

国防电子情报研究课题

DB: BFQ90 -914

CC:

序号: 3

毫米波真空电子器件在军事上 的应用及其发展前景

机电部电真空专业情报网

1991.1

毫米波真空电子器件在军事上 的应用及其发展前景

所图书馆

目 录

1. 引言	(1)
2. 真空电子器件毫米波源的技术水平及进展	(3)
2.1 概述	(3)
2.2 毫米波速调管	(4)
2.2.1 毫米波反射速调管	(4)
2.2.2 毫米波减速场振荡器	(4)
2.2.3 毫米波多腔速调管	(6)
2.3 毫米波正交场器件	(7)
2.3.1 概况	(7)
2.3.2 毫米波磁控管	(8)
2.3.3 毫米波正交场放大管	(10)
2.4 毫米波行波管	(12)
2.4.1 毫米波螺旋线行波管	(12)
2.4.2 毫米波耦合腔行波管	(19)
2.5 毫米波返波管	(22)
2.6 回旋管	(23)
2.6.1 概述	(23)
2.6.2 国外回旋管研究动态	(24)
a. 回旋振荡器	(24)
b. 回旋速调管放大器	(25)
c. 回旋自振脉塞	(25)
d. 卡斯波管	(26)
2.6.3 我国回旋管研究概况	(27)
2.7 扩展互作用器件(EIO、EIA)	(27)
2.7.1 概述	(27)
2.7.2 国外扩展互作用器件研究动态	(28)
2.7.3 我国扩展互作用器件研制动态	(30)
2.8 奥罗管(Orotron)	(31)
2.9 自由电子激光器(FEL)	(32)

3. 毫米波真空电子器件在军事装备上的应用	(35)
3.1 在雷达中的应用	(36)
3.2 在通信系统中的应用	(39)
3.2.1 在毫米波卫星通信中的应用	(40)
3.2.2 在保密通信中的应用	(41)
3.3 在电子对抗系统中的应用	(41)
3.4 在定向能束武器方面的应用	(42)
4. 毫米波的发展前景	(43)
4.1 与毫米波器件紧密相关的毫米波技术研究及应用中需进一步解决的关键问题	(43)
4.2 毫米波真空电子器件研究重点方面	(44)
5. 对我国发展毫米波真空电子器件的建议	(45)

毫米波真空电子器件在军事上的应用及其发展前景

摘要:本研究报告论述毫米波真空电子器件的世界水平与突破性进展及其在雷达、通信、制导与电子对抗等现代军用电子装备中的应用后,展望九十年代发展趋势,并根据现代军用电子装备的要求,提出开发我国毫米波真空电子器件的建议。

1、引言

1.1 毫米波

所谓毫米波,是指波长在 10mm—1mm 之间的电磁波谱,相应的频率范围是 30—300GHz,在图 1-1 电磁波波谱图中,它是介于微波与红外的那一段。1976 年美国 IEEE 规定毫米波的频率范围是 10—300GHz。毫米波还可细分为若个频段,并用英文字母代表,表 1-1 列出毫米波的频率段符号。

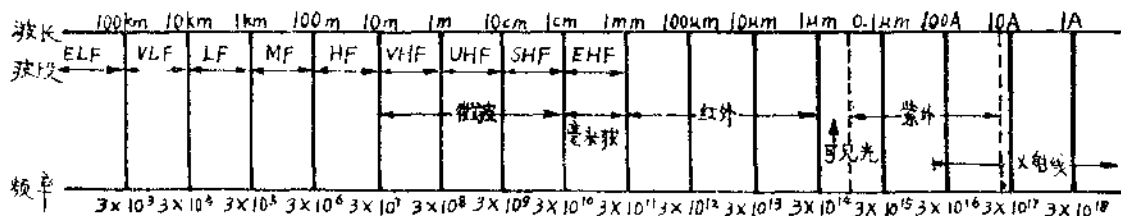


图 1-1 电磁波波谱

图 1-2 是毫米波在大气中传播的衰减特性。图中,曲线 A 代表在海平面沿水平传播时的值,曲线 B 代表在 4KM 高空沿水平传播时的值。图中曲线的高峰代表大气中氧气和水蒸气强烈吸收而引起的衰减;而低谷代表吸收衰减极的频段,称大气窗口。这些窗口的衰减随频率升高成单调增大排列。但所有的窗口和高峰都有相当宽的平坦部分,即具有相当宽的工作频带。毫米波衰减特性还受到雨、雪、云、雾等的影响。

在传播路径方面,毫米波的直射性比微波强而比红外差,绕射性则比红外强而比微波差。

表 1-1 毫米波频段符号

雷达频段符号		英国频段符号		美军军用符号(旧)		美军军用符号(新)	
符 号	频率范围 (GHz)	符号	频率范围 (GHz)	符号	频率范围 (GHz)	符号	频率范围 (GHz)
K	18—26.5	K	18—27	K	10.9—36	K	20—40
K _s	26.5—40	Q	27—40	K _s	33—36	L	40—60
毫米波段	>40	O	40—70	Q	36—46	M	60—100
		V	50—75	V	45—56	N	100—200
		毫米波段	>75	W	56—100	O	200—300
				毫米波段	>100		

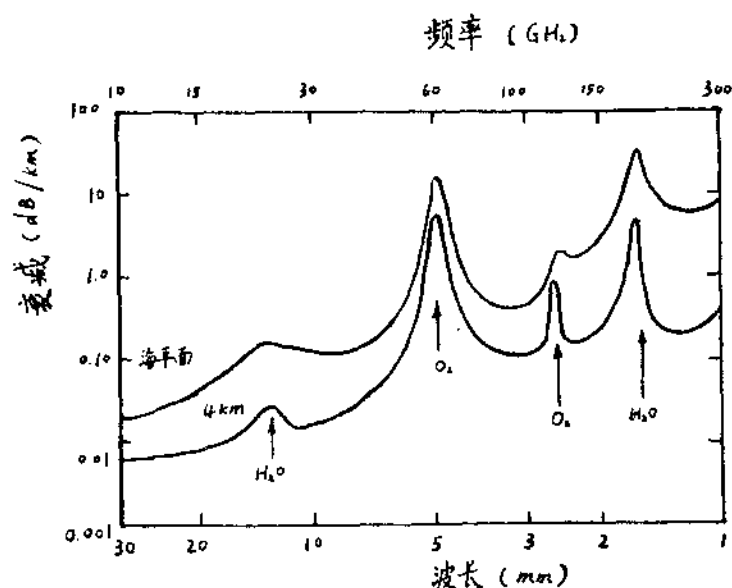


图 1-2 毫米波在大气中传播的衰减特性

A: 在海平面, 温度 $t=20^{\circ}\text{C}$, 大气压 $P=101325\text{Pa}$, 水蒸气密度 $\rho=7.5\times 10^{-3}\text{kg/m}^3$

B: 4KM 高空, 温度 $t=0^{\circ}\text{C}$, 水蒸气密度 $\rho=1\times 10^{-3}\text{kg/m}^3$

1.2 毫米波的优缺点

毫米波波段具有波长较短, 工作频带宽, 与大气成份有选择性的相互作用, 使其在应用中呈现出一系列的优点和缺点。

毫米波的优点

1. 波长较短产生的优点

- a. 使另部件尺寸缩小,系统结构紧凑;
- b. 在相同尺寸的天线之下可产生更窄的波束宽度。

2. 工作频宽产生的优点

- a. 可提高信息传输速率;
- b. 可利用宽带频谱能力来抑制多径效应和杂乱回波;
- c. 有大量频率可供使用,能有效地消除相互干扰;
- d. 提高雷达的距离分辨力,增加辐射计的灵敏度;
- e. 提高对低速运动或振动物体的探测和识别能力。

3. 与大气环境有选择性相互作用产生的优点

- a. 在大气窗口里,毫米波的衰减低于红外和光波;
- b. 在烟雾灰尘和战场污染环境,毫米波的衰减也比红外和光波低;
- c. 具有穿越等离子体构成的黑障区的能力和反隐身潜力。

毫米波的缺点

1. 波长较短产生的缺点

- a. 另部件尺寸小,制造精度要求严,成本随之提高;
- b. 太窄的波束宽度不利于对目标的搜索和探测;
- c. 尺寸较小的天线在接收时截获较少的能量,因此降低了灵敏度;
- d. 过大的多卜勒频移有可能跑到接收机频带之外,引起动目标的丢失。

2. 与大气环境相互作用产生的缺点

- a. 由于大气衰减,毫米波通信距离一般只有 10—20KM;
- b. 在恶劣的气候下,作用距离明显缩短;
- c. 雨的后向散射严重,容易把目标淹没;
- d. 对树叶植皮的渗透度浅,这对遥感不利。

对于毫米波的这些优、缺点,我们应辩证地看待它们。对于毫米波的用户来说,除了上述这些技术性能方面的优缺点之外,尚要考虑诸如信号源、元器件以及价格等因素。

毫米波是一个宽广而优良的电磁波波段,随着近几毫米波的信号源、元器件和测量仪器的不断发展和完善,其应用场合,特别在军用装备中也越来越开拓扩大。自七十年代以来,美国用于开发毫米波技术的投资逐年增加,1985 年的研究经费已达 1970 年的 20 倍。而毫米波技术市场的销售额每年以 30—40% 的速率增长。美国商务部在对 21 世纪的高技术预测中,毫米波技术将广泛用于战场侦察、低空超低空精密跟踪、空中引导头、通信、成像和等离子体加热等领域。

2. 真空电子器件毫米波源的技术水平及进展

2.1 概述

毫米波波段中,目前同时并存着真空电子器件和固态功率源两种毫米波源,但固态源的功率电平比真空电子器件低得多,效率也较低,散热困难。现代的技术已能研制出毫米波段内任何频率的功率源。

毫米波真空电子器件可分为慢波型器件和快波型器件两大类。慢波型器件包括正交场

放大管、速调管、磁控管、行波管和返波振荡器等,它们大多由早期的微波(厘米波)波段相应器件缩小而成。快波型器件包括回旋管(Gyrottron)、尤皮管(Ubitron)、莱达管(Ledatron)和潘宁管(Peniotron)等,它们出现得较晚。在毫米波高频段,慢波型器件由于尺寸很小而限制了输出功率,加工制造也困难。快波型器件仍在演变发展之中,由于有很高相互作用阻抗和很快的渡越时间,因此,快波型器件可以获得比慢波型器件高得多的功率电平。目前输出功率最大的毫米波源是回旋管。图2-1表示目前毫米波真空电子器件功率源所达到的最大输出功率。

据 Frost&Sullivan 咨询公司专家们统计,美国 1985 年毫米波元器件的销售额比 1980 年增加 5 倍左右。目前传统的慢波型器件仍占主导地位,1990 年毫米波真空电子器件销售中,慢波型真空电子器件占 95.4%,快波型器件仅占 4.6%。

2.2 毫米波速调管

速调管是最早用来产生毫米波功率的管型之一,其中以双腔速调管和反射速调管最为通用。近年来人们的主要兴趣集中在扩展互作用器件(EIO、EIA)与减速场振荡器(RFO)。

2.2.1 毫米波反射速调管

反射速调管可以一直工作到 220GHz,但再高的频率就困难了。反射速调管遇到的难点在于高频段。对于毫米波高频段,腔体的尺寸和电子束的截面积均要缩小,功率密度的增加引起功率耗散的增加。同时阴极也难于发射高密度的电子束,聚焦也困难。由于尺寸变小,间隙栅网阻挡的电流相应也多了,小栅网不利于散热。新的设想是采用无栅网间隙,同时提高电极电压。目前国外生产的毫米波反射速调管有 203 个型号,复盖频率为 30GHz—220GHz,再高的频率就难以达到了。表 2-1 为典型毫米波反射速调管的性能。

2.2.2 毫米波减速场振荡器(RFO)

减速场振荡器与反射速调管不同之处是其反射极构成谐振腔壁的一部分。因电子束并不需要在反向运动后重新穿过小窗孔进入腔隙,从而克服了反射速调管电子束空间电荷互相排斥而引起的电流下降。使得小窗孔无栅网的管子能在低电压情况下工作。然而在结构方面,减速场振荡器要比反射速调管复杂一些,其结构如图 2-2 所示。因为它没有截然分开的群聚区、漂移区与互作用区,所以漂移时间也较短。表 2-2 列出了目前实验性毫米波减速场振荡器的技术水平。但这些管子尚不能工作于毫米波高频段主要障碍是高频谐振腔损耗大,易受电压击穿以及与腔负载之间的去耦困难。

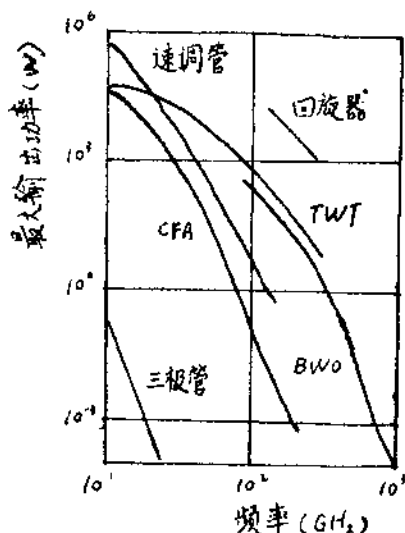


图 2-1 真空电子器件功率源最大输出功率与频率的关系。

表 2-1 典型毫米波反射速调管的性能

管型	复盖频率(GH.)	输出功率(mW)	机调范围	电调范围(MH.)
VA322	26.5—40	20—700	±240MH.	140MH.
V104	50—80	350	2GH.	200MH.
VRT-2123A	110—142	50	8GH.	200MH.
VRV-2131A	170—220	10	2GH.	100MH.
KA-1750	172—178	10		
VRT-2122B15	168—170	50		
VRT-2411A	110—140	1W		

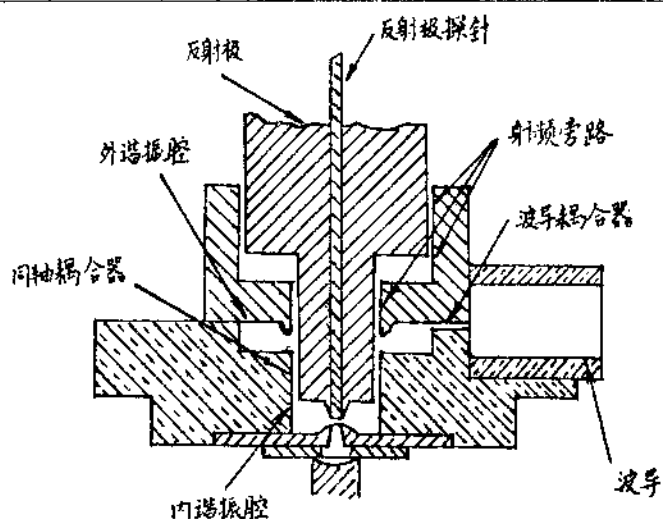


图 2-2 毫米波减速场振荡器剖面图

表 2-2 实验性毫米波减速场振荡器的目前技术水平

调谐范围 (mm)	反射极电压 (V)	反射极电流 (mA)	输出功率(mW)	
			最大	最小
7.7—14	800	55	300	30
5.8—6.8	300	13	3	0
	400	18	10	0
	500	30	25	0
	800	65	175	20
5.0—6.4	800	65	150	30
4.3—5.2	800	65	5	2

2.2.3 毫米波多腔速调管

近几年,由于扩展互作用器件(EIO,EIA)迅速发展并成功地各种军用电子装备中的应用,而毫米波多腔速调管的进展缓慢。目前国外仅在 Ka 波段有少量的毫米波多腔速调管。表 2-3 列出毫米波多腔速调管的性能。

据 1988 年 IEDM 报导,Varian 公司采用计算机设计毫米波多腔速调管,认为毫米波多腔速调管的功率容量可达:

- 峰值功率 250KW,50%的效率;
- 峰值功率 3KW,340MHz 的带宽;
- 平均功率可超过 2KW。

Varian 公司已研制出 250KW 的试验管与 3KW 的定型管,VKA-7852 为 3KW 的六腔毫米波速调管。他们把毫米波速调管与 X 波段速调管性能参数及电子束参数进行比较。表 2-4 与表 2-5 分别对 VKA-7852 型毫米波速调管与 X 波段速调管的性能参数和电子束参数进行比较。

表 2-3 毫米波多腔速调管性能

管型	频率 (GHz)	功率	工作比	电子注电 压 (KV)	电子注电 流 (A)	增益 (dB)	效率 (%)	结构
VKA7852	32	$P=3KW$ $=500W$		14	1		20%	六腔
VKA-7852B	33-36	$P=2.5KW$	0.01			47		六腔
LD4406	27.55-30.05	500W	1.0	12	550m	43		六腔
VA-531	26.5-33	1.5W	1.0	1.3	80m			双腔
VA-531A	31-	200mW	1.0	1.47	80m			双腔
QKK-1554	26-36	1.0KW		12	1	50		五腔
VA-928A	26-36	1.0KW		12	1	50		五腔
QKK-1486	31.5	35W	500m	13	130m			双腔
VKA-7010	26.5-40	7W	1.0	3.5	120m			双腔
VA-534	33-40	1.5W	1.0	1.55	80m			双腔
VA-535	40-44	1W	1.0	1.42	80m			双腔

表 2-4 VKA-7852 型管与 X 波段速调管性能参数

参数	VKA-7852 型管	X 波段速调管
峰值功率	3.0KW	3.0KW
平均功率	500W	3.0KW
效率	20%	35%
带宽	0.3%	1%

表 2-5 VKA-7852 型管与 X 波段速调管电子束参数

参 数	VKA-7852 型管	X 波段速调管
注电压	14KV	9.1KV
注电流	1.1A	0.95A
注直径	0.002in	0.0062in
注流密度	450A/cm ²	70A/cm ²
注功率密度	6MW/cm ²	0.6MW/cm ²
聚焦磁场	7500 高斯	3000 高斯
磁隙缝	1 英寸	2 英寸
管体电流 (无激励/RF 激励)	10mA/19mA	10mA/30mA

从两表中性能参数的比较可以看出,它们的参数有很大差别,这主要是由于 $M^2(R/Q)$ 的下降与横截面冷却面所致。

毫米波多腔速调管由于电压高、体积大、冷却困难,逐渐被扩散互作用器件取代。

参 考 文 献

1. P. Bhartia and I. J. Bahl "Millimeter Wave Engineering and Application" 1984
2. A. Nordquist and B. Roach "Proformance Capability of Ka Band Klystrons." IEDM., P. 370-373, 1988.
3. Microwave Tube DATA Book 1987

2.3 毫米波正交场器件

2.3.1 概况

正交场毫米波器件虽不能用于毫米波高频端,但 95 千兆赫以下的频段仍得到广泛应用。目前常用的正交场毫米波源有:磁控管、同轴磁控管、正交场放大管以及反同轴磁控管。

毫米波正交场真空电子器件,在大功率、宽频带、高效率、抗辐射等方面仍占有优势。虽然毫米波同轴磁控管、反同轴磁控管、正交场放大管都已研制成功,但大功率发射机的功率源仍以普通脉冲磁控管为主,特别磁控管在快速宽频带调谐技术上的突破,适宜反干扰战术性能的要求,因而常用于军事战术武器装备中。表 2-6 综合给出了有特色的这种产品的典型参数水平。

表 2-6 典型毫米波正交场器件的参数水平

品种	型号	中心频率 (GHz)	功率输出 (KW)	频率 (GHz)		工作比	阳极电压 (KV)	阳极电流 (A)	调谐方式	重量 (lb)	制造厂家
				最小	最大						
脉冲磁控管	L4564	33	50	32.85	33.15	0.001	18	13	MT	9.5	利顿
	L4064A	34.85	125	34.7	35.0	0.001	21	30	FF	9	利顿
	MG5302	35	46	34.85	35.15	0.001	15	15	MT	3.63	EEV
	BL246A	70.5	10	68	71.5	0.0005	14	9	FF	4.5	瓦里安
	DX423	95	8	93	97	0.0002	10	30	MT	7.5	安培
同轴磁控管 捷变频→	8902	32.6	75	32.1	33.1	18	10	MT	10	利顿	EEV
	QKH1663	32.6	70	32.1	33.1	18	8.6	MT	13	雷声	
	L4547	70	10	68	72	13	10	MT	9	利顿	
	MG5311	35	50	34.5	35.5	0.004	14.5				
反同轴磁控管 捷变频→	8682	33.2	50	32.9	33.5	0.0005	19	10	MT	17.5	瓦里安
	SFD332	33.2	50	32.9	33.5	0.0005	19	10	MT	17.5	瓦里安
	VMA1043	34.5	56	34	35	0.00065	16	20	DT	9.2	瓦里安
	(该管用于捷变频雷达中,功率为 45KW,带宽为 300MHz,工作比为 0.0006)										
正交场放大管	QKS1998	33	40	31	35	10.06	(增益,10dB)		BB	180	雷声

注:1. 资料来源: MICROWAVE TUBE D. A. T. A Book 1987

1988 年 EEV 公司产品目录, 瓦里安公司和雷声公司产品目录。

2. MT—机械调谐 FF—固定频率 DT—颤抖调谐 BB—宽频带

2.3.2 毫米波磁控管

随着空间技术, 武器装备和通信等方面的技术发展需要, 国外对毫米波技术的应用研究已达到成熟阶段。研制了许多利用毫米波磁控管作为功率源的毫米波雷达, 特别搜索跟踪火控雷达、制导雷达等。同时对磁控管这类大功率源提出了越来越高的要求, 而且仍不放松进行性能改进和开发新品的研究工作。

目前, 毫米波磁控管的水平为: 上产品目录的管型有 33 个或更多。工作频率: 33~95.1 个兆赫。峰值功率电平为: 35 千兆赫下为 125 千瓦, 70 千兆赫下为 10 千瓦, 95 千兆赫下为 8 千瓦, 140 千兆赫下为 1 千瓦。效率约为 10%, 典型的工作比为 0.002~0.001。常用的磁控管谐振腔有两种结构形式: 异腔或孔槽型和异腔式扇形(见图 2-3)

同轴磁控管的商业产品有 6 个以上。其目前水平是: 在 32.6 千兆赫下, 峰值功率为 75 千瓦; 70 千兆赫下为 10 千瓦, 其中 MG5311 在工作频率 35 千兆赫下输出功率达 50 千瓦, 用于频率捷变雷达。

毫米波反同轴磁控管, 80 年以前只研制出实验性样管, 现上产品目录的有 3 个, 都是瓦里安公司制造的 Ka 波段产品, 功率电平达到 56 千瓦, 工作比为 0.00065, 频带为 1 千兆赫。

其中 VMA1043 在工作频率 34.5 千兆赫下输出功率可达到 45 千瓦,用于捷变频雷达,调谐带宽为 300 兆赫。

在毫米波段 F,磁控管的制造存在三个严重的技术问题:一个是磁控管存在多个高频振荡模式,要想获得所需要振荡模式的波形纯度是较困难的。影响模式选择的主要因素是管子设计恰当与否;以及应用中施加于管子的电压上升速率,它与脉冲的形状及波动有关,在管子和调制器之间往往起着决定性作用。再次是阴极尺寸小,电流密度大,其结果必然易导致管子打火,寿命缩短。第三是制造手段存在困难,因为随着频率的增高,结构尺寸小,而对腔体的尺寸提出了更为苛刻的精度要求,因此,对加工、装配和成本都带来困难。

诚然,毫米波磁控管目前来说还不是一个很活跃的应用管种,但国外政府和厂商还以极大的兴趣来发展这一门类产品,并装备了一些尖端武器装备。国外研制进展及方向可归纳为:

(1)、开发新品种。对毫米波真空电子器件总的要求是向大功率宽频带方向发展。国外非常注意在现有产品的基础上。围绕提高功率和拓宽频带而研制派生产品。如英国 EEV 公司 Ka 波段有 12 个产品,其中 3 个是新开发的,还新研制了三个 W 波段产品;美国安培电子公司(Ampere Electronic CO.)已研制出 95 千兆赫输出功率达 10 千瓦的管子;瓦里安公司集中力量研制出商品反同轴磁控管,并应用于捷变频雷达。

(2)、模式控制和散热技术的研究

模式控制——已运用的技术有:对各种模式进行场分布测绘,以识别之;改进隙缝模吸收器,如采用分割环吸收器,在盖板端部合适位置开槽或加销子、叶片,以切断 TE_{121} 高次模电流线。

散热——关键是内腔散热,可采用低膨胀系数的材料、复合材料,以确保频率稳定。

(3)、调谐技术的改进研究

国外业已采用的旋转调谐、颤抖调谐、精调技术已达到较为成熟水平。陆海空频率捷变频雷达大量投入使用,在过去十年中,瓦里安公司采用捷变频同轴磁控管对四十多部主要雷达进行了改装,预计这些雷达可再服役二十年。Ka 波段的调谐带宽可做到 500 兆赫。

在 1985 年伦敦召开的 IEE 会议上,又提出了三种调谐磁控管的新方法^[1],即微步进电机法,PIN 二极管法和电子二次倍增放电法。以满足在宽频带内迅速调谐磁控管及本地振荡器自频控(AFC)的微调技术要求。特别指出的是,PEAB 公司的微步进电动机调谐技术,改

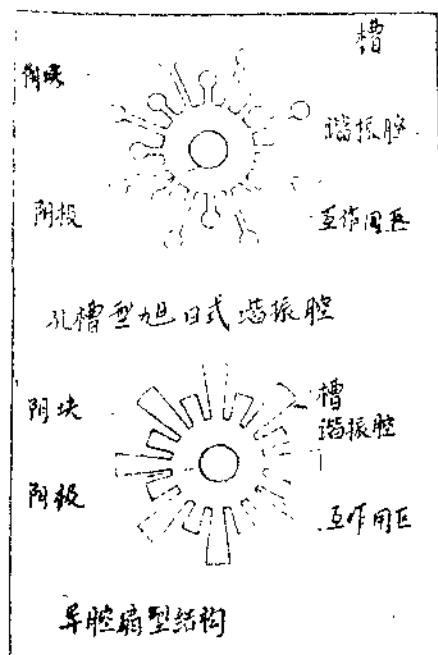


图 2—3 磁控管谐振腔结构

变了普通步进电机的整步分辨率还不能满足用户要求的被动局面,并使该公司在旋转频捷调谐技术方面保持了最好水平。

(4)、袖珍式磁控管。改进结构设计,采用轻重量磁钢,使其体积和重量大大降低,英国 EEV 公司的 Ka 和 W 波段管子,15 个品种采用钐钴磁钢的有 8 个,如 MG5302 的重量为 1.63 公斤,比相类似产品减少了 1.6 倍。

(5)、精密加工技术研究

毫米波雷达的小型天线的有关硬件。必须要求特殊的机械公差(例如 0.01 毫米),真空电子管的关键零件的公差更严,一般为 0.001—0.005 毫米。机械加工、组装的困难是八十年代以前阻碍轻型精密武器大量生产的关键原因之一。迄今,精密加工技术有了突破:各种自动化数控机床使用,采用电子束光刻技术,磁控管的阳块加工采用化学研磨加工叶片(Chemically milled laminations)。在 1982 年国际微波管会议上,发表了两项新技术⁽¹⁾:①、在数控机床上,用激光干涉仪给金刚石车刀和工件定位,精度达 ± 0.0009 毫米。②、零件设计时,更便于冲压和抛光制造,可提高工效和光洁度。

(6)、阴极的改进研究。磁控管固有的缺陷是打火和跳模,这就对研制长寿命、耐电子轰击、发射电流密度大的阴极提出了更苛刻的要求。另外,为适应装备瞬息启动应用的要求,对阴极要求快速启动,主要手段是:研制新阴极、组合式阴极(冷阴极和热阴极组合体结构)、涂复式阴极(敷钨、钨、钽)、长寿命灯丝、提高管内洁净真空度等。

(7)、相应的调制器制造技术。当磁控管工作在窄脉冲时,使用所谓的“熄火脉冲”调制器技术⁽²⁾。采用一个缓慢上升的电压脉冲,而在相应管子工作点的顶部迭加一个窄脉冲,从而使管子振荡在合适模式上。

(8)可靠性研究。国外不但注重好的设计和合理的生产过程,而且加强质量检验系统的管理,以及正确使用方法的指导和人员培训。对可靠性设计尤为关注,普遍采用计算机辅助设计、制造和工程管理(CAD、CAM、CAE),以改进设计和控制制造水平,更有利器件可靠性水平的提高。

2.3.3 毫米波正交场放大管

正交场放大管(CFA)分为重入式电子注正交场放大管和注入式电子注正交场放大管两大类。前者是在磁控管的技术基础上发展起来的,圆形结构。而后者类似于行波管,长形结构。由于 CFA 兼有磁控管和行波管的主要优点:大功率、宽频带、高效率、小尺寸、低电压、脉内相位稳定性好,特别适用于轻型移动式装备和机载系统。例如:相控阵雷达、导航、动目标显示系统、电子对抗的末级发射管,这类器件是优选管种,对相参放大链雷达尤为合适。美国的 AN/TPS-211, AN/SPY-1 和法国的 TRS-2100、TRS-2215、TRS-2230 都是随机变频的捷变频雷达,采用正交场放大管作发射管(C 波段等长波段管种)。“爱国者”导弹就是 C 波段正交场放大管体制。

正交场放大管具有大功率、宽频带的独特优点。到目前为止,毫米波正交场放大管只有雷声公司生产了一种商品管型,其参数水平是:在 33 千兆赫下,峰值功率为 40 千瓦,增益 10 分贝,瞬时频率域为 4 千兆赫。

国外对正交场放大管的技术研究花了四十年之久的时间。主要研究工作是:

(1)、探索性能优良的新型慢波结构。如平面型慢波线、交绕棒慢波线、曲折线等,并采用加载式结构。

(2)、大发射密度阴极,冷阴极材料,理想层流的M型电子枪的研究。

(3)、散热技术的研究。因为这种管子可以达到数兆瓦的功率电平,散热是一个关键技术问题。国外采用热导管,蒸发冷却方式,冷却液直接通过空心慢波线杆进行冷却,以及研制冷却液加压系统

(4)、阴极激励正交场放大管。正交场放大管的致命缺陷是增益低(6~20分贝)和寄生噪声大(S/N为-30~-60分贝/兆赫),与行波管相比,其生命力受到限制。为此,雷声公司近年来特别把精力放在低噪声放大管的研制上,开发了阴极激励正交场放大管,以及开发毫米波器件,以适应新型导弹探测器系统应用。⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 雷

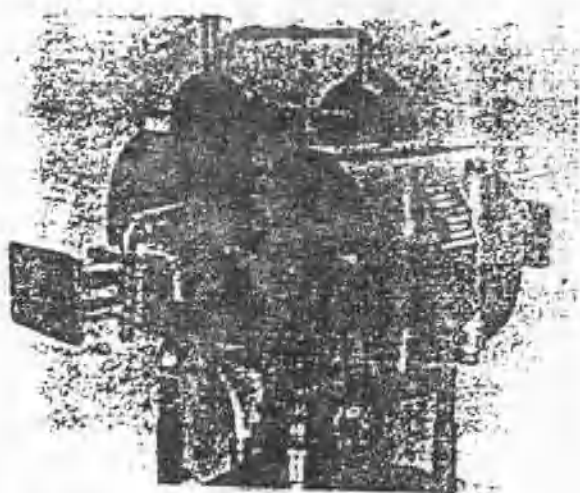


图 2-3 低噪声阴极激励正交场放大管

声公司近期研制成功的一个S波段阴极激励正交场放大管的参数为:在脉宽30微秒、工作比为0.01F,可给出1.25兆瓦的功率,增益达到30分贝,效率约为69%,信噪比达到-75分贝/兆赫。图2-4示出了这种管子的照片。同样,毫米波器件也可应用这种技术,只是处理好阴极慢波线注入信号的高压绝缘等微细技术问题,阴极慢波线和阳极慢波线的色散特性匹配问题。

毫米波正交场放大管的研制工作,特别系统设计和应用研究,国外公开文献报导不多。雷声公司才于最近发表了Ka波段40千瓦的一个管子QKS1988。毋庸置疑,随着研制这种管子的关键技术的突破,新的军事武器装备肯定会采用正交场放大管体制的,犹如“爱国者”导弹采用C波段正交场放大链体制一样。

参 考 文 献

- 1、“调谐磁控管的三种新方法”《火控雷达技术》第4期1985
- 2、叶鲁等“1982年国际微波管会议微波管进展评述”《电子管技术》第2期1984年
- 3、“大功率毫米波雷达发射机”《现代雷达》第3期1981年周立东译自《Microwave Journal》August 1980
- 4、Robert K. Parker,“Radio-Frequency(RF) Vacuum Electronics a Resurgent Technology for Tomorrow”《Millimeter Wave Technology N and Radio Frequency power soarses》,Vol. 791, May 1987

- 5、G. H. Macmaster: "Cathode-Driven Crossed-Field Amplifier" 《Millimeter Wave Technology and Radio Frequency Power sources》vol. 791, May 1987
- 6、George H. Macmaster: "Current status of Crossed-Field Devices" 《IEDM》, P. 358, 1985
- 7、张至德"毫米波雷达综述"《现代雷达动态》第4期, 1980
- 8、"毫米波技术日趋成熟"火控雷达技术, No. 2, 1985
- 9、"毫米波雷达技术在反坦克, 制导导弹中的应用" "毫米波雷达的市场前景", 《现代雷达动态》第3、4期, 1983年
- 10、"毫米波功率合成技术"《火控雷达技术》第4期, 1985年

2.4 毫米波行波管

毫米波行波管有极宽的频带, 较高的效率, 一定的功率电平, 很长的寿命, 工作适应性好等优点。因而在毫米波真空电子器件中占主要地位, 销售量最大, 应用最广泛。

各国的行波管研制者们进行了许多工作, 研究出许多新型慢波结构, 改进了慢波电路的散热。采用了许多新工艺、新材料以及各种抑制有害振荡的方法, 使毫米波行波管的性能有很大提高。

2.4.1 毫米波螺旋线行波管

与毫米波耦合腔行波管相比, 毫米波螺旋线行波管的带宽宽得多, 整个带宽内的增益变化小, 功率变化也小, 加工较方便, 成本较低, 但功率容量较小, 坚固性也不如耦合腔行波管。

为了改进螺旋线行波管的性能, 各国在改进慢波结构, 改善螺旋线的散热, 增加带宽, 提高效率 and 抑制有害振荡等方面做了很多工作, 使螺旋线行波管的技术水平有很大提高。最高工作频率已推进到 54GHz, 连续波功率已达 200 瓦, 具体情况如图 2—5 和表 2—7 所示。

现简略介绍一些使毫米波螺旋线行波管性能有较大进展的新技术。

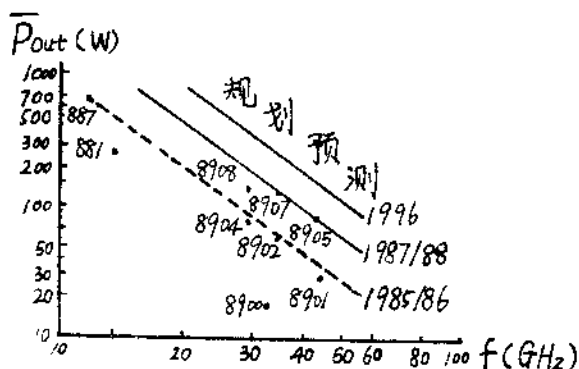


图 2—5 螺旋线行波管的技术水平及预测水平
出处: Military microwaves 1988 conference exhibition microwave tube special session P. 1

表 2—7 毫米波螺旋线行波管的技术水平

制造公司 或管型	频率 (GHz)	功率 (W)	工作状态	增益 (dB)	效率 (%)	注	出处
NEC	27—29	40	CW	37	20		M. J. 1985, 28(2), P. 69
汤姆逊	27.5—30	100	CW	35	10	焊接螺旋线	IEDM. 1986, P. 171
汤姆逊	27.5—30	200	CW	55	25	焊接螺旋线	IEDM. 1988, P. 366
W09MWLK	26.5—40	18	CW	30	—		1986 年国际军事微波会议录 P. 360
WP09MG15	34—34.5	90	占空系数 20%	44—54	—		1986 年国际军事微波会议录 P. 360
休斯	30—35	40	占空系数 20%	45	20		M. J. 1985, 28(2), P. 69
休斯 8908H	27—30	130	CW	—	29		1988 年国际军事微波会议录 P. 1
休斯 8905H	41—45	80	CW	—	24		1988 年国际军事微波会议录 P. 1
雷声	32—37	10	CW	35	12		M. J. 1985, 28(2), P. 69
雷声	43—46	20	CW	35	10		M. J. 1985, 28(2), P. 69
雷声	18—40	20	CW	—	—		IEDM1986, P. 508
瓦里安	44	40	CW	40	—	螺旋线电压 9.3KV	M. J. 1985, 28(2), P. 69
N10043	18—40	20	CW	43	30	EEV 公司制	1988 年 EEV 公司产品目录
Northrop	20—40	100	CW	740	720		IEDM1987, P. 466
Northrop	40—54	306	脉冲	—	7.1	曲折波导 TWT 阴极电压 22.2KV	IEDM1987, p. 485

雷声	35	7KW	CW	52	42	同轴 TWT 带宽 > 40%	IEDM1986, P. 513
雷声	42	163	CW	24	电子效率 > 6.2%	螺旋波导电路	IEDM1988, P. 374.

(1)、各种改进型螺旋线慢波电路图螺旋线行波管在毫米波段尺寸很小,高频损耗大,因而功率容量受到很大限制。为了提高功率容量和整管的性能,采用了一些改进型螺旋线慢波电路。Northrop 公司防御系统部研制了曲折波导慢波电路,(如图 2-6 所示),用此电路作的行波管已能给出 40--50GHz 的频率,在最佳阴极电压 22.2kV,频率 43-53GHz 时,测得 306 瓦的峰值功率,效率 7%。这种电路是行波管在毫米波段既能增大带宽又有相当功率电平的一种途径。

利顿公司电子部研制了螺旋双脊波导电路,其形状如图 2-7 所示。该电路制成的行波

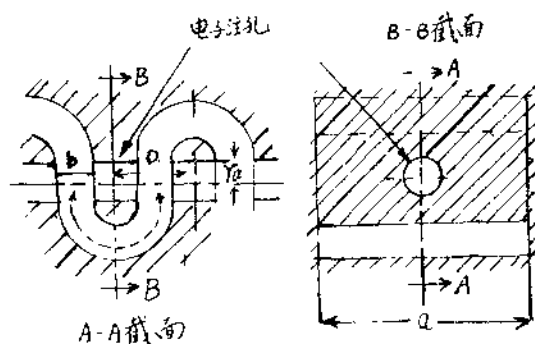


图 2-6 曲折波导慢波电路

出处:IEPM1987 年 P. 485

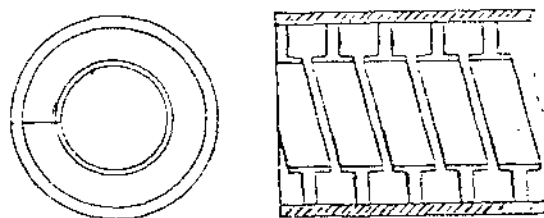


图 2-7 螺旋线双脊波慢波电路

出处:IEPM1982 年 P. 18

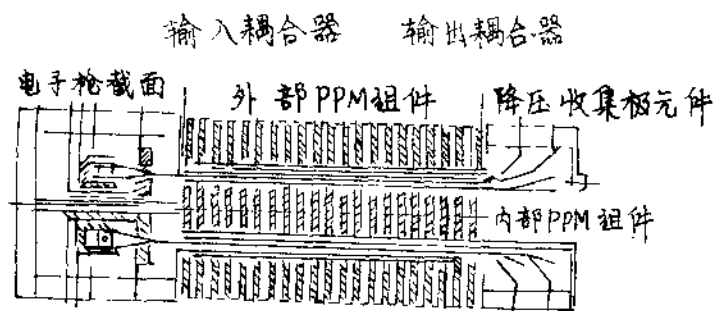


图 2-8 同轴行波管示意图

出处:IEPM 1986 年 P. 513