

WEIBO  
DIANLU

朱 明 等编

# 微波电路

国防科技大学出版社

# 微波电路

朱明等编

国防科技大学出版社

[湘] 新登字 009 号

## 内 容 简 介

本书讨论微波电子器件及其构成的各种微波有源电路。器件以半导体器件为主,微波电真空器件为辅;器件与电路,以介绍微波有源电路为主。

全书共分六章,第一章简介微波电真空器件及其电路,后五章依次讨论微波半导体器件及其构成的微波电路:微波混频器、微波固态振荡器、微波晶体管放大器、变容管电路(变容管上变频器、倍频器等)及微波控制电路。

本书可作为高等工科院校电子技术类各专业的教材和参考书,也可供科研、生产中使用各类微波电子器件和电路的科技人员参考。

## 微 波 电 路

朱 明 何建国 编  
赫崇骏 韩永宁  
责任编辑 胡见堂

开本: 787×1092 1/32 印张: 17 字数: 393 千字

1994年8月第1版第1次印刷 印数1—3000册

ISBN 7-81024-289-X  
TN·18 定价: 14.80元

# 前 言

本书适用于电子类微波、通信、电子工程等专业，作为专业技术基础课教材之用。微波专业计划授课 70 学时，通信和电子工程专业计划授课 40 学时。教材目录中标记“\*”号的内容属后两个专业学生自学内容。

本课程在高频电子线路、微波技术基础等先修课的基础上，进一步阐述微波领域中大量使用的微波固体器件和电真空器件，以及由这些器件组成的各种有源电路和控制电路。绪论中简要介绍了微波电路的用途、特点、现有水平和发展趋势。各章在阐述微波电子器件的结构、工作机理和主要特性参数的基础上，着重介绍了各种微波电路的工作原理、等效电路、主要性能和用途，对其中几种主要电路给出设计方法。为适应微波电路设计新发展的需要，在微波晶体管放大器一章中，简要地介绍了微波电路 CAD。

本书内容共六章。第一章微波电真空器件及其电路，第二章至第六章均为微波固体电路，包括微波混频器、固体振荡器、晶体管放大器、变容管上变频器及倍频器以及微波控制器件及其电路。本书综合并吸取了国内外有关教材的优点，注重当今微波技术发展的动向，引入了一些较为新颖的内容和分析方法。各章之后附有一定数量的习题，以加深对教材的理解。

本书由朱明编写绪论和第一章至第三章，何建国编写第四章，赫崇骏编写第五章，韩永宁编写第六章，朱明统稿。本书完稿后由姚德鑫教授担任主审。在编写过程中，参考并摘录了国内外同类书籍和部分文献中的内容，在此一并致谢。由于编者的理论和实践水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，恳请广大师生和其它读者批评指正。

编 者

1994 年 4 月

# 绪 论

## 一、微波电路及其应用

微波是电磁波频谱中极为重要的一个波段。微波通常是指波长在 1 米到 0.1 毫米（对应频率为  $3 \times 10^8$  到  $3 \times 10^{12}$  赫芝）范围内的电磁波。微波电路是指在这一频率范围内的有源电路。它作为整个微波技术发展的先决条件，而显得十分重要。

微波有源电路主要研究的内容有微波信号的产生、微波信号的放大、信号频率的变换和微波能量的控制等四种类型的电路。

微波信号的产生，包含一般的微波发射源、本振源和测量信号源的中小功率振荡器，也包含应用微波能量场合的大功率振荡器。现阶段，中小功率振荡器多数已采用固体电路，而大功率微波发生器仍是由电真空器件占主导地位。微波信号的放大，包含对微弱信号的低噪声放大，也包含着着眼于微波能量的功率放大器。微波频率变换包含微波上变频器、下变频器、倍频链及检波电路等。微波控制电路包含微波开关、数字移相器、电调衰减器和限幅器等。现阶段除了微波特大功率的产生与放大外，大多是在低电平上进行，都是固体电路完成的。

由微波有源电路和无源电路（完成微波信号传输）组成的微波系统，迄今已在雷达、通信、电子对抗、能束武器等军事领域占有重要位置，微波系统也已深入到现代通信、空间技术、遥感技术、射电天文、工业加热等民用的各个领域。下面通过雷达和通信中微波系统的举例，说明微波电路的应用，以求对本课程有个概貌的了解。

图 1 所示为典型雷达的方框图。虽然现代雷达因用途和体制不同，种类繁多。但是，一部典型雷达大致都是由天线、发射机、接收机和终端四部分组成。其中，发射机和接收机的微波部分以及控制部件中，微波电路占有很大比重，构成了微波系统的核心。

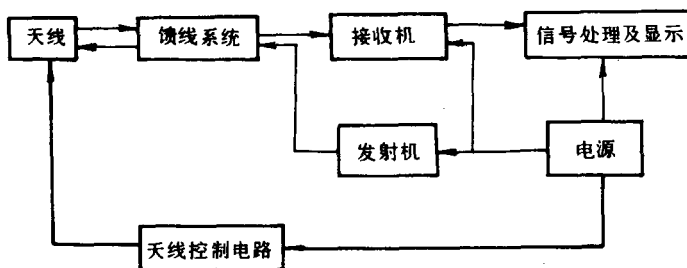


图 1 典型雷达的简化方框图

发射机的功能是产生某一所需功率电平的微波波形。所需功率可直接由功率振荡器（如磁控管或固体振荡器）产生；也可以由射频功率放大器（如行波管、速调管）或放大

链（如固体倍频器）放大已有振荡来产生。而波形则由雷达系统的特定要求来确定：从简单的动目标显示雷达用的未经调制的连续波，到先进雷达用的复杂频率、相位和时间编码调制的波形。接收机的主要功能是接收微弱的微波目标回波信号，并将其放大到可资用的电平，随后将射频包含的信息变换为基带信号。在各种接收机中，超外差接收机因其灵敏度高、增益高、选择性好和多种适用性而倍受青睐，是应用最广的一种。超外差接收机是将微弱的射频回波信号，由低噪声放大器（如晶体管、行波管及变容管参量放大器等）放大后，与本机振荡器（如反射速调管、固体振荡器等）混频，将频率降低为中频，接着对中频信号进行放大和检波。混频器具有很低的变频损耗，使超外差接收机具有极高的灵敏度。中频信号的放大比微波频率信号的放大更为有效和更加稳定，而且由于中频信号占据了较宽的百分比带宽，从而简化了滤波器并提高了选择性。当目标载频变化后，本振频率自动同步变化，可自适应地跟踪发射频率，以保持中频不变。

为更具体说明微波系统涉及的微波电路，试举一部典型单脉冲跟踪雷达的微波系统为例，着重说明微波电路用途和雷达对它们的要求，如图 2 所示。

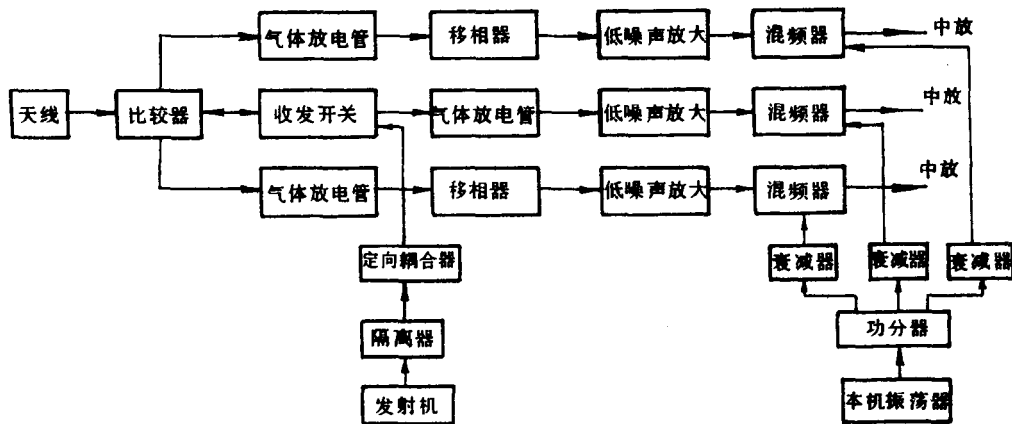


图 2 典型单脉冲跟踪雷达微波系统

一般将发射机输出端到比较器和比较器到混频输出部分称为馈线系统。其中前者为发射支路馈线系统，后者为接收支路馈线系统。馈线系统的基本作用是将发射机输出功率传输到天线，然后将天线接收到的目标反射信号传送到接收机。从雷达要求提高作用距离来看，希望发射功率大和接收机灵敏度高，故要求馈线系统损耗尽量小和各部分反射尽量小。对发射支路还要求承受大功率时不打火。为了提高雷达抗干扰能力，要求各馈线支路工作频带要宽，以便在受到敌方干扰时，迅速切换雷达工作频率到干扰较弱的频率上工作。

发射支路最基本的组成单元是发射机。发射机的基本部件是射频功率源、调制器和电源。其中，射频功率源大体有两种构成型式：一种称为功率振荡器，即振荡器产生一个功率极高的射频信号直接加到天线上，如图 3 (a)；另一种称主振放大式，先由主控振荡器产生一个低功率电平的稳定射频信号，随后用功率放大器放大到高功率电平加到天线上，如图 3 (b)。磁控管和半导体雪崩二极管、体效应管振荡器是经常使用的功率振荡

器；而诸如速调管、行波管和晶体管放大器则通常在需要稳定频率的场合，作为主振放大式发射机的放大器件。

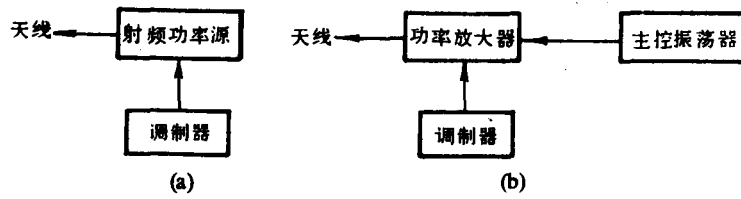


图3 发射机构成的基本形式

在发射支路中，隔离器作用是避免反射波回到发射机影响其输出功率和频率。定向耦合器是把发射机送到天线的功率耦合出很小一部分送到功率或频率指示设备，以监测发射机工作是否正常。此外，在发射支路中还有隐蔽调试和功率程序控制系统及方位、俯仰旋转关节等组成。

在雷达接收支路中，微波系统的组成大致有：

1. 比较电路。目标反射信号通过在比较器中的比较，形成距离信号及方位和俯仰误差信号，并分别送到各自接收支路，以便控制天线，跟踪对准目标。

2. 保护电路。当收发共用一个天线时，为了保护接收机不致被发射机泄漏的功率烧毁，加装一收发开关。发射时，天线只与发射机相通，而与接收机断开；接收时，天线只与接收机相通与发射机断开，以保证有良好的收发隔离。图2所示系统的收发开关是一个铁氧体四端口环行器，发射时输出能量通过它只能到天线；天线接收的射频信号通过它只能到接收机。为了防止发射机功率通过环行器漏到接收机，还在接收支路前加一级气体放电管，当漏过功率达到气体放电程度，放电管被电离而短路，使这部分功率反射回环行器，被负载吸收。

3. 调整电路。因为雷达跟踪精度与三路信号的相位一致性有直接关系，为了保证三路信号相位一致性，所以在两路误差信号通道中连接有可变移相器，进行相位的调整。

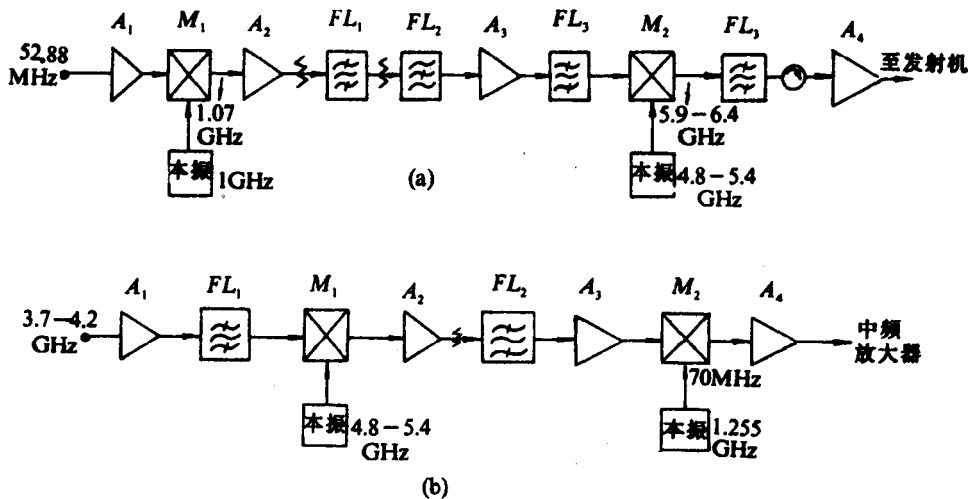
4. 低噪声放大电路。其作用是降低接收机的噪声系数，提高灵敏度。随着隐身技术的广泛使用，对雷达提出了更高的要求、提高接收机灵敏度迫在眉睫，其中，降低接收前端的系统噪声是行之有效的办法之一。所以，设计优良的低噪声放大器成为关键技术。

5. 微波混频电路。在许多场合，由于不具备适当的高频放大器，而现有的混频电路又有极好的性能，许多现代雷达已不采用低噪声放大器，在较高频率上更是如此。输入的射频信号直接与稳定的本振相混频，将频率降为中频，混频后的中频信号立即被放大，构成混频—中放组件。通常作混频用的微波器件是点接触和面结型肖特基势垒二极管。近年来采用砷化镓场效应管混频时，除了具有良好的噪声性能外，最大的特点是具有变频增益。

随着混频器件低噪声性能的大幅度提高，现有混频器的双边带噪声系数在1千兆赫容易做到1~2分贝，在95千兆赫时容易做到5~6分贝。由于减少了复杂程度、降低了成本和减小尺寸，微波混频器已成为最佳的接收前端部件。

6. 本机振荡电路。它是小功率连续波振荡器。为了实现自动频率微调，它应具有良

好的电调谐性能。现代雷达多数已采用固体器件的本振。从 10 千兆赫到 95 千兆赫的雷达频率范围内，体效应振荡器被最广泛地用作本振，取代了老式反射速调管本振。它具有良好的调幅和调频性能，所需 5~10 伏的低直流电压，1~3 安培的小电流，而寿命却比速调管长。在 140 千兆赫以下，用锁相技术可使体效应振荡器作为低噪声部件，用于本振源；在 140 千兆赫以上，与变容管倍频器配合使用，本振频率可高达 300 千兆赫。雪崩二极管是另一种可作本振的固体器件，在频率高达 220 千兆赫以下，都可直接用作主本振源。但由于雪崩器件的噪声性能比体效应器件差得多，本振中的噪声经混频后，降



(a) 上变频组件 (b) 下变频组件

图 4 6/4GHz 卫星通信微波系统方框

为中频噪声使混频器噪声系数增加。因此，使用雪崩二极管时，必须进行良好的滤波或对本振进行锁相，以便将本振噪声对接收机的影响减至最小。

下面我们再列举一 C 波段 6/4GHz 卫星地球站微波收发系统，以进一步熟悉微波电路的应用，其系统方框如图 4 所示。

上变频组件：由调制器送来的 70MHz 已调信号，经中放输出到第一混频器，取本振频率为 1GHz，上变频后为 1.07GHz。输出经 L 波段放大和滤波，以抑制本振和高次谐波，再经放大后送至第二混频器，第二本振采用频率为 4.8~5.4GHz，由此，上变频为 5.925~6.425GHz 信号，再经带通滤波和放大后送至发射机。

图 4 (b) 为下变频组件：由天线和低噪声放大器收来的 3.7~4.2GHz 的射频信号经隔离与平衡放大，输入到带通滤波器，以抑制带外和镜象干扰信号后送到第一混频器，本振频率取 4.8~5.4GHz，差出 1.155GHz 信号，经放大和滤波后送到第二混频器。本振取 1.255GHz，差出通信机中经常使用的 70MHz 中频。

卫星通信已日趋普及，目前，国内已可将微波系统做成体积小、成本低、可靠性高，并使信道设备集成化，与微带电路直接连接，从射频到中放集中于一体。

由以上举例可知，微波电路所研究的四种基本电路类型在上述微波系统中几乎全部



被使用，所占位置举足轻重。随着任何微波系统的开发，必须有相应能满足特定系统要求的微波有源电路，这就要求除了有优良的电子器件外，还需在改进电路设计方面作出重大努力。现今，微波系统朝着更高频率、更宽的频带和更大的功率，以及高效率 and 集成化的方向发展，微波有源器件和电路必须适应这个新的态势得以迅猛发展。

## 二、微波电路的学习方法

微波电路是继高频电子线路和微波技术基础等先修课之后的一门技术基础课。与高频电子线路不同，由于工作频率极高，微波电路大多数采用分布参数电路，并尽量使器件与电路做成一体，结构衔接十分紧凑。这一特点，决定了在分析讨论时，离不开电磁场与波的概念和专门知识。

微波电路涉及电路类型较多，采用电子器件既有半导体又有电真空器件，特点各不相同，分析方法自然各异。所以，在学习中不仅需要微波基础知识，还要求了解半导体及集成电路、电真空技术等方面的知识。

本课程各章内容的相对独立性较大，如果在学习中及时地小结、对比、归纳，无疑会大有裨益。对于课程内容，我们建议以着眼对物理概念、工作原理的理解为主，弄清各种电路的结构特点、工作条件、应用场合和主要优缺点。对主要典型电路要求能掌握设计方法。

# 目 录

## 绪 论

## 第一章 微波电真空器件及其电路

§ 1.1 概述 .....	(1)
§ 1.2 速调管放大器和振荡器 .....	(3)
1.2.1 微波电子学中一些基本概念 .....	(3)
1.2.2 双腔速调管放大器 .....	(7)
1.2.3 多腔速调管放大器 .....	(12)
1.2.4 反射速调管振荡器 .....	(15)
§ 1.3 行波管放大器 .....	(19)
1.3.1 行波管放大器的结构 .....	(20)
1.3.2 行波管放大器工作原理 .....	(22)
1.3.3 行波管的主要特性 .....	(24)
§ 1.4 多腔磁控管振荡器 .....	(26)
1.4.1 多腔磁控管的结构 .....	(27)
1.4.2 电子在静态正交场中的运动 .....	(28)
1.4.3 磁控管中的电子群聚与能量交换 .....	(32)
1.4.4 磁控管振荡器的工作原理 .....	(34)
1.4.5 磁控管工作特性和负载特性 .....	(41)
1.4.6 磁控管的频率调谐 .....	(44)
1.4.7 磁控管振荡器电路和使用维护 .....	(45)
习 题 .....	(47)

## 第二章 微波混频器

§ 2.1 概述 .....	(49)
§ 2.2 肖特基势垒二极管 .....	(50)
§ 2.3 微波混频器的工作原理 .....	(55)
2.3.1 微波混频器工作原理 .....	(55)
2.3.2 微波混频器的主要特性 .....	(59)
§ 2.4 微波混频器的基本电路 .....	(70)
2.4.1 单端混频器 .....	(70)
2.4.2 平衡混频器 .....	(71)
2.4.3 双平衡混频器 .....	(76)
§ 2.5 镜频回收混频器 .....	(80)

2.5.1	滤波器型镜频回收混频器 .....	(80)
2.5.2	平衡式镜频回收混频器 .....	(81)
2.5.3	窄带微波混频器的设计举例 .....	(83)
§ 2.6	宽带微波混频器 .....	(88)
· 2.6.1	宽带巴伦及宽带微波混频器 .....	(88)
· 2.6.2	宽带微波混频器的设计举例 .....	(92)
§ 2.7	微波场效应管混频器 .....	(97)
· 2.7.1	单栅场效应管混频器工作原理 .....	(97)
· 2.7.2	双栅场效应管混频器 .....	(98)
§ 2.8	毫米波混频器简介 .....	(100)
· 2.8.1	简况 .....	(100)
· 2.8.2	毫米波混频器 .....	(102)
	习 题 .....	(108)

### 第三章 微波固体振荡器

§ 3.1	概述 .....	(110)
§ 3.2	微波晶体管振荡器 .....	(111)
3.2.1	简化高频等效电路和振荡电路分析 .....	(111)
3.2.2	晶体管振荡器电路 .....	(114)
· 3.2.3	微波晶体管振荡器的设计举例 .....	(115)
§ 3.3	负阻振荡器的工作原理 .....	(118)
§ 3.4	体效应管振荡器 .....	(121)
3.4.1	砷化镓晶体能带结构和速度—电场特性 .....	(121)
3.4.2	偶极畴 .....	(122)
3.4.3	体效应管伏安特性和等效电路 .....	(123)
· 3.4.4	体效应管的振荡模式 .....	(124)
§ 3.5	雪崩二极管振荡器 .....	(127)
3.5.1	崩越模工作原理 .....	(127)
3.5.2	崩越模二极管等效电路和参数 .....	(129)
3.5.3	崩越模二极管振荡器电路 .....	(131)
3.5.4	俘越模工作原理 .....	(132)
· 3.5.5	俘越模振荡电路模型 .....	(133)
§ 3.6	微波二极管负阻振荡器电路及其频率调谐 .....	(134)
3.6.1	负阻振荡器电路 .....	(134)
3.6.2	负阻振荡器的频率调谐 .....	(135)
§ 3.7	负阻振荡器的频率稳定度 .....	(140)
	习 题 .....	(146)

### 第四章 微波晶体管放大器

§ 4.1	概述 .....	(148)
§ 4.2	微波晶体管的结构及其等效电路 .....	(149)
4.2.1	微波双极晶体管 .....	(149)

4.2.2 微波场效应晶体管	(151)
§ 4.3 微波晶体管的 S 参数	(154)
§ 4.4 微波晶体管放大器的主要性能	(157)
4.4.1 微波晶体管放大器的噪声系数	(157)
4.4.2 微波晶体管放大器的功率增益	(161)
4.4.3 微波晶体管放大器的稳定性	(165)
§ 4.5 小信号微波晶体管放大器的设计	(169)
4.5.1 设计概要	(169)
4.5.2 微波低噪声放大器的设计	(170)
§ 4.6 微波晶体管功率放大器	(175)
4.6.1 微波晶体管功率放大器的特点	(175)
4.6.2 微波晶体管功率放大器的设计	(177)
4.6.3 微波功率晶体管动态阻抗的测量	(179)
4.6.4 功率合成的基本概念	(179)
§ 4.7 微波晶体管放大器的计算机辅助设计	(180)
4.7.1 微波晶体管放大器机辅设计概要	(180)
4.7.2 宽频带晶体管放大器设计的基本原理和步骤	(182)
4.7.3 计算机辅助分析方法的选择及拓扑结构	(183)
§ 4.8 新型微波晶体管及其电路	(187)
4.8.1 双栅场效应晶体管	(187)
4.8.2 高电子迁移率晶体管 (HEMT)	(188)
4.8.3 单片微波集成电路	(190)
习 题	(192)

## 第五章 变容管在微波电路中的应用

§ 5.1 概述	(193)
§ 5.2 变容二极管	(193)
§ 5.3 非线性电容中的能量关系, 门雷—罗威公式	(199)
5.3.1 门雷—罗威公式	(200)
5.3.2 门雷—罗威公式几个具体应用	(200)
§ 5.4 变容管上变频器	(202)
5.4.1 大信号作用下变容管电路非线性分析方法	(202)
5.4.2 输入输出阻抗	(203)
5.4.3 功率和效率	(204)
5.4.4 功率变容管上变频器实际电路及设计概要	(206)
§ 5.5 参量放大器的实际电路	(208)
§ 5.6 变容管倍频器	(209)
5.6.1 变容管倍频器的原理和指标	(210)
5.6.2 功率变容管倍频器	(210)
5.6.3 变容管倍频器举例	(215)
§ 5.7 阶跃恢复二极管倍频器	(216)
5.7.1 阶跃恢复二极管工作原理	(216)

5.7.2	阶跃恢复二极管管芯结构和特征参数	(217)
5.7.3	阶跃恢复二极管倍频器电路原理及分析	(218)
5.7.4	阶跃恢复二极管倍频器设计步骤及电路	(225)
	习 题	(226)

## 第六章 微波半导体控制电路

§ 6.1	概述	(227)
§ 6.2	PIN 管	(227)
6.2.1	PIN 管工作原理	(227)
6.2.2	PIN 管的等效电路和主要参数	(230)
§ 6.3	PIN 管微波开关	(232)
6.3.1	通断式开关	(232)
6.3.2	转接式开关	(238)
6.3.3	开关时间和功率容量	(240)
§ 6.4	PIN 管移相器	(242)
6.4.1	开关线式移相器	(242)
6.4.2	加载线式移相器	(244)
6.4.3	3 分贝定向耦合器式移相器	(247)
6.4.4	四位数字式移相器	(249)
§ 6.5	PIN 管电控衰减器和限幅器	(250)
6.5.1	电控衰减器的一般原理	(250)
6.5.2	几种实用的电控衰减器	(251)
6.5.3	PIN 管限幅器	(254)
	习 题	(255)

参考文献

# 第一章 微波电真空器件及其电路

## § 1.1 概 述

微波领域中的有源器件，可分为两大类：一类是微波电真空器件（以下简称微波管），另一类是微波半导体器件。本章研究的内容是几种主要微波管的工作机理以及由它们构成微波电路的基本工作原理、工作特性和使用中的一些实际问题。除本章外以下各章的内容，均为以半导体器件为核心构成的各种微波电路。

微波管是在电子管基础上，随着工作频率的进一步提高，以雷达、通信、空间技术等应用技术为推动力而逐步发展起来的。本世纪 30 年代末期产生了速调管和磁控管，40 年代中期出现了行波管，以后又相继有返波管和各種正交场振荡、放大管研制出来，到 60 年代微波管的发展已达到高峰。近些年来，世界各国仍然还集中不少人力和财力从事这方面的研究和制作工作，又不断有电子回旋管和偏转调制管等用崭新的原理制成的微波管问世，并展示了微波管朝着毫米波、亚毫米波段、特大功率以及进一步提高电子效率方向发展的趋势。目前，对现有微波管的改进和探索新原理和新技术的科学研究仍十分活跃、并取得很大进展，因此，其它新型微波管的出现和应用，是完全可以预料到的。

自从 40 年代晶体管问世以来，经过 50 多年的发展，半导体器件现今已成为极重要的器件，应用日趋广泛。在低功率振荡和低噪声接收方面，已成功地取代了微波管。但是，由于微波管特有的长处，使它在高频段、大功率发射和一些特定场合仍占有明显的优势。形成了微波管和微波半导体器件可以长期竞相发展、相辅相成、结合使用的局面。

综合这两类器件的性能、大体可以这样评价：微波管的优点是工作频率高、功率大、对环境温度的敏感性小，抗辐射能力强等。其主要缺点是体积大、工作电压高、通常还需要配置笨重的磁场或聚焦系统，不利于小型化和降低成本。与此相反，半导体器件一系列的优点是：体积小重量轻，有利于减轻整机的重量和缩小体积，不需预热启动快，可靠性高、寿命长、耐振动和耐冲击等。但是由于它受材料和尺寸的限制，进一步提高工作频率和承受功率遇到很大困难，这是它突出的缺点。近些年来，两者在进一步发挥各自的优势，改进和克服短处方面已取得很大进展，两者今后共同的主攻目标仍是：进一步提高频率和加大功率，增加工作带宽和提高效率，进一步减轻重量和缩小体积，提高可靠性和延长使用寿命等。

微波管的发展现状与固体器件的比较如图 1.1 所示，图中①、③为脉冲功率，②、④为连续波功率。由图可见，在相同的频率下，微波管的高频功率比固体器件大得多，换句话说，在获得同样输出功率的情况下，微波管的工作频率高得多。

分析表明,无论是微波管还是固体器件,它们的输出功率  $p$  和工作频率  $f$  都基本上满足下列公式给出的关系:

$$\text{当 } f < 30\text{GHz 时}, p \cdot f^2 = \alpha$$

$$\text{当 } f > 30\text{GHz 时}, pf^{3/2} = \beta$$

式中  $\alpha, \beta$  是常数。对于微波管来说,  $\alpha, \beta$  值均比半导体器件大  $10^3 - 10^6$  倍。单从功率方面看,微波管比半导体器件大约高出  $10^6$  倍,功率大于瓦级水平的器件仍是微波管。

微波管按电子运动和能量交换的特点形成了两大分支:线性注管(O型管)和正交场管(M型管)。O型管名称来源于法文TPO(意为为行波管),速调管和行波管等微波管属于此列。电子注从阴极发射直至打到收集极为止,在相互作用空间内电子运动轨迹基本上是直线的,故称线性注管。O型管大多采用了与电子注同轴的直流磁场,以使电子注沿长度方向行进时能聚焦在一起,其慢波系统使电子沿长度漂进时产生群聚,感应出强烈的高频场,形成高频输出功率。

M型管的名称也来源于法文TPOM(意为磁控行波管)。它也靠电子注与高频场相互作用,进行能量交换来获得微波振荡或放大。其特点是直流电场与直流磁场的方向相互垂直,二者又都与电子注方向垂直,故这类器件又称为正交场微波管,磁控管、泊管、前向波管等均属此列。

微波管的种类很多,常用微波管的分类列于表1.1中。微波管的合理选用直接影响到系统和整机的性能。微波管与前后部件之间的最佳匹配也是一项十分重要的工作。

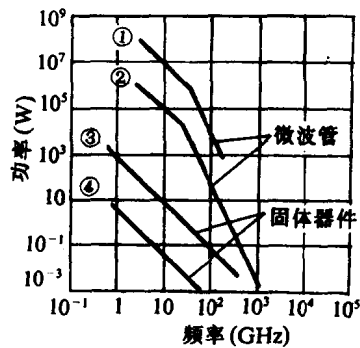


图 1.1 微波管与半导体器件频率和功率比较曲线

表 1.1 微波电子管分类简表

微波管	线性注管	振荡型	速调管	反射速调管
			多腔速调管	
	返波管			
	放大型	行波管	低噪声行波管	
功率行波管				
正交场管	振荡型	分布发射式	机械调谐磁控管	
			旋转调谐磁控管	
	同轴型磁控管			
	反同轴型磁控管			
注入式—电压调谐磁控管				
放大型	前向波管	正交场放大管		
		磁控行波管		
	毕码管			
	反向波管	泊管		
M型返波放大管				
卡码管				

## § 1.2 速调管放大器和振荡器

速调管顾名思义是电子速度受调制的器件。它的基本物理过程先是利用高频交变电场来控制等速运动的电子流，使其速度发生变化，从原来密度均匀的电子流，在空间渡越过程中变成密度有疏密变化的周期性电子流，最后利用密度调制的电子流和交变电场相互作用，电子流交出能量，达到增强高频电场的目的。

速调管从形式上分为直射式和反射式两种；直射速调管又分双腔速调管和多腔速调管。双腔速调管因其性能不佳，已无多大实用价值，但用它作为原理分析，从中引出一些重要概念，进而分析多腔速调管是较为合适的。

大功率多腔速调管作为高功率、高增益和高效率的微波功率放大器件，在粒子加速器、可控热核聚变、等离子体加热、空间微波输电系统、能束武器和工业加热等应用微波能量的场合占主导地位。在导航、气象雷达、电视广播等窄带应用场合，和在雷达、通信系统中的宽带应用场合，都是大功率速调管最主要的应用领域。例如采用速调管发射机的雷达，工作频率范围覆盖了整个微波波段。超大功率速调管的峰值功率电平为兆瓦~几十兆瓦量级，其平均功率为几千瓦~几十千瓦。增益为30~50分贝，效率为30~40%，瞬时带宽为7~10%。现今和未来大功率速调管的技术进展和发展趋势表现在：①正在发展多注速调管，以展宽工作频带，进一步降低工作电压和重量。②展宽瞬时工作带宽，最重要的是发展重叠模工作的双间隙耦合腔的分布作用速调管，在MW级功率电平上已获得10%的带宽。③在高频段上实现高功率。为了在10~16GHz的频段，获得单管输出功率达100~1000MW，需要解决高发射电流密度的阴极，输出间隙的击穿等一系列技术难题。④进一步减小体积重量，重点是解决高质量永磁聚焦系统等。

反射式速调管只能作小功率振荡器，通常作为本振源和小功率微波源，应用也相当广泛。

为了便于理解速调管及其它微波管的工作原理，本小节从介绍电子流与高频电场相互作用（包括高频电场对电流的调制作用，和电子流对高频电场的反作用两个方面）中的基本问题——感应电流原理和能量交换原理入手。

### 1.2.1 微波电子学中的一些基本概念

#### 一、感应电流原理

在低频中，外电路里流动的瞬时电流等于落在电极上的电子流，如果管内没有电子落在电极上，外电路中的电流就等于零。但这是低频电子学的概念，在微波频率时就完全不适用了，取而代之的是感应电流概念。用感应电流概念说明电子在管内运动和管外电流之间的关系，表达了事物的内在规律和本质，从而可确切地解释微波电真空器件的物理过程和工作原理。我们首先研究自由电荷在平板真空间隙中运动时所发生的物理现象。

设有一平板二极管，有电荷 $-q$ 从阴极向阳极运动。由于静电感应，在阴极 $K$ 和阳极 $A$ 上均因感应而产生正电荷。显然整个系统的电荷量应等于零，即



$$q_a + q_k - q = 0 \quad (1-1)$$

式中,  $q_a, q_k$  分别是阳极和阴极上感应的电荷。

在电荷  $-q$  向阳极飞行时, 阳极上感应电荷  $q_a$  逐渐增多, 而阴极上感应电荷  $q_k$  逐渐减少, 如图 1.2 所示。当  $-q$  电荷到达阳极时, 正电荷全部集中到阳极上并与负电荷中和。由此可见, 在极间电荷行进的过程中, 电极上感应的正电荷数值在变化, 所以电极及外电路里就有电流了。实际上是电极上感应电荷变化所引起的。一旦负电荷撞上阳极, 外电路里的电流反而终止了。之所以我们有低频时那样, 电子打到电极上才有电流的概念, 那是认为电子运动速度极快, 极间距离很短, 忽略了感应电流而引起的。在微波波段, 由于电极距离与波长可以比拟, 感应电流概念就不容忽视了。

下面继续分析平板电极间有一薄层电子飞行时所引起的感应电流, 推导出常用的感应电流表达式。设平板二极管在外加直流电压的作用下, 电场间产生稳定的电场  $E$ 。阴极和阳极上分别有电荷  $-Q$  和  $+Q$ 。在电极间离阴极为  $x$  处有一薄层电

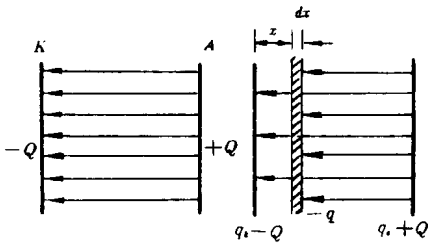


图 1.3 电极间无电荷和有电荷时的电场

荷  $-q$ 。由于静电感应, 阴极上总电荷为  $-Q + q_k$ ; 阳极上总电荷为  $+Q + q_a$ , 电荷两边的电场也就相应地发生变化。如图 1.3 所示。

设电荷层左边的电场强度为  $E_1$ ; 右边场强为  $E_2$ , 由于外加电压不变, 因而有下列关系:

$$E_1 x + E_2 (d - x) = Ed \quad (1-2)$$

式中,  $d$  是极间的距离。如设  $s$  为电极的面积,  $\epsilon_0$  为介质常数时, 根据高斯定律有

$$-Q = -s\epsilon_0 E \quad (1-3)$$

$$-Q + q_k = -s\epsilon_0 E_1 \quad (1-4)$$

$$+Q + q_a = s\epsilon_0 E_2 \quad (1-5)$$

由 (1-1) - (1-5) 式可解得电极上的感应电荷为

$$q_k = q \left(1 - \frac{x}{d}\right) \quad (1-6)$$

$$q_a = q \frac{x}{d} \quad (1-7)$$

在某一瞬时, 阴极和阳极上的总电荷是

$$Q_k = -Q + q \frac{d-x}{d} \quad (1-8)$$

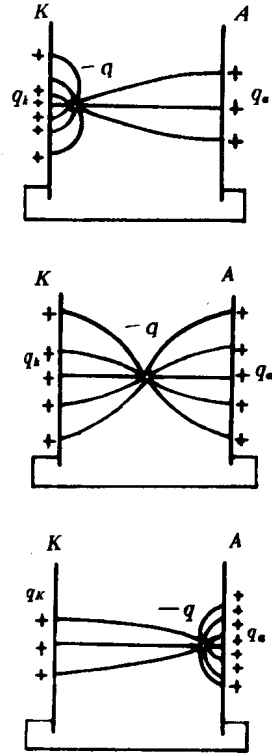


图 1.2 电荷运动时电极上感应电荷的变化