性失真 .....            | (136)        | 4.5-2 振荡在非兀模式上的可能性 .....       | (218)        |
| §3.5 行波管的不稳定性 .....          | (137)        | 4.5-3 隔模带的应用 .....             | (220)        |
| 3.5-1 行波管的自激振荡条件 .....       | (137)        | 4.5-4 异腔式阳极块谐振系统 .....         | (223)        |
| 3.5-2 集中衰减器和高频切断 .....       | (139)        | §4.6 磁控管的效率 .....              | (225)        |
| 3.5-3 慢波线切断对增益和效率的影响 .....   | (140)        | 4.6-1 最大电子效率 .....             | (225)        |
| §3.6 返波管 .....               | (141)        | 4.6-2 线路效率和总效率 .....           | (228)        |
| 3.6-1 电子注与返波的相互作用原理 .....    | (142)        | §4.7 磁控管的工作特性和负载特性 .....       | (230)        |
| 3.6-2 返波管的小信号理论 .....        | (143)        | 4.7-1 磁控管的工作特性 .....           | (230)        |
| §3.7 螺旋线行波管的结构设计 .....       | (148)        | 4.7-2 磁控管的电子频率偏移 .....         | (232)        |
| 3.7-1 螺旋慢波线的结构和特性 .....      | (148)        | 4.7-3 磁控管的负载特性 .....           | (235)        |
| 3.7-2 螺旋慢波线的功率限制和环杆慢波线 ..... | (158)        | §4.8 磁控管的频率调谐 .....            | (238)        |
| 3.7-3 螺旋线行波管的输入输出装置 .....    | (161)        | 4.8-1 容性调谐 .....               | (239)        |
| §3.8 耦合腔行波管 .....            | (166)        | 4.8-2 感性调谐 .....               | (240)        |
| 3.8-1 基本工作原理 .....           | (166)        | 4.8-3 旋转调谐 .....               | (241)        |
| 3.8-2 耦合腔慢波线的色散特性和耦合阻抗 ..... | (168)        | 4.8-4 耦合腔调谐 .....              | (242)        |
| 3.8-3 耦合腔行波管的寄生振荡 .....      | (172)        | *§4.9 同轴磁控管 (CEM) .....        | (243)        |
| 3.8-4 耦合腔行波管的结构 .....        | (173)        | 4.9-1 普通磁控管中存在的问题 .....        | (243)        |
| *§3.9 回旋行波管 .....            | (176)        | 4.9-2 同轴磁控管的基本原理和结构 .....      | (244)        |
| 3.9-1 相对论角向群聚原理 .....        | (176)        | 4.9-3 同轴磁控管的特性 .....           | (247)        |
| 3.9-2 耦合方程和小信号增益 .....       | (180)        | *§4.10 电压调谐磁控管 (VTM) .....     | (248)        |
| 3.9-3 典型结构和参数 .....          | (182)        | 4.10-1 电调管的工作原理和基本结构 .....     | (249)        |
| <b>第四章 正交场微波电子管 .....</b>    | <b>(188)</b> | 4.10-2 电调管的参量与特性 .....         | (285)        |
| §4.1 概述 .....                | (188)        | §4.11 正交场放大管 .....             | (254)        |
| §4.2 静态磁控管的基本特性 .....        | (190)        | 4.11-1 分布发射式正交场放大管 .....       | (254)        |
| 4.2-1 静态磁控管中的电子运动            |              | 4.11-2 注入式正交场放大管 .....         | (256)        |
|                              |              | <b>第五章 微波半导体器件 .....</b>       | <b>(261)</b> |
|                              |              | §5.1 概述 .....                  | (261)        |

|   |       |                                      |       |
|---|-------|--------------------------------------|-------|
| §5.2 变阻(混频检波)管 .....  | (264) | 特征频率 $f_T$ 和最高振荡频率 $f_M$ .....       | (314) |
| 5.2-1 PN结和肖特基结 .....  | (265) | 5.5-3 噪声性能 .....                     | (318) |
| 5.2-2 肖特基势垒二极管的结构、<br>等效电路与优值 .....                               | (273) | 5.5-4 微波晶体管的电压频率极限 .....             | (320) |
| *5.2-3 变阻管作为非线性电阻的应用 .....  | (276) | * § 5.6 微波晶体管的电路应用 .....             | (321) |
| §5.3 变容管 .....  | (283) | 5.6-1 微波晶体管的散射参数<br>和噪声参量 .....      | (321) |
| 5.3-1 耗尽层电容 .....   | (284) | 5.6-2 微波小信号晶体管放大器 .....              | (323) |
| 5.3-2 变容管的结构、等效电路与优值 .....  | (285) | § 5.7 雪崩管 .....                      | (325) |
| 5.3-3 电荷储存与扩散电容 .....   | (288) | 5.7-1 渡越时间效应和注入滞后方法 .....            | (325) |
| *5.3-4 非线性电容的电路应用 .....   | (289) | 5.7-2 崩越管 (Impatt) .....             | (328) |
| § 5.4 微波双极晶体管 .....   | (296) | 5.7-3 俘越管 (Trappatt) .....           | (238) |
| 5.4-1 共基极短路电流放大系数 $\alpha$<br>的频率特性 .....                         | (296) | 5.7-4 势垒注入渡越时间<br>二极管 (Baritt) ..... | (342) |
| 5.4-2 高频等效电路和最高振荡频率 $f_M$ .....                                   | (303) | § 5.8 体效应管(转移电子器件) .....             | (344) |
| 5.4-3 结构、材料和设计 .....  | (305) | 5.8-1 导带的多能谷结构与速场特性 .....            | (344) |
| 5.4-4 噪声性能 .....  | (307) | 5.8-2 电子的积累与不稳定性 .....               | (345) |
| § 5.5 微波场效应晶体管 .....  | (311) | 5.8-3 大信号振荡性能——畴动力学 .....            | (346) |
| 5.5-1 耗尽型场效应管的工作原理、静态特<br>性和低频跨导 .....                            | (311) | 5.8-4 小信号负阻特性 .....                  | (355) |
| 5.5-2 高频等效电路、高频跨导 $S(\omega)$ 、<br>特征频率 $f_T$ 和最高振荡频率 $f_M$ ..... | (314) | 5.8-5 材料与结构 .....                    | (357) |
|   |       | * § 5.9 负阻器件的应用 .....                | (357) |



# 绪 论

## §1 微波器件的发展简史

### 一、微波器件发展的基础

电子学和电子工业是沿着两条“生长线”发展起来的，一条是电子器件，一条是电磁波。电子器件的出现和发展已有整整100年历史了。早在1883年，英国学者爱迪生在研究白炽灯泡、观察到真空中的电子导电现象时就为电子器件的发明打下了基础。之后，在1904年弗莱明利用爱迪生效应，制成了第一个电子管——灵敏检波二极管。三年后，1906年美国德福雷斯特又发明了三极管，它能以极小的能量控制大的电能，打开了信号放大的大门，这是20世纪初最大的发明之一，是电子学发展中具有划时代意义的伟大事件，大大推动了电子技术的发展。在此后的半个世纪的时间内，电子器件得到了飞跃的发展，相继发明了四极管，五极管，束射功率管，闸流管，微波三、四极管等各种类型、各种结构和功能的电子器件，成为电子工业发展的最主要的器件。

电磁波的发展历史要追溯到麦克斯韦和赫兹的工作。早在1864年，麦克斯韦就在研究电磁辐射的数学理论，1888年赫兹用实验证实了麦克斯韦关于存在无线电波的预言。八年后，马可尼和波波夫各自完成了无线电通信的试验，而初期的无线电通信用特制的交流发电机发射，只能用于通报。电子器件的出现解决了信号的产生、放大、发送、传播和接收、检波等一系列基本技术，依次开辟了中频、高频无线电通信。到了三十年代，又出现了甚高频，使用无线电传输电视成为可能。

### 二、微波电子学和微波器件的发展

无线电通信的发展，要求采用更高的频率，传输更多的信息。雷达是三十年代利用电磁波的又一重要发明。为了提高雷达的分辨能力，需要应用高频电磁波，电视和广播亦要求提高频率，电磁波的频率范围需要不断扩展，现在国际上电磁波频谱已经预分到400千兆赫。所以，如何提高电磁波的频率，开拓新的电磁波谱，始终是电子学发展史上的一条重要脉络。

开拓电磁波谱的基本问题，是研究高频电磁波振荡的产生和放大。由低频电子学发展到微波电子学的历史，实际上可归结为高频振荡的产生和放大的发展史。在二十到三十年代，这个历史基本上沿着两条途径发展。一条是在普通静电控制低频电子管原理的基础上，从缩小管子尺寸、改进管子结构着眼来提高工作频率，出现了指形管、橡实管、门钮管、灯塔管和谐振腔管等静电控制微波电子管。工作频率在三十年代中达到2000兆赫，三十年代末达到3500兆赫，五十年代中才达到10000兆赫，实际上已到了静电控制微波管的极限工作频率。另一条是利用电子“渡越现象”的动态控制原理，研制各种动态控制微波管。这一发展过程，最早从二十年代初期研究单阳极磁控管开始，到三十年代中期发明速调管，三十年代末期发明多腔行波磁控管，四十年代初期发明行波管，四十年代末期发明大功率多腔速调管，五十到六十年代发明各种正交场振荡器和放大器，至今历时约60年，已研制成功各种类型的微波电子管。图1中列出了这些微波管的分类。

微波电子管分类表

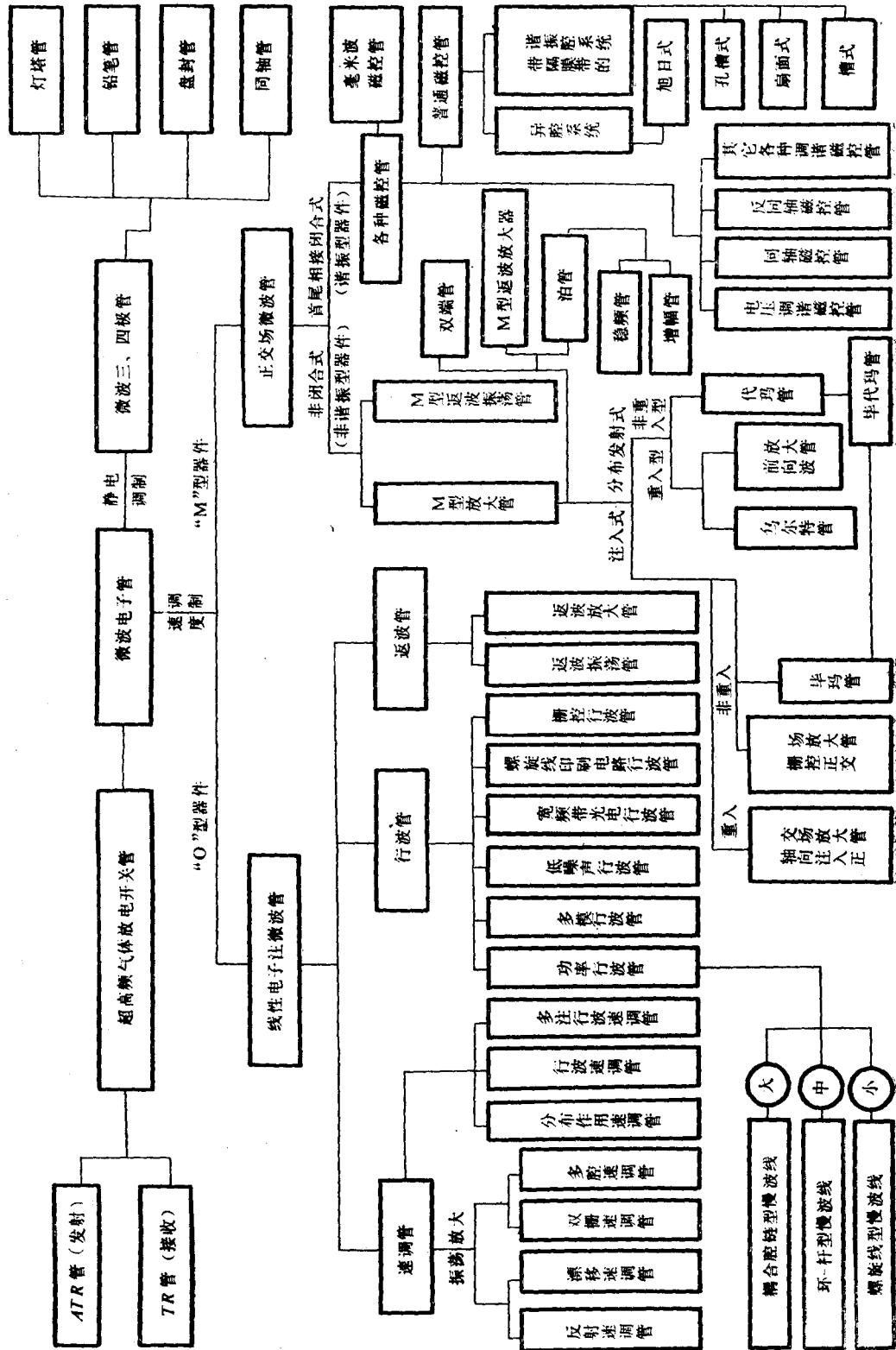


图 1 微波电子管分类表

### 三、微波电子学的新发展

六十年代以后，利用动态控制原理制成的普通微波管日趋成熟。但是，由于军事工业应用的要求，消费市场的扩大和深入，基础科学研究的发展和工艺技术的不断突破，微波电子学和微波器件现正向着新的高度、新的深度和新的领域迅猛地发展，这种发展集中表现在以下三个方面：

#### 1. 高可靠、长寿命、高性能和系列化

为了适应通信、广播、电视、雷达和电子对抗等各种要求，研制和发展了许多品种系列，如各种频段、各种功率等级的金属陶瓷管，反射速调管，多腔速调管，磁控管及行波管等系列。微波管发展初期，主要集中在提高功率、效率、增益、带宽和降低噪声方面，五十年代后，随着卫星、导弹和其他航天技术的发展，微波管开始向高可靠、长寿命、小体积和轻重量方面发展。由于新型雷达体制的出现，又对微波管的频率、相位稳定性和功率放大管与振荡管的噪声等性能提出新的要求，并发展了许多高性能的微波管。六十年代后，随着相控阵雷达进入实用阶段，微波管又向着大生产、低成本、高一致性方向发展。

#### 2. 固体微波电子学和微波固态器件

电子管发明五十多年后，1948年美国的巴丁等人发明了半导体晶体管，大大加快了电子技术发展的速度，特别是七十年代大规模集成电路的迅速发展，使电子工业发生了根本的变革。目前，在低功率、低频率和低噪声放大和振荡等收讯器件方面，晶体管已取代电子管。在这种发展趋势的推动下，近20年来，微波电子学和固体电子学工作者开始利用半导体和固体材料，来研究产生微波的原理和方法。一种是利用低频晶体管原理，从改进结构、缩小尺寸等方面着眼来提高工作频率；另一种是根据固体材料性质，采用新的原理来产生和放大高频电磁波。现在，作为混频、检波、振荡、放大、限幅、移相和开关用的各种微波固态器件都已研制成功，并已广泛用于雷达接收机、微波测量仪器和低功率的雷达发射机中，今后还

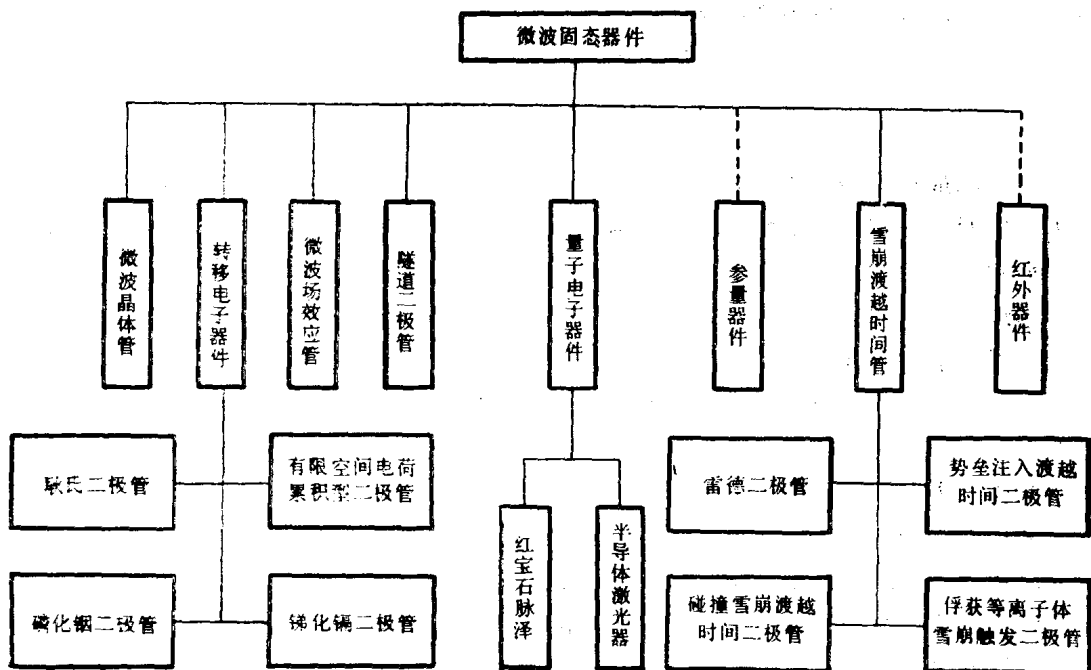


图2 微波固态器件分类表

将得到越来越广泛的应用。图2中列出了各种微波固态器件的分类。

与微波电子管相比，微波固态器件的主要特点是：体积小，重量轻，电压低，功耗小，工艺简单，成本低，因此在小型电子设备中具有广泛的发展和应用前景。但是，固态器件由于作用区尺寸小，最大场强低，耗散功率小，所以目前微波固态器件的功率电平还远远达不到高功率微波管的水平，一般要低三个数量级以上。

目前微波固态电子学发展的另一个趋向是：把微带传输线、微带微波元件和微波固态器件做在同一块衬底上，构成微波集成电路；把电子枪、调制系统、半导体靶和输出耦合网络装在同一个真空管壳内，构成一种新型的电子注-半导体复合器件。

### 3. 毫米波和亚毫米波技术

毫米波和亚毫米波，介于光波和厘米波之间。与厘米波相比，具有方向性强，分辨率高，频带范围宽，信息容量大，对等离子体的穿透能力强等特点。因而，七十年代以后，毫米波、亚毫米波技术进入蓬勃发展时间。发展毫米波、亚毫米波技术的关键是要寻求这一波段的功率源。最早从事毫米波、亚毫米波领域研究工作的是微波电子学工作者，在六十年代初期就利用圆波导中周期性电子注与快波相互作用，制成一种尤必管(Ubitron)，工作频率达到55千兆赫，输出功率达150千瓦。之后，毫米波、亚毫米波功率源沿着四个方向发展：一是利用传统的普通微波电子管来产生和放大毫米波、亚毫米波（“O”型返波管），已经产生高达1000千兆赫的亚毫米波辐射；二是利用微波固态器件来产生毫米波，其中碰撞雪崩渡越时间二极管已产生高达200千兆赫、约100毫瓦的毫米波输出；三是七十年代后开始利用激光技术——光泵分子气体激光器和双频激光，通过非线性晶体的差频技术来产生亚毫米波辐射，在30~2000微米之间，已产生了几百条亚毫米波谱线、毫瓦级功率输出，脉冲功率可达100千瓦；四是利用电子回旋脉泽（回旋管），自由电子激光器及受激相干散射等新原理来产生大功率毫米波、亚毫米波辐射，这是微波电子学近十年来发展中的一项新的突破，形成了一门新的相对论电子学。研制成的许多大功率、高效率的相对论微波功率发生器，将对毫米波、亚毫米波技术的发展产生深远的影响。

## §2 微波器件的应用

电子管的最初应用主要是无线电通信和广播。第二次世界大战期间，微波电子管得到较快发展，发明了速调管和磁控管，立即被雷达和防空技术所采用。五十年代以后，电视广播、微波通信和工业加热亦开始广泛采用微波器件。微波固态器件研制成功后，首先被用作微波信号源，雷达和通信接收机的本振和混频器以及低噪声放大器。随着微波工程的迅速发展，微波器件正得到越来越广泛的应用。目前微波器件主要用于如下一些科学技术领域：

(1) 在无线电侦察、干扰与反干扰等电子对抗技术中，应用各种波段的宽调谐、低噪声行波管，“O”型返波管，电压调谐磁控管，宽频带、高效率的正交场放大管，大功率行波管，双模行波管，快速调频或捷变频磁控管等。

(2) 雷达是一种广泛使用的电子装备，种类很多，需要采用从米波到毫米波的各种微波器件，包括半导体变阻和变容二极管，微波晶体三极管，雪崩二极管，微波真空三、四极管，磁控管，功率速调管，行波管，正交场放大管，行波速调管等各种低噪声、宽频带、大功率、高效率和高稳定性的微波器件，作为雷达设备的本振、混频、检波、高放和输出发射级。

(3) 导航与制导系统的发射机和接收机中亦采用各种微波器件, 包括反射速调管, 双腔速调管振荡器, 漂移速调管, 多腔速调管, 静电聚焦速调管, 普通磁控管和信标磁控管等微波电子器件。

(4) 微波通信是近代通信技术发展的重要成就, 其中有中继通信, 超视距电离层、同温层和对流层散射通信, 远距离波导传输通信及卫星通信等各种通信方法。在各种微波通信设备中, 都大量采用各种微波器件, 包括中小功率的微波三极管, 反射速调管, 行波管和固态器件, 大功率的速调管, 行波管和电调“M”型返波管等。

(5) 电视广播, 包括地面电视广播和卫星电视广播。前者多应用470~960兆赫、几十千瓦功率的微波四极管和多腔速调管; 后者多数用L、C和X波段的行波管和多腔速调管。在地面接收站或接收机中, 也要采用各种低功率、低噪声的微波接收器件。

(6) 空间技术中环绕地球飞行的人造卫星及各种飞行器的电子系统, 为了完成通信、气象、侦察、测地、科学考察等, 必需具备传输电视信号、遥测数据、接收指令、导航、预警及传输有关设备状态的信息等功能, 需要配备多套电子设备, 应用各种行波管和微波三极管。

(7) 在微波粒子加速器和受控热核反应中, 利用微波能量加速带电粒子来研究原子核和基本粒子结构; 利用微波还可对各种化学反应和生物效应进行研究, 对金属进行无损探伤; 利用毫米波、亚毫米波进行等离子体诊断和等离子体二次加热。在上述应用中要采用功率为1~30兆瓦, 频率为600~9000兆赫, 脉宽为1~30微秒的磁控管、泊管、速调管和功率为几百千瓦到几十兆瓦, 频率为28~120千兆赫, 脉宽为几毫秒到几秒的回旋管作为激励源。

(8) 微波加热在工农业生产中已广泛采用, 对纺织物、粮食、药品、纸张、皮革、胶卷、木材、塑料聚合物、水泥、食品、种子等分别进行脱水、烘干、消毒杀菌和育种等处理。在家庭或饭店, 有的也已采用微波炉作为熟煮器, 取得烹调时间短而色香味好的成效。在这些应用中大量采用频率为915和2450兆赫、功率为几百瓦到几十千瓦的连续波磁控管。

(9) 近一、二十年来, 微波技术已广泛应用在医疗和生物生理研究中。例如用微波能治疗关节炎、扭伤、癌症等多种常见病, 且有较好的疗效。科学工作者利用微波与人体生理组织的相互作用进行诊断和治疗, 研究组织特性和生理现象, 在这些应用中采用连续波磁控管作为微波源。

(10) 其它科学研究方面的应用 近年来国内外正在研究将微波应用于空间太阳能发电站和定向动力传输。微波遥感技术也已广泛应用于地质资源勘测、海洋学、气象学和天文学等学科领域, 还有微波等离子推进、微波辐射武器、微波促进化学反应等等。在这些应用中, 都将需要各种各样的微波器件。

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions and activities. It emphasizes that this is crucial for ensuring transparency and accountability in the organization's operations.

2. The second part of the document outlines the various methods and tools used to collect and analyze data. It highlights the need for consistent and reliable data collection processes to support effective decision-making.

3. The third part of the document focuses on the role of technology in data management and analysis. It discusses how modern software solutions can streamline data collection, storage, and reporting, thereby improving efficiency and accuracy.

4. The fourth part of the document addresses the challenges associated with data management, such as data quality, security, and privacy. It provides strategies to mitigate these risks and ensure that data is used responsibly and ethically.

5. The fifth part of the document concludes by summarizing the key findings and recommendations. It stresses the importance of ongoing monitoring and evaluation to ensure that data management practices remain effective and aligned with the organization's goals.

6. The sixth part of the document provides a detailed overview of the data collection process, including the identification of data sources, the design of data collection instruments, and the implementation of data collection procedures.

7. The seventh part of the document discusses the various methods used for data analysis, such as descriptive statistics, inferential statistics, and regression analysis. It explains how these methods can be used to interpret data and draw meaningful conclusions.

8. The eighth part of the document focuses on the importance of data visualization in presenting complex information in a clear and concise manner. It discusses various visualization techniques, such as bar charts, line graphs, and pie charts.

9. The ninth part of the document addresses the ethical considerations surrounding data management and analysis. It discusses the need to protect individual privacy and ensure that data is used only for legitimate purposes.

10. The tenth part of the document provides a final summary and concludes the report. It reiterates the key findings and emphasizes the importance of data management in achieving organizational success.

11. The eleventh part of the document discusses the future of data management and analysis, highlighting emerging trends and technologies that will shape the field in the coming years.

12. The twelfth part of the document provides a detailed overview of the data management process, including the selection of data management systems, the implementation of data management procedures, and the ongoing maintenance and optimization of the system.

13. The thirteenth part of the document discusses the various methods used for data management, such as data backup, data recovery, and data archiving. It explains how these methods can be used to ensure the integrity and availability of data.

14. The fourteenth part of the document focuses on the importance of data security in protecting sensitive information from unauthorized access and theft. It discusses various security measures, such as encryption, access control, and firewalls.

15. The fifteenth part of the document provides a final summary and concludes the report. It reiterates the key findings and emphasizes the importance of data management in achieving organizational success.

# 第一章 微波三极管和四极管

## §1.1 概 述

微波三极管和四极管是发展得很早的一类微波器件，它在解决微波信号的产生和放大，开拓电磁波源，推动微波电子学和微波工程的发展过程中起着十分重要的作用，在通信、广播、电视、雷达和空间技术等许多领域中有着非常广泛的应用。

微波三极管和四极管的主要特征是利用静电控制原理来控制交变电子流的大小，这种控制是借助改变控制栅极电压，影响阴极附近的电场来实现的，它的工作原理和普通电子管一样。所以在讨论微波三极管和四极管之前，有必要先介绍一下普通低频电子管的工作原理。

### 1.1-1 真空二极管

二极管是最简单的电子管，它由阴极和阳极构成。当阳极上加有正电压  $V_a$  时，由阴极发射的电子能到达阳极，当阳极上加有负电压时，就没有电子到达阳极，所以二极管具有单向导电的性质，可以用作检波器和整流器。

通常二极管中阴极温度很高，有很强的电子发射，电极空间都是工作于空间电荷限制的过发射状态。阳极电流  $I_a$  主要决定于阳极电压  $V_a$ ，并由查尔得-朗谬-肖特基 (Child-Langmuir-Schottky) 方程 (简称3/2次方定律) 所描述。在平板二极管的情况下，阳极电流密度为

$$J_a = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V_a^{3/2}}{x_{ak}^2} \text{ (安/米}^2\text{)}$$

或

$$I_a = \frac{2.334 \times 10^{-6} A_a V_a^{3/2}}{x_{ak}^2} \text{ (安)} \quad (1.1-1)$$

式中， $A_a$  为阳极面积， $x_{ak}$  为阳极与阴极间的距离。

在空间电荷限制状态下，电极空间的电位、电场、电荷密度和电子速度分布，代表着电子管的运行状态，对研究电子管中各种物理现象关系密切。空间电荷限制下二极管空间的电位、电场、空间电荷密度和电子速度分别为

$$\left. \begin{aligned} V &= V_a \left( \frac{x}{x_{ak}} \right)^{4/3} \\ E &= -\frac{4}{3} E_a \left( \frac{x}{x_{ak}} \right)^{1/3} \\ \rho &= \rho_a \left( \frac{x}{x_{ak}} \right)^{-2/3} \\ v &= v_a \left( \frac{x}{x_{ak}} \right)^{2/3} \end{aligned} \right\} \quad (1.1-2)$$

式中,  $V_a$  为阳极表面电位,  $E_a = (V_a/x_{ak})$  为不考虑空间电荷时阳极表面的电场强度,  $\rho_A = 4e_0V_a/(9x_{ak}^2)$  为阳极表面的电荷密度,  $V_a = \sqrt{2eV_a/m}$  为阳极表面的电子速度。

以上各运行状态的物理量与  $x$  的关系可从图 1.1 中看到。

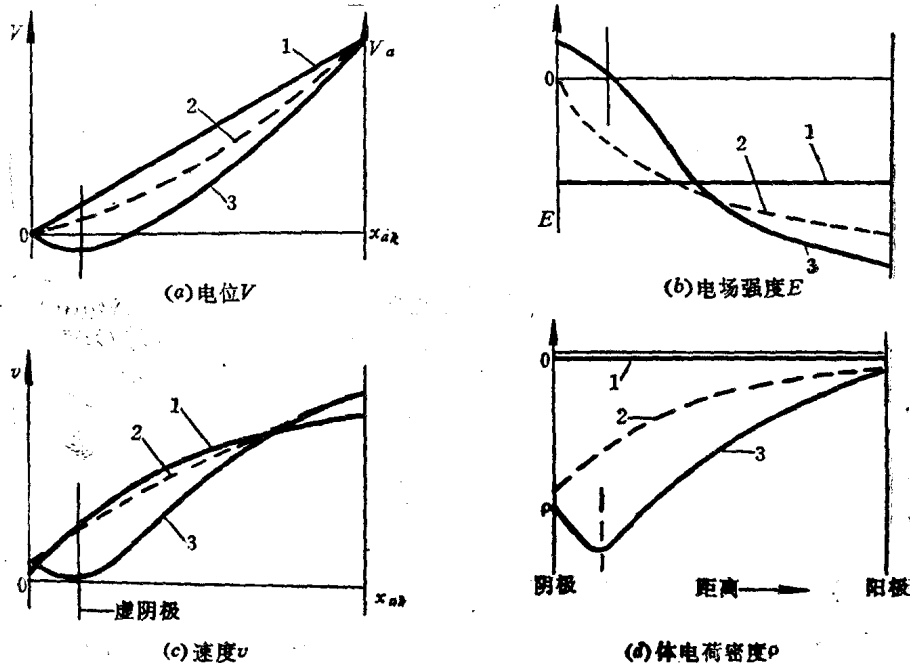


图 1.1 二极管的运行状态

1—无空间电荷; 2—少量空间电荷; 3—过量空间电荷

### 1.1-2 真空三极管

在二极管中, 在一定的阴极温度下, 阳极电流与阳极电压的  $3/2$  次方成正比。阳极电压愈高, 在阴极表面形成的加速电场愈强, 空间电荷的作用就减弱, 阳极电流就愈大, 阳极电流唯一地受阳极电压控制。如果在阴-阳极间加入一个网状电极 (称为栅极), 就构成了三极管。当栅极上加上一个电压  $V_g$  时, 三极管的阳极电流就同时受到两个电压的控制, 即有  $I_a = f(V_g, V_a)$ 。利用图 1.2(a) 所示电路, 可以测得如图 (b) 所示的不同栅极电压下某三极管的伏安 ( $V_a-I_a$ ) 特性曲线。

可见, 当栅极电压一定时, 对应有一条  $V_a-I_a$  曲线。当阳极电压一定时, 栅极电压稍有变化, 阳极电流就有较大的变化, 所以栅极对阳极电流的控制作用要比阳极有效得多。

#### 一、栅极控制原理

栅极对阳极的控制作用是通过栅极电压对阴极表面附近电场的影响来达到的。如果栅极上所加的电位等于自然电位 (不存在栅极时该位置上所处的电位值) 时, 电极间的电位分布并不因栅极的加入而有所改变。当栅极接阴极电位 (即零电位) 时, 栅极附近空间所有各点的电位将比没有栅极时降低很多, 阴-栅平面间的电位差减小, 加速电场减弱, 离开阴极越过栅极到达阳极的电子数亦将减少。当栅极接负电位时, 阴-栅间的加速电场将进一步减弱, 从阴极出发越过栅极到达阳极的流通电流更小。当栅极上的电位很负, 阴-栅间的电场变为拒斥场时, 电流将被截止。假如在栅极上加上高于自然电位的正电位, 那么阴-栅间的加速



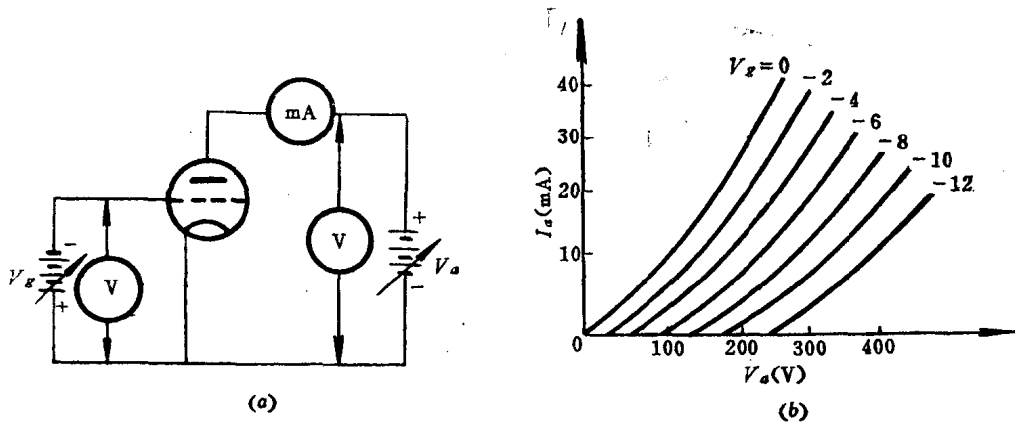


图1.2 三极管的测试

(a) 测量电路; (b) 伏安特性曲线。

电场将加强, 流通电流也随之增加。所以借助于改变栅极电位就可以达到改变阳极电流的目的。

栅极电位控制阳极电流的能力比阳极强而有效, 首先是因为栅极离阴极近, 其次是阳极受到栅极的屏蔽作用, 阳极电位的影响要“渗透”过栅极才能作用到阴极表面。显然, 阳极离阴极愈远, 栅极绕得愈密, 栅丝愈粗, 阳极电位对阴极表面电场的影响就愈小。

## 二、等效二极管原理

栅极电位和阳极电位在阴极表面将产生一个合成电场, 这个合成电场决定阴极发射电流的大小。设想用一个平板电极放在三极管栅极的位置上, 并加上一定的电压, 使其在阴极表面产生的电场与原来三极管阳极和栅极电位在阴极表面所产生的合成电场强度相同, 那么这个电压对阴极表面电场的作用就与阳极和栅极对阴极表面电场所起的作用等效。我们把这个电压称为等效电压, 把这个假想二极管称作三极管的等效二极管。利用等效二极管可以计算三极管中电流的流通规律。

利用静电学原理可求得平板三极管的等效二极管的等效电压为

$$V_d = \frac{V_g + DV_a}{\left[1 + D \left(\frac{x_{ak}}{x_{gk}}\right)^{4/3}\right]} \quad \text{〔伏〕} \quad (1.1-3)$$

式中,  $D = C_{ak}/C_{gk}$  为三极管的静电渗透率, 表示阳极电压对阴极表面静电场的作用比栅极电压的作用的减弱程度,  $C_{ak}$  和  $x_{ak}$  分别为阳极与阴极间的极间电容和极间距离,  $C_{gk}$  和  $x_{gk}$  分别为栅极与阴极间的极间电容和极间距离。因为  $C_{ak} < C_{gk}$ , 故  $D < 1$ 。

## 三、三极管的电流流通定律和静态参量

根据等效二极管原理和等效电压, 可得三极管的阴极电流和阳极电流各为

$$\begin{aligned} I_k &= 2.334 \times 10^{-6} \frac{A_k}{x_{gk}^2} V_d^{3/2} \\ &= 2.334 \times 10^{-6} \frac{A_k}{x_{gk}^2} \frac{(V_g + DV_a)^{3/2}}{\left[1 + D \left(\frac{x_{ak}}{x_{gk}}\right)^{4/3}\right]^{3/2}} \quad \text{〔安〕} \end{aligned} \quad (1.1-4)$$