

第3章

无线电力传输技术

3.1 引言

正如第2章所述,基于麦克斯韦方程组、天线理论和基于高频的电磁理论及耦合理论,能量是可以通过无线电波来传输的。另外,需要高效频率转换器将直流电或者50/60Hz的交流电转换为高频,来进行无线电力传输。与此相反的是,需要高效整流器将高频转换为直流电或者50/60Hz的交流电。

特别对微波电力传输(MPT)而言,使用半导体和微波管的高功率放大器(high-power amplifiers, HPAs)经常被用作功率放大器和微波发生器。总体而言,使用半导体和微波管的高功率放大器的特性如下所述。

(1) 使用半导体(砷化镓,氮化镓等)的高功率放大器用作微波电力传输(如图3.1(a)所示):

- 具有较低的功率(使用砷化镓半导体功率小于几十瓦特,使用氮化镓半导体功率小于几百瓦特);
- 具有较低的电压需求(使用砷化镓半导体电压小于5V,使用氮化镓半导体电压小于50V);
- 效率特性(在2GHz带宽下,效率小于80%;在5GHz带宽下,效率小于70%);
- 具有较小的尺寸(使用了单片微波集成电路(monolithic microwave integrated circuit, MMIC)技术,因此减小了体积);
- 价格昂贵(取决于大批量生产);
- 适用于相控阵(具有较低的功率和较小的体积)。

(2) 用于微波电力传输的微波电子管(如磁控管、速调管、行波管(traveling wave tube, TWT)等,如图3.1(b)所示):

- 具有更高的功率(大于 1000W);
- 具有更高的电压需求(需求大于几十千伏);
- 效率特性(在 2GHz 带宽下,效率小于 80%);
- 具有更大的尺寸(需要真空的条件);
- 价格便宜(如使用电磁炉型磁控管);
- 不适用于相控阵(由于抑制栅瓣需要较高的功率和较大的体积)。

使用半导体的微波管和高功率放大器的功率和频率特性如图 3.2 所示。

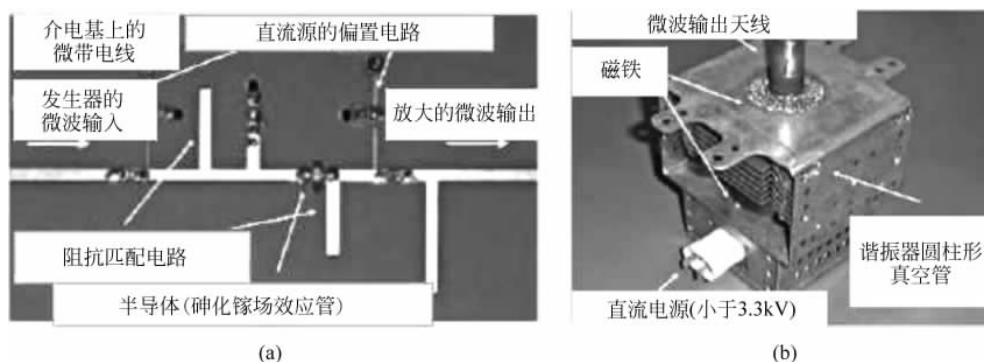


图 3.1 (a) 使用半导体的高功率放大器电路(砷化镓场效应管);
(b) 微波电力传输的电磁炉型磁控管(微波管)

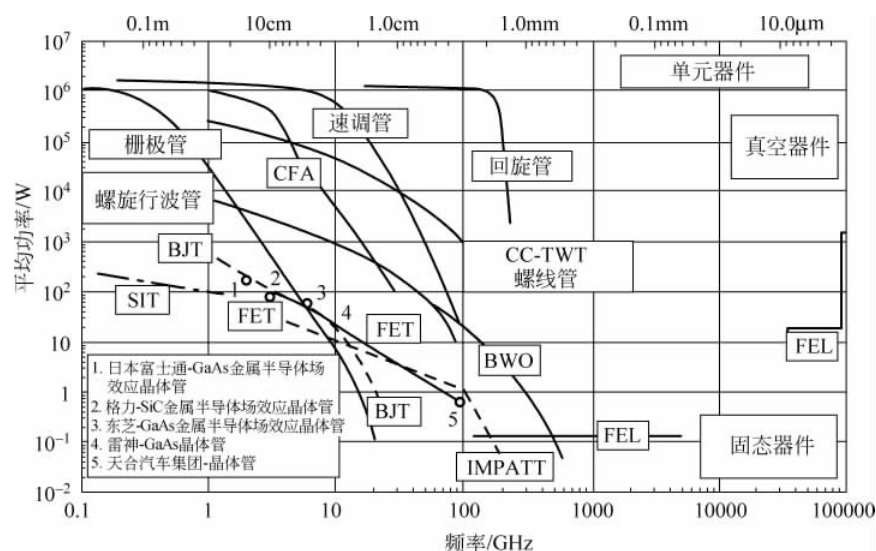


图 3.2 不同频率下各种微波管和半导体射频平均功率输出 [TRE 02]

在 20 世纪 60 年代,由于微波管的效率高于半导体 HPAs,因此微波管经常被用于微波电力传输。近年来,半导体 HPAs 的效率得到了较大的提升,所以半导体 HPAs 有时也会用在相控阵的微波电力传输实验中。微波管仍用于点对点的或者短距离的没有任何波束成形的微波电力传输实验中。由于电磁炉式(cooker-type)磁控管具有低成本的特点,所以仍然被经常使用。依据系统的设计和目的,从而可以决定是使用微波管还是半导体 HPAs。在电感耦合和谐振耦合无线电力传输(WPT)系统中,一直使用的是半导体频率转换器。特别是在低频率时的反相电路中使用。

整流电路是无线电力传输中另外一个重要的系统。在室内或者是工业应用中,电子产品经常需要频率为 50/60Hz 的交流电,有时候需要使用直流电。因此,无线电力传输系统必须能将千赫到千兆赫范围内的高频转换为直流电或者 50/60Hz 的交流电。但从高频转换到 50/60Hz 的交流电还是相当困难的。因此,在无线电力传输系统中,经常直接使用将高频转换为直流的整流器,在这种整流器中经常使用半导体二极管。在微波电力传输系统中,接收系统包含天线和整流器,也就是整流天线。

3.2 射频的生成——使用半导体高功率放大器

在 20 世纪 80 年代以后,特别是晶体管取代了微波管,半导体设备在微波领域占据了主导地位。引起这种改变原因是移动电话网络的发展。由于半导体设备的易管理性和能够被大量生产的特性,半导体设备被用来扩展微波技术的应用,这种扩展的微波应用包括相控阵和有源集成天线。20 世纪 90 年代以后,日本做了一些使用半导体 HPAs 的相控阵微波电力传输实验。

微波电路中典型的晶体管设备是场效应晶体管(field effect transistor,FET)、异质结双极性晶体管(heterojunction bipolar transistor,HBT)和高电子迁移率晶体管(high electron mobility transistor,HEMT)。现在半导体设备用的频率在几千兆赫以下的材料是硅,在更高的频率下的材料则是砷化镓。最近,氮化镓和碳化硅有望应用于微波电路中。氮化镓和碳化硅被用于宽带隙半导体,与砷化镓半导体一样可以适应高功率和高频率。在微波频率范围内常常使用氮化镓,低频的转换电路中则用的是碳化硅。新型的氮化镓高功率放大器的输出电压与频率的特性如图 3.3 所示。

微波电路是由这些半导体器件构成的。通过使用半导体器件的微波电路来控制相位和幅度是非常简单的,电路中包括放大器、移相器、调制器等。从电路设计理论层面上来说微波放大器决定了效率和增益。通过微波放大器中的偏置电压的

不同,微波放大器被分为 A、B、C 类微波放大器。图 3.4(a)中的放大器电路和 A、B、C 类放大器是等效的。这些不同类的放大器同样适用于千赫兹到兆赫兹系统。

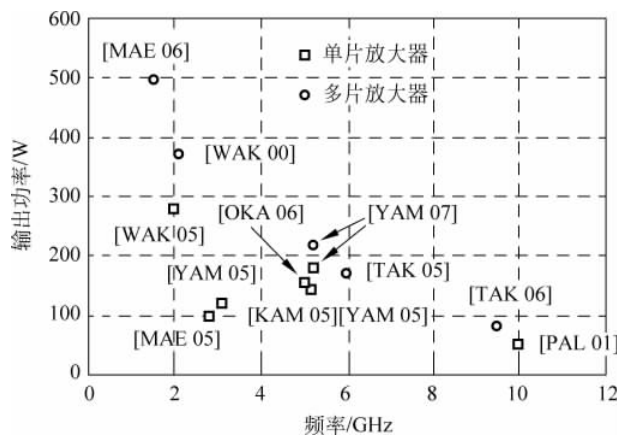


图 3.3 氮化镓高功率放大器的输出电压与频率的特性

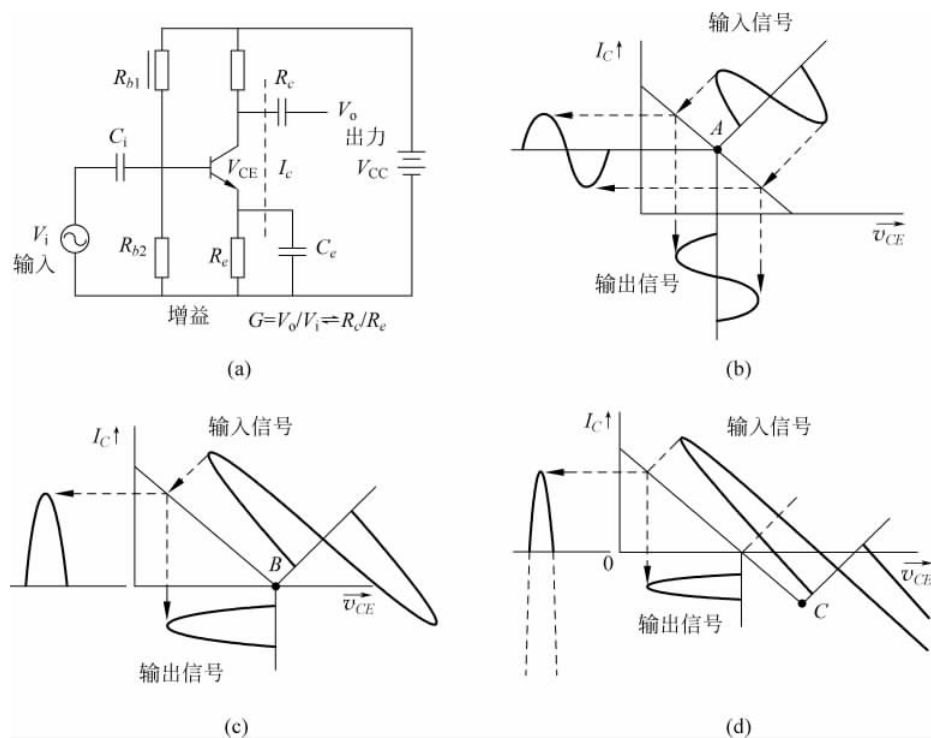


图 3.4 A 类放大器, B 类放大器和 C 类放大器

(a) 电路; (b) A 类放大器工作点; (c) B 类放大器工作点; (d) C 类放大器工作点

唯一的区别就是不同半导体工作点的电压和电流值会有不同。A类放大器的理论效率是50%，B类放大器的理论效率是78.5%，C类放大器的理论效率接近100%。B类放大器和C类放大器的理论效率都高于A类放大器的理论效率，但是波形已经失真，不再是线性放大了。对于C类放大器，当效率接近100%时，输出功率接近零。所以可以得到的结论是B类放大器和C类放大器设备不能用于线性度要求高的无线通信系统中。

对于工作在微波频率上的D类、E类、F类和逆F类放大器，通过使用高次谐波可以提高效率，使其理论上接近100%。F类放大器^[TYL 58, COL 99]和逆F类^[COL 99]放大器有望在微波电力传输系统中被用作高效率放大器。如图3.5所示，在B类放大器中的输出端添加了能够控制高次谐波的特殊阻抗匹配电路和晶体管^[HON 11]。在B类放大器偏置电路中漏极电流变成半波整流波形和高次谐波。漏极电流 $I_d(t)$ 经过傅里叶(Fourier)变换得到以下的方程式

$$I_d(t) = \frac{I_{\max}}{\pi} + \frac{I_{\max}}{2} \cos \omega t + \frac{2I_{\max}}{2\pi} \cos 2\omega t + \frac{2I_{\max}}{15\pi} \cos 4\omega t + \cdots + \frac{2I_{\max}}{(1-n^2)\pi} \cos \frac{n\pi}{2} \cos n\omega t \quad (3.1)$$

$$V_d(t) = V_{DC} - V_1 \cos \omega t + V_3 \cos 3\omega t + V_5 \cos 5\omega t + \cdots \quad (3.2)$$

其中, $n=2, 4, 6, \cdots$ 。

当漏极电压 $V_d(t)$ 由直流和基础频率 f_0 组成时，谐波的功率消耗接近于零，在基础频率处的功率因子是-1。其中 f_0 的相位与漏极电流的基础频率和奇次谐波的相位相差180°。这意味着如果 V_1 可以通过频率 f_0 处阻抗匹配电路和调整偏置电压来优化时，直流功率理论上能100%转换到 f_0 。式(3.1)和式(3.2)的关系如图3.5所示。

理论上最大效率和电压以及电流的谐波数量如表3.1所示。增加谐波的数量对更高的效率来说是十分的重要。一个B类放大器的理论效率是78.5%。我们应该注意到如果要想实现一个完美的半波整流波形则需要无限多的偶次谐波。

表 3.1 谐波和效率的关系^[HON 11]

无穷	f_0	$3f_0$	$5f_0$	无穷
f_0	50% (A类)	57.7%	60.3%	60.7%
$2f_0$	70.7% (实际B类)	81.7%	85.3%	90.3%
$4f_0$	75.0%	86.6%	90.5%	95.5%
无穷	78.5% (理想B类)	90.7%	94.8%	100%

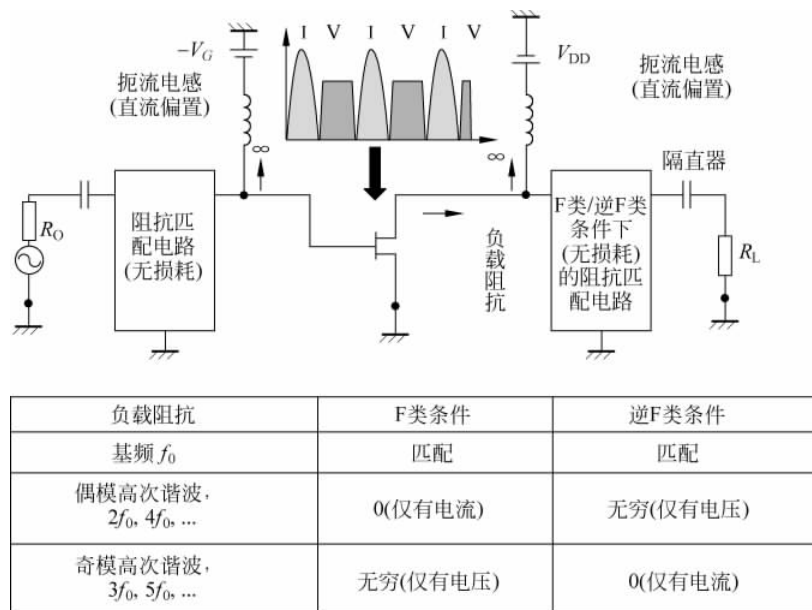
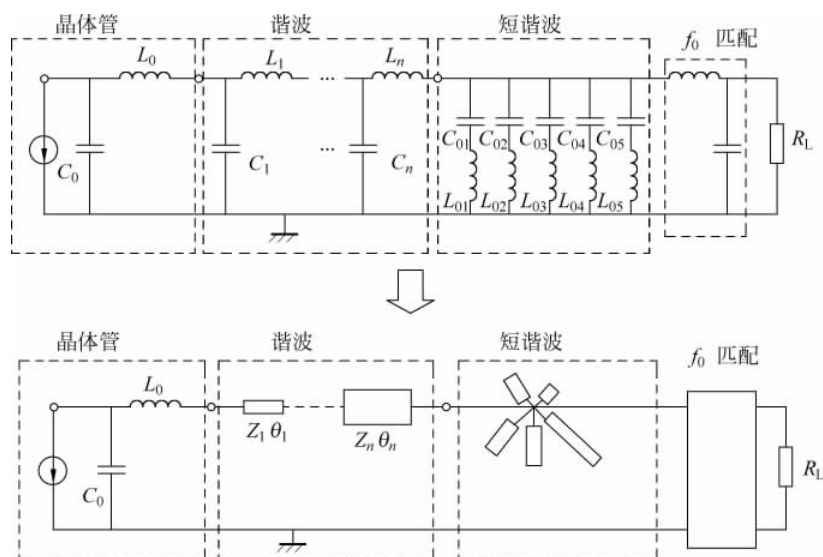
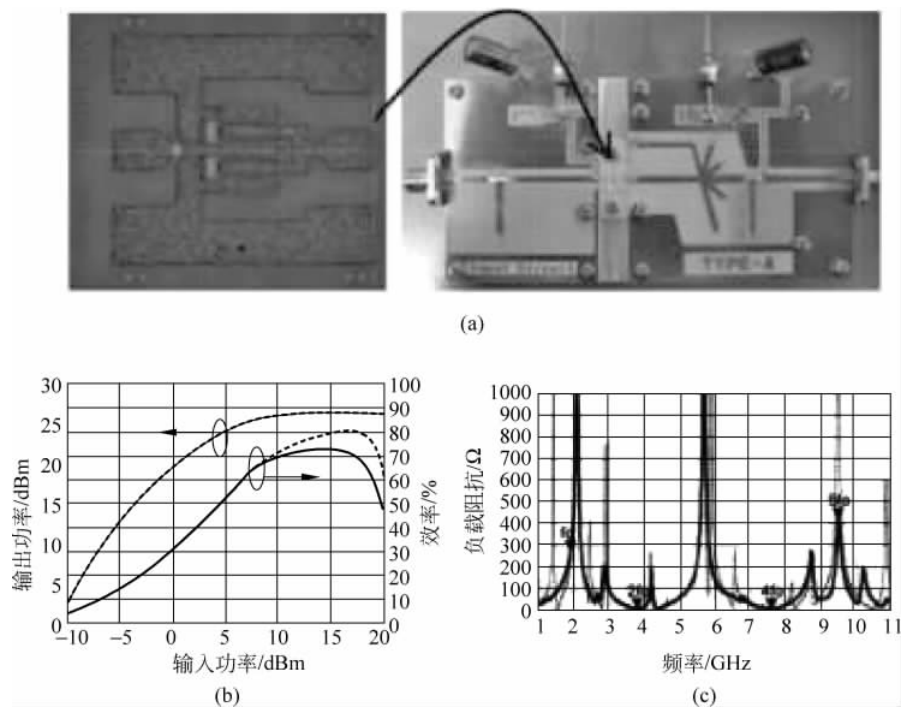


图 3.5 F 类和逆 F 类放大器^[HON 11]

设计可用于控制高次谐波的阻抗匹配电路是十分困难的。利用分布式线路的方法来设计 F 类放大器是十分方便的,如图 3.6 所示,一些 F 类放大器已经在微波电力传输方面开始应用了。在图 3.7 中描述了一个利用氮化镓 HEMT 且工作在频率为 1.9GHz 的 F 类放大器^[ZHE 07]。此 F 类放大器的漏极效率是 80.1%,功率附加效率定义为: $(PAE) = (P_{out} - P_{in}) / P_{DC}$,在频率为 1.9GHz 时,功率附加效率取得最大值为 72.6%。如图 3.8 所示,同一个研究小组研制出的另一种放大器是使用氮化铝镓或者氮化镓 HEMT 并且工作频率为 5.65GHz 上的 F 类放大器^[KAM 11]。此 F 类放大器的漏极效率是 90.7%,功率附加效率最大值为 79.5%,饱和功率是 33.3dBm。

由于用于微波电力传输的功率电平比无线通信系统的功率电平高很多,因此对于微波电力传输中半导体放大器的另外一个要求就是要利用放大器的线性特性。另外,我们必须抑制非期望的寄生辐射,以此来减少干扰。而且最大效率经常在饱和偏置电压点出现。这并不能保证输入微波和输出微波之间的线性关系,因为输入微波和输出微波之间的非线性将导致很大的寄生辐射,所以寄生辐射在微波电力传输中是必须被抑制的。因此,效率和线性特性之间的扭曲关系在微波电力传输中是不希望存在的。F 类放大器或者逆 F 类放大器适合微波电力传输应用的原因之一就是因为使用谐波来增加了效率。


 图 3.6 利用分布式线路的 F 类放大器^[HON 11]

 图 3.7 日本电子信息通信大学 (Univ. of Electro-Communication) 研制的利用氮化镓 HEMT 并且工作频率为 1.9GHz 的 F 类放大器^[ZHE 07]

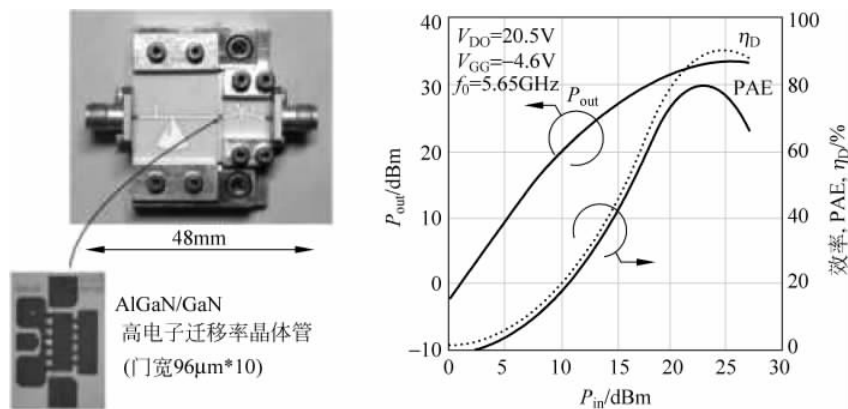


图 3.8 日本电子信息通信大学研制的使用氮化铝镓或者氮化镓 HEMT 并且工作在 5.65GHz 上的 F 类放大器^[KAM 11]

3.3 射频生成——微波管

一些微波生成器或者放大器正在被使用,如磁控管、速调管、行波管或者行波管放大器(traveling wave tube amplifier, TWT)。微波管常主要用于烹饪、等离子体加热和卫星通信等。自从 20 世纪 60 年代以来,微波管开始用于微波电力传输中。

3.3.1 磁控管

磁控管是一个正交场电子管,正交场 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 迫使电子从阴极发射,经过螺旋路径到达阳极。磁控管是一个阳极有共振射频结构的自激振荡设备。在图 3.9 中描述了磁控管的结构和磁控管中的微波生成原理。磁控管中的微波生成效率在理论上应该是非常高的。磁控管中使用高电压,并且将飞入真空中的电子用作微波源。磁控管的频率只通过共振腔的形状来调谐。商业磁控管的效率如图 3.10 所示。

1912 年被 A. W. Hull 发明后,磁控管已经拥有很长的历史了。1928 年 K. Okabe 提出了分离阳极型磁控管后,磁控管的实用性和效率才引起了世界的关注。磁控管技术在第二次世界大战中得到了极大的发展,特别是日本军方的磁控管技术发展迅速。1945 年,美国雷神公司(Raytheon)的 P. L. Spencer 偶然发现磁控管发射的微波能够融化他口袋中的巧克力,雷神公司也因此得到了微波炉方面的专利,并从 1952 年开始生产微波炉。在这之后,磁控管主要用于微波炉的生产。

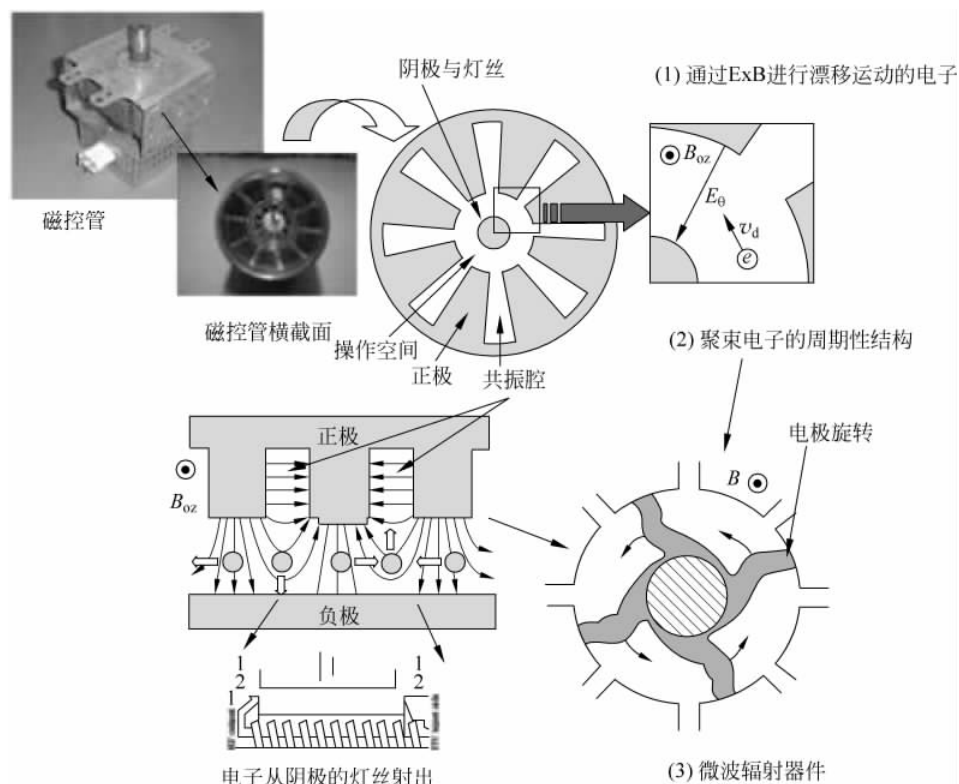


图 3.9 磁控管的结构和磁控管中的微波生成原理

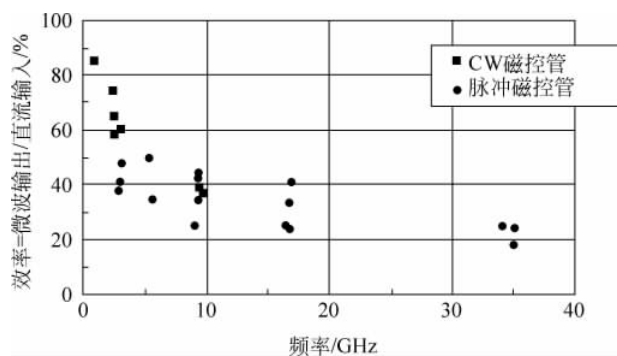


图 3.10 磁控管的效率

功率为 500~1000W 的磁控管被广泛用于工作在 2.45GHz 频率下的微波炉中,并且是相当便宜的振荡器(低于 5 美元)。磁控管主要用金属框架和磁铁生产,因此造价很低。用于微波炉的磁控管的全球净容量是每年 45.5GW,微波炉的产

量为每年 5000~5500 万台。磁控管具有和微波炉一样的历史。在第二次世界大战不久后,第一个使用磁控管的微波炉在美国售价超过 2000 美元,近似于现在的 20000 美元。在 20 世纪 60 年代,日本在降低微波炉的造价上扮演了一个重要的角色,美国量产磁控管的单价为 300 美元,而日本仅需 25 美元。1970 年,美国制造商以每台 300 美元到 400 美元的价格销售了 40000 台微波炉。于是,1971 年日本开始研制造价 100 美元到 200 美元的低成本系统。在接下来的 15 年,微波炉销量大大增加了,1975 年销量接近一百万台,在 1985 年则增加到接近 1000 万台,这些售出的微波炉基本上都是由日本制造的。然而,历史是如此地相似,韩国和中国制造的微波炉在降低造价的同时,可靠性也有保证。在图 3.11 中,展示了半导体放大器和磁控管在 2012 年的市场价格对比。从图中可以发现,磁控管比半导体放大器要便宜得多。

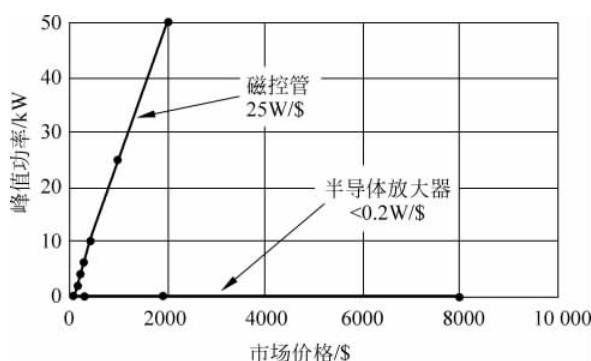


图 3.11 半导体和磁控管市场价格对比

尽管磁控管比半导体放大器要便宜得多,基于目前最新的研究,我们知道电磁炉式磁控管的输出微波谱取决于直流电源和线电流^[KAM 05]的稳定性。如果将一个稳定的直流电源用于磁控管,并且在磁控管稳定振荡后释放灯丝电流,可以获得相当稳定、纯净的频谱(包括低频和高频),并且可以将这些频谱应用到微波电力传输中(如图 3.12 所示)。具有稳定的直流电源磁控管 Q 因子近似为 1.1×10^5 ,高次谐波的峰值低于 -60dBc,其他寄生辐射的峰值低于 -100dBc。

尽管寄生辐射被抑制了,然而由于磁控管发热和相位或者/频率控制可能造成的频率偏移的问题仍然存在。在 20 世纪 60 年代,Brown 教授改进了磁控管的技术,并且研制出磁控管放大器^[BRO 81, BRO 89],磁控管放大器的频率和相位是稳定的、可控的。对于磁控管放大器,Brown 教授采用注入锁定和磁场的反馈环,进一步提出了磁控管放大器在微波电力传输和太阳能发电卫星的应用。

通过操作磁控管作为一个反射放大器^[SIV 94]来实现注入锁定,可以使用半导体微波生成器^[YOR 98, STE 87]用于相控阵中,产生的影响可以通过阿德勒(R. Adlery)等