

第一次全国电真空器件 专业学术会议论文选集



第一部分 超高频技术及超高频管

中国电子学会电真空器件专业委员会 合編
北京市电子学会电真空器件专业組

(内部资料 注意保存)



国防工业出版社

目 录

第一部分 超高频技术及超高频管

毫米波及亚毫米波段相干性功率源的发展近况——文献综述	任裕安(7)
O型返波管的振荡特性的实验研究	張肇仪、滕大軍(19)
返波振荡器中寄生调制的研究	喻岳青等(26)
聚焦磁场对O型返波振荡的影响	龔中麟、徐承和(35)
新型超高频放大器——负电导再生放大器的工作状态	陈钟謀(43)
介质夹持螺旋线的色散特性	張克潜(50)
螺旋行波管的波导耦合	顾本立等(71)
测量色散特性的等效网络法	沈致远(87)
直角坐标电抗网	沈致远、陈抗生(102)
三厘米波段介质电特性的量测	汪原仁(118)
热丝式微波标准噪声源	唐鵬千(125)
混合气体放电的微波噪声	柯錦松等(136)
等离子体的微波噪声	林俊琛(150)
微波精密衰减器衰减片表面电阻的选定和控制	芮 杰(160)

第 一 部 分

超高频技术及超高频管

毫米波及亚毫米波段相干性功率源的发展近况——文献综述

任裕安

摘 要

文中简述了毫米波段和亚毫米波段电磁能的应用。对近年来利用电子束产生这两个波段电磁能的新物理方法作了简要评述,文中只对那些较有希望的物理方法予以讨论。文中着重介绍近年来毫米波电子管(“O”型及“M”型)的新进展及其进程中的主要问题,并讨论了这两个波段相干性功率源的发展趋势。

一、引 言

随着科学技术的发展,特别是尖端科学的出现,人们对于波长短于1厘米的电磁能量的需要日益迫切。人们把电频率在30至300GC($1\text{GC}=10^9$ 赫兹)或波长为10毫米至1毫米的电磁波称为“毫米波”,而把电频率在300至3000GC或波长为1毫米至0.1毫米的电磁波称为“亚毫米波”。它们是很重要的波段。特别是亚毫米波还未被人们完全掌握。这两个波段的电磁波有其独特之处:电频率极高、自由空间波长极短。人们对这两个波段感兴趣的原因是由于在这些波段工作的电气系统有极宽的工作频带,极高的方向性和较小的体积,并且一些物质的吸收线谱也处在这两个波段中。

根据已发表的文献介绍,这两个波段的电磁波有以下的一些用途:

1. 超极多路通信

由于载频极高,相应的通频带的绝对量可以很大,例如同样是5%的通频带,当载频为3000兆赫(即波长为10厘米)时,通频带的绝对量为150兆赫,而当载频为300GC(即波长为1毫米)时,通频带的绝对量为15GC,相当于频率为0至3000兆赫的5倍,可见其通信容量是惊人的。

2. 宇宙航行中的通信

由于这两个波段的波长很短,在相应的电气系统中元件的尺寸可以很小,特别是通信系统的天线尺寸可以大为缩短,而且仍能保持着很高的定向性。电磁波射束可以限制在狭窄的范围内。这对于没有大气吸收的宇宙空间通信特别有利。

3. 具有高度保密性的地面通信

毫米波通信系统的天线尺寸小、方向性强,在传输线路上电磁波功率的利用率就很高。信息被限制在极小空间内,就不容易被偷听与干扰。大气中的水份及其他化学元素对毫米波的吸收亦可保证这种通信系统的保密性。选择合适的频率与功率,可以在特定的通信距离内保证有效的通信。超过这个距离,漏出的信息会被大气吸收掉。

4. 宇宙飞船返航时与地面的通信

当宇宙飞船返航地面时,其速度极高,与大气摩擦的结果就会产生一个电离壳层将飞

船包围,凡频率低于这个电离层的等离子体频率的电磁波都透不过这个壳层。因此,在这种艰巨航行的最后几分钟有与地面断绝联络的危险。而长的毫米波可以安全透过这种电离壳层。在大多数的情况下,频率在30GC以上的通信系统就可以与地面建立不中断的联系。

5. 雷达电视

毫米波的频率极高,可以采用极短的脉冲调制,因而可使雷达有高度的分辨力,在雷达的显示管屏幕上可以看出被测物体的轮廓。因而就能实现雷达电视。而且大气中的水份及其他元素对毫米波各有不同的反射率,因此为肉眼所不能观察到的“气旋”、风暴、大气的急剧运动等完全可以用毫米波雷达来探测。这对准确的气象预报极有帮助。

6. 作为参量放大器和微波量子放大器的激励源

微波量子放大器和晶体参量放大器都需要频率比讯号频率高几倍的功率源作为激励电源(泵浦源),而激励源的频率愈高,其等效噪音温度愈低,在短厘米波段的量子放大器与参量放大器都需要毫米波的激励源。

7. 测量高温等离子体的性能

在可控热核反应的研究中,对高温等离子体的浓度、温度与存在时间的测量极为重要。毫米波通过等离子体时被吸收并发生相移,测出被吸收量与相移量就可推算出等离子体的温度、浓度等物理性能。这种间接测量方法的最大优点是,在测量时,并不扰动等离子体本身的反应。

8. 测量物质结构的特性

有很多种物质的分子跃迁吸收线谱是在毫米波及亚毫米波段。因此这些波段的波谱仪对研究物质结构将是一种有力的工具。

以上仅是这些波段许多种应用的几个例子。对这些波段人们还未能完全掌握,有许多有用的特性还未发现。一些工业先进的国家正在大力开展毫米波及亚毫米波的研究工作。在这些研究项目当中,以研制毫米波及亚毫米波功率源为重点。如果手头上没有这两个波段的能源,就谈不上对这种电磁波的其他物理性能的研究与应用了。

以前,这两个波段的电真空器件还未到达实用阶段时,人们大都采用无源倍频法,利用晶体二极管或其他非线性元件,将厘米波能量倍频。这种倍频法只能获得微瓦至毫瓦级功率,因此其实际用处不太大。

目前,这两个波段的电真空器件,经过人们的长期努力,已经达到实用阶段,有正式工业产品了。这些产品,大多数是利用厘米波段的管型按缩尺原理设计的。这是人们克服一系列工艺上的困难的结果。采用新的物理方法来产生这两个波段的电磁波也有很大进展。本文准备评述的器件是:(1)采用电子束与微波线路的电磁场作用原理的电真空器件;(2)采用新的物理方法的器件。无源倍频器件及量子器件不在文中讨论。

二、产生毫米波及亚毫米波的一些物理方法

在研究毫米波和亚毫米波的工作中,功率源的研制始终是一个最关键的问题。人们不单努力去改进现有的管型,使之能在这些波段内很好地工作,而且也尽力寻找新的物理方法,用来产生短波长的电磁波。下面将简要评述一下近年来出现的一些有实用意义的、并

且也有一定实验数据的新物理方法。

在原理上说,产生电磁波有两种方法:一种是所谓经典力学方法,用电磁场来减速运动的电子,使电子的动能或位能变换成电磁能;另一种是所谓量子力学方法,利用电磁场与适当的物质相作用,使物质的能态从高的跃迁到低的能态而辐射出电磁波。微波波段的电子管就是第一种方法的典型,而微波或光量子放大器就是第二种方法的典型。本文只讨论第一种方法的新成就,第二种方法就不介绍了。

利用新的物理方法工作的器件可大致分为三个类型,它们是:1)驻波器件;2)行波器件;3)加速辐射器件。

1. 驻波器件

驻波器件利用电子束与驻波场作用的原理工作。根据厘米波段的谐振腔形式,按缩尺原理设计毫米波段的谐振腔,腔的尺寸非常细小,例如,用于四毫米波段的反射式调速管中腔的尺寸是:腔外径1600微米;腔高700微米;束通路250微米。整个腔的尺寸非常细小,加工就很困难。于是人们想出了一些新的方案,它们是:

① 用高次模圆柱型腔与电子作用

利用圆柱型腔的 $TM_{0,m}$ 模式的纵向电场与高速电子束作用。电子束预先用一单腔微波加速器使电子达到0.8Mev的能量。在进入 $TM_{0,3,11}$ 模圆腔之前,用几千瓦的10厘米波段的微波对电子束预调制。据报导在8.3毫米波段曾获得峰值功率为90瓦2微秒宽度的毫米波,最短波长曾得到3.14毫米。

② 用光学的Fabry Perot干涉仪与电子作用

在光学系统中,干涉仪就具有微波技术中的谐振腔的作用,光学系统的整个尺寸一般比工作波长大很多,但在干涉仪中的电磁场是横电磁波模。要使电子束能够与横电磁波相作用,则要波的传播方向与电子的运动方向有一少于 90° 的交角,这样,在电子束的前进方向上就有一纵向的电场分量。

为了使波与电子束同步,波的传播速度要用介质减慢。根据上述的一些想法,设计了一种实验装置,图2.1是其示意图。在干涉仪中,用横截面为 A 厘米²的TEFLON圆柱填充,两个反射金属板间的距离为 D ,其中一个金属板装上一圆型栅网,使有极化的辐射波能用透镜聚焦。用一个10厘米波段的微波电子加速器(REBATRON)加速电子,束流为14毫安,直流速度为0.88Mev,当 A 为46厘米², D 为8.5厘米时,在频率为39GC时得到150毫瓦的输出功率。

2. 行波器件

利用电子与慢行波相互作用早为人们所熟知,但在短波长工作时,慢波结构不容易加工,人们想出了一些新的方案。它们是:

① 契林科夫辐射器

电磁波在介质中运动,其相速慢于光速,这种介质的折射率必须大于1。而带电体在介质中运动时,当其速度大于波在介质中的传播速度时,就会引起电磁能的辐射,这就称为契林科夫辐射。实际结构是在介质中开一个电子束通路,使电子能自由通过。同时因单个电子所激发的电磁波是非相干性的,只有预先使电子束有密度调制,才能得到相干性辐射。为了使电磁波很好的发射至空间去,介质按一定尺寸作成角锥状,则电磁波平行于角

锥轴辐射出去。图 2.2 是这种方案的示意图。据报导,用这种装置在波长为 8.31 毫米时有 0.58 瓦输出,用 10 厘米波能量预调电子束,束的平均直流为 43 毫安。

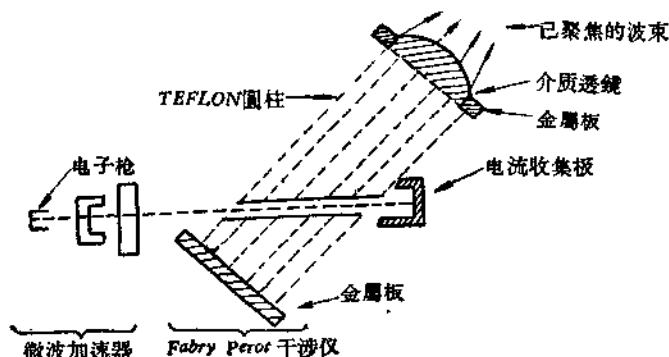


图2.1 用电子束去激励 Fabry Perot 干涉仪。

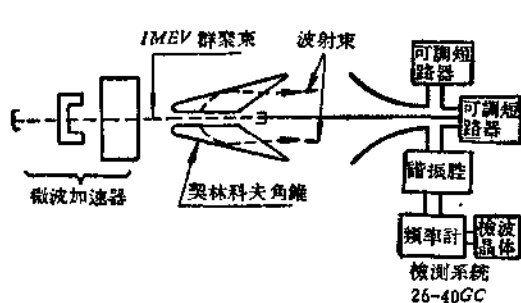


图2.2 契林科夫辐射器实验布置。

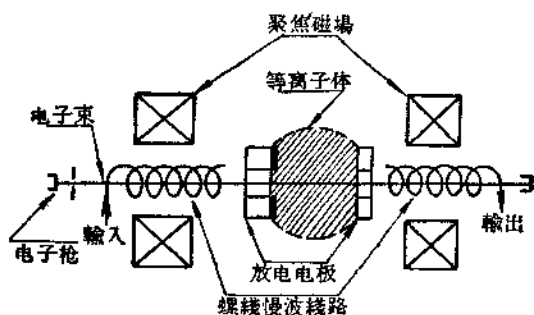


图2.3 电子束与等离子体相互作用的微波放大实验布置。

② 等离子体与电子束的相互作用

当气体放电的等离子体浓度足够高, 等离子体的共振频率 f_p (等离子体频率) 是在毫米波段, 电磁波的讯号频率 f_s 小于 f_p 时, 这种电磁波就可以在等离子体内传播, 此时等离子体变成一种容许有 TM 波传播的慢波线路。目前向米很好解决的问题是如何将外电磁波讯号耦合到等离子体内, 及如何获得浓度足够高的等离子体。解决第一个问题的可行方案是利用一金属微波线路使电子束受到讯号的作用而产生密度调制, 之后电子束进入等离子体内, 与等离子体相互作用, 则束中的密度调制讯号得到放大。这种放大作用与行波管的情况一样, 当电子束通过另一微波线路时, 电子束中的被放大的讯号就被耦合出来。具体布置示于图 2.3。

产生高浓度的等离子体是需要消耗一定的直流功率, 这意味着可以付出一定的直流功率的代价来换取结构精细的慢波线而避开精密的金工加工。

等离子体频率与浓度的关系由下式决定:

$$f_p = 9000 \sqrt{N} \text{ (赫)}$$

其中 N 是单位体积内的电子数目, 当 f_p 为 90GC 时, 要求的 N 值为 10^{14} 的数量级。根据目前的技术水平, 利用铯蒸气是可以产生浓度为 10^{13} 至 10^{14} 的热等离子体。如果能够解决电磁波的耦合问题, 这将是毫米波高功率放大的一个很有希望的方法。这种方法的优点是可

以不用很高的电压,而只要有足够的等离子体浓度及电子束流就可以得到一定的放大量。在作用区中,等离子体直接将电子束包围,而且能容易为电子束所穿透,因此电子效率会较高。据报导,用3厘米长的钝等离子体,及采用螺旋慢波线作为电磁波信号与电子束的耦合器,在信号频率为23GC时,得到的总增益为8分贝。工作电压为1.4千伏,等离子体的浓度为 10^{13} 离子/立方厘米,在10厘米及3厘米波段增益有20至40分贝。

③ 蛇行束与光滑矩形波导的横向电场相作用 (UBITRON)

电子在矩形波导中作蛇行轨迹运动,与横向电场相作用,在适当的电子速度与轨迹的情况下,电子束就能够与波导内的电磁波产生能量交换而将外加微波信号放大。按照此工作原理,电子的轴向运动速度要尽可能高才能得到有效的相互作用,并且容许电子的蛇行轨迹周期 L 能接近被放大信号的自由空间波长。周期 L 是由外加的聚焦系统所控制,尺寸不能太小。用外加横向周期性直流聚焦磁场来使电子沿蛇行轨迹前进。

按照上述的方案所制成的器件称为“尤皮”管 (UBITRON)。在10厘米波段与1.5厘米波段有实验管,其实验数据是令人满意的,工作频率为20GC的实验管,利用 TE_{01} 模圆波导作为微波线路,束电压为200千伏,输出功率达1兆瓦,电子效率达6%。这种器件估计还可以在更短波长工作。

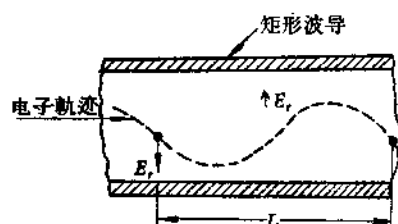


图2.4 蛇行电子束与矩形波导的横向电场相作用。

3. 加速辐射器件

电子在作加速运动时产生电磁波辐射的原理近年来受到人们的注意,下面介绍实验结果比较好的两种器件。

① 旋風管 (TORNADOTRON)

当电子作频率为 f_0 的圆周运动时,则有 f_0 或 nf_0 频率的电磁波辐射。图2.5是实验管

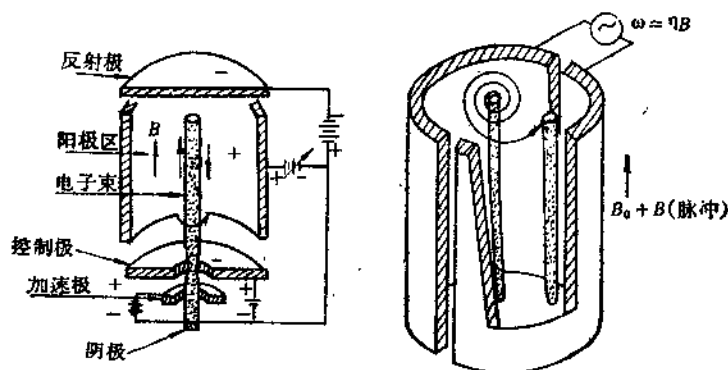


图2.5 旋風管的工作原理图。

的简单示意图。电子束在两半圆的阳极区受到纵向磁场的作用作自旋运动,在这两阳极上接上一高频电压,频率等于电子的迴旋频率时,则整个电子束按盘香轨迹向外运动。之后,再加入一高强度的脉冲磁场,使电子束的公转频率 f ,自旋动能提高几个数量级,电子束则作毫米波及更短波长的辐射,这种方案可以不采用微波线路与电子束相作用。

这种实验装置只有在很高磁场值下才能工作, 因为辐射的电磁波波长是 $\lambda_0 = 10^{-5} B$, λ_0 的单位为毫米, B 的单位是高斯。这种装置的初步结果是当脉冲磁场为 25000 高斯时, 得到波长 4 毫米, 功率为 1 毫瓦的辐射。在 100000 高斯时, 得到波长为 1 毫米约零点几毫瓦的辐射, 励磁电流为 200000 安培。

② 利用高速电子与光栅作用 (VAROTRON)

利用高速电子与金属绕射光栅相作用而得到光波的辐射, 其工作原理及实验装置的示意图示于图 2.6 中。在空间运动的电子 e^- 在金属面上引起一镜像电荷 e^+ , e^+ 与 e^- 一起运动, 当金属表面刻成槽纹状 (如图 2.6 a 所示) 时, e^+ 按照金属表面的形状上下抖动, 这样, e^+ 与 e^- 组成一振动的偶极子而产生电磁波的辐射, 辐射频率随观察角度变化而变化。辐射波长与电子束参数及光栅的尺寸有以下关系:

$$\lambda_0 = \frac{1}{D_1} \left(\frac{c}{v} - \cos \theta \right),$$

式中 λ_0 为辐射波的波长, D_1 为光栅上每单位长度内的槽数, v 为电子 e^- 的运动速度, θ 为观察角度。图 2.6 的实验装置, 其实验数据是: 带状电子束厚为 0.25 毫米, 光栅的槽数为每毫米长度内有 1770 条, 光栅是沉积在不锈钢块表面的银面上刻成。电子束流为 1 毫安。当电子束电压为 65 至 155 千伏时, 有可见光的辐射, 也发现有高次谐波的辐射, 短波长在紫外光部分, 长波长在红外线部分。

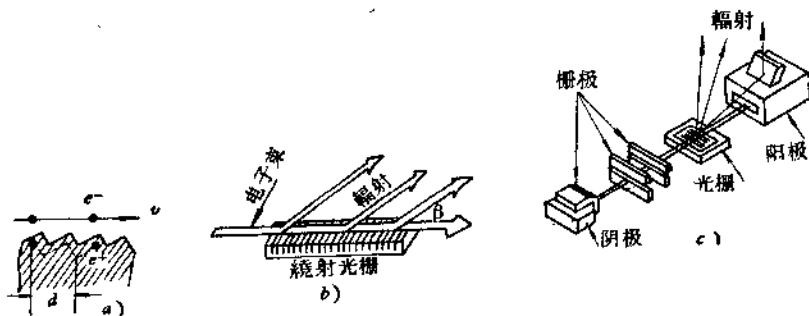


图 2.6 电子束与光栅相作用, (a) 电子束在光栅面上运动产生镜像电荷;
(b) 电子束与绕射光栅作用产生电磁波辐射; (c) VAROTRON 的实验装置。

利用上述原理制成的器件称为“变光”管 (VAROTRON)。这种器件作为光波产生器有一定的优点, 可以改变电子加速电压来改变辐射的波长, 可以用偏转极来控制电子至光栅面的距离而得到辐射强度的改变。即这种器件很容易得到辐射光的频率调制及幅度调制。利用这种原理可以制出一系列的、从微波波段到可见光波段工作的器件。

以上所举出的几种器件都有一定发展前途, 其中实验数据最好的要算是等离子体与电子束的作用器件, “尤皮”管, 及“变光”管三种, 因为这些器件无论在工艺结构上和电气性能上都比较切合实际的。

三、微波管的新进展

微波管是指在 3 厘米波段已有的工业产品的管型, 其中可大致分为直线束微波管 (“O”型) 与交叉场微波管 (“M”型) 两种。它们的共同特点是采用电子束与金属微波线路的电场

分量相互作用的原理。有时候它们也被称为“老管”型。

在资本主义国家中，有英、美、法、日、荷兰等几个国家的十五、六家大公司或电子管厂在研制微波管，并已取得相当大的进展。就这些管子的工作频率而言，现有的工业产品的管子已经能复盖整个毫米波段，有个别管子已经可以在亚毫米波段工作了。在毫米及亚毫米波段的管子主要是返波管、行波管、调速管和磁控管等几种。

法国 CSF 公司研制了一套返波管，其波段复盖了整个毫米波段。其中的亚毫米波返波管的实验样品已经能在波长为 0.7 毫米附近工作，输出功率是 1 至 14 毫瓦。在 125 至 145 GC 波段的大功率毫米波返波管实验样品有 1 千瓦至 100 瓦的功率输出。美国的 Watkins-Johnson 公司在研制频率为 94 至 100.5 GC，输出峰值功率为 100 千瓦，平均功率为 1 千瓦的返波管。美国有三、四家公司在生产整套毫米波段的返波管。

在美国，有几家公司在研制毫米波段的大功率行波管及低噪音行波管。据报导，低噪音管子的工作指标是：工作频率为 90 GC，噪音系数为 10 分贝。工作频率为 53.5 GC 的大功率行波管实验样品的初步实验结果是功率输出为 150 瓦连续波，频宽为 4%，增益为 13 分贝，效率达 30%。

在英、美、日、荷兰已有整套的毫米波反射调速管的工业产品。荷兰出品的管子最高频率为 140 GC，有大于 10 毫瓦的输出功率。

在英、美、日等国已有频率低于 100 GC 磁控管的工业产品。

图 3.1 表示了 1962 年以前毫米波及亚毫米波管子的功率水平及频率指标。从图中可以看出磁控管在较低频率仍然保持着最大输出功率的记录。但功率行波管也开始往高功率发展了。返波管的频率记录遥遥领先。总的看来，直线束型管（“O”型）比交叉场管（“M”型）发展快。而直线束型管中，采用慢波线的管子所占的比重很大。

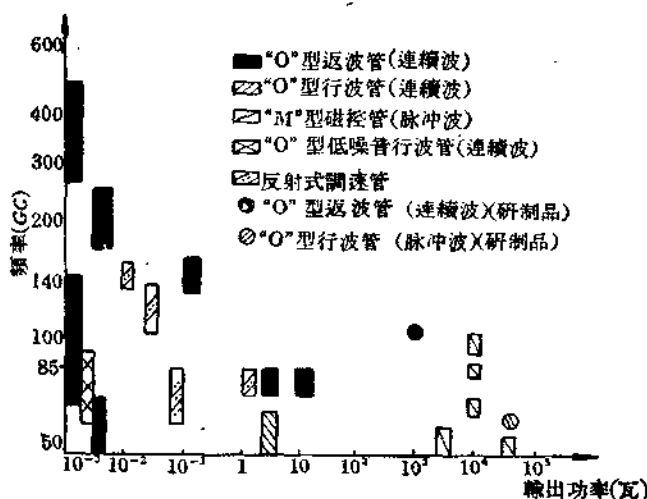


图3.1 毫米波及亚毫米波管的功率水平及频率指标。

“O”型管与“M”型管在缩短工作波长的发展过程中都遇到很大的困难。按缩尺原理设计微波线路时，其几何尺寸与工作波长有近似于线性的关系。在短波长工作，线路的尺寸变得很小，就要求精密金工加工。在“M”型管的情况，所遇到的困难比“O”型管要大些。除

了工艺上的问题外,另一些困难是要求高的磁场值和细小的作用空间。“M”型管所用的磁场值一般都要超过管子的静态临界值,而此值是近似与工作波长成反比关系。在较短的毫米波段工作时,如果仍选用基波工作,则要求的磁场强度为1万高斯以上,这种磁强值已经达到一般磁性材料的饱和值了。强磁场的产生本身也是一个尖端性的专题,目前还未能很好解决。“M”型管另一个特点是收集电子的电极也是微波线路的主要部分,作为集电极,收集面积愈大,收集极的热损能力愈强,容许输入功率则愈大,相应的输出功率电平也愈高。作为微波线路,其几何尺寸与工作波长有严格的关系。过大会引起杂模产生,使正常工作状态变坏,波长愈短则容许的尺寸也愈小,热损能力就大受限制,另一方面,阴极也是微波线路的一部分,其尺寸同样也受到工作波长的严格限制。

为了使“M”型管能在较短波长工作,并能给出切合实际的功率,一个比较有效的方法是增大微波线路的单位热损能力。例如3厘米波段的“泊”管采用空心铜管作微波线路,铜管内通以高速冷却水以增大散热能力。提高阴极的发射能力和设法加大微波线路的尺寸也是有效的方法。尽管在各方面人们作了不少努力,但由于受到高磁场及工艺上的限制,短波长的“M”型管进展仍然不大。

直线束型管(“O”型)的情况与交叉场管相反,在缩短波长方面的进展很大。“O”型管在结构上可大致分为三部分:电子枪,微波线路,集电极。这些部分在结构上是相互串接的,但也是相对独立的,因此电子束的产生与成形,微波线路的场与电子束的相互作用,以及电子的收集是在不同的空间进行,相互牵制较小,可以对各部件作单独设计,并使它们能尽量发挥其潜力。在研制过程中,对各别部件的性能改进工作均可同时进行,使得任何一部件得到改进后,就能立刻用到管子内,而使管子特性能够很快改善。并且“O”型管所要求的聚焦磁场并不很严格,数值也很低,即使在亚毫米波段工作的管子,其磁场值也只要几千高斯而已。

“O”型管的工作波长能够缩短,是由于人们克服了一系列的困难的结果。这种管在发展过程中遇到下面几个问题:

1. 高密度电子束

按缩尺原理设计毫米波管子,微波线路的尺寸是与工作波长成正比例,电子束通路的有效相互作用区的截面近似地与波长平方成比例。当束密度不变,管子的输出电平就大为减少。提高输出电平的直接方法是提高作用区的电子流密度。

提高作用区的电子流密度可从两个方面来进行。一方面是提高阴极的发射密度,另一方面是采用高收敛比的收敛式电子枪。

在提高阴极的发射能力方面,人们已经作了很多工作,也取得了一定的成绩。目前,低功率毫米波管一般都用连续发射密度为1至2安/厘米²的阴极。尽管如此,还不能完全满足需要。随着对阴极机理的进一步了解及新发射体的发现,相信今后的阴极性能还会有更大的改进。

提高电子束密度的另一个方面是利用高收敛比的电子枪。法国CSF公司的415GC(0.7毫米波长)的返波振荡管是采用了收敛比为100,束流密度为100至200安/厘米²,束直径为0.2毫米的电子枪。在四毫米波段的返波管,采用了这种枪能给出2瓦的高频功率,同样的电子枪也可以用到2毫米波段的管子中。

高收敛比的电子枪是比较难设计的, 因为必须考虑到高的空间电荷效应, 而且电子束中的速度分散往往大于设计所要求值。随着工艺技术的发展, 束流密度为 500 安/厘米^2 的电子枪是可以制成的。

2. 微波线路的型式

在厘米波段的管子中, 微波线路的横向尺寸一般都小于四分之一自由空间波长, 以保证横向电磁场均匀分布及单模工作。随着工作波长的缩短, 整个微波线路的尺寸变小了, 电子束通路的截面与工作波长按平方关系缩小。线路的横向尺寸缩小是使管子的电气性能变坏和变得脆弱的原因。

毫米波管内的微波线路的发展趋势是增大横向尺寸, 使电子束通路的截面积变大, 增大线路的横向尺寸有两个方法, 一个是采用简单的并联, 例如在行波管中可以采用多根螺旋线, 两端各由一公共馈电线路联接, 这种简单的并联, 在保证各慢波线是同相激发时, 行波管的输出电平是会大为提高的。另一个方法是采用复式慢波线路, 有时也称为二维空间慢波线, 其横向尺寸可以大于一个工作波长, 横向尺寸增大自然使电子束通路的截面加大。图 3.2 表示了增大横向尺寸的慢波线的几个例子。

横向尺寸增大, 微波线路自然会有杂模出现, 抑制的办法可以采用如磁控管中加隔模带或异腔系统的概念, 同样也可以在杂模场最强的地方, 采用增加高频损耗的办法。法国的 CSF 公司采用了图 3.2 c 的结构, 制成一返波管实验样品, 在 10 厘米波段工作, 输出功率高达 20 瓦, 束流系数为 27 微泊, 工作电压为 100 至 500 伏。

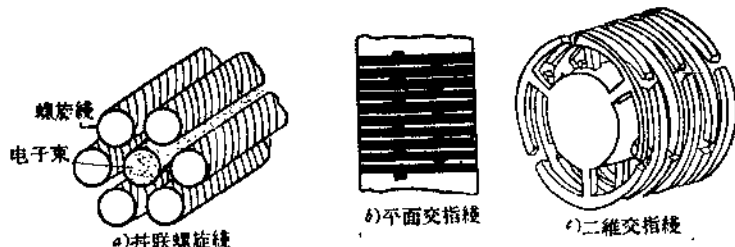


图3.2 增大横向尺寸的慢波线路。

最近出现了一种谐振式返波管。这种管子采用了一段很短的慢波线路, 两端用导电平面将慢波线短路而组成一谐振腔, 利用谐振慢波线上的前进波或返波分量与电子束同步作用而得到振荡, 这种管子的电子调谐很狭窄, 要用机械办法来调谐慢波线腔的谐振频率。这种管子所用的慢波线比普通非谐振式返波管来得短。从工艺上考虑, 谐振慢波线的整个几何尺寸比单个凹型空腔大得多, 容易加工。谐振返波管在长波长低电流密度工作时, 可以用空间电荷聚焦。在短波长大密度工作时, 可以采用恒磁聚焦。这样, 其工作电流就比同波段工作的反射调速管来得大。日本 OKI 公司采用了梯状慢波线制成了一种管子称为“梯子管”(LADDERTRON)。在频率为 50GC 时, 输出功率 5 瓦。图 3.3 是这种管的结构示意图。

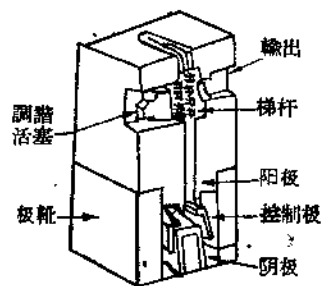


图3.3 “梯子管”(谐振返波管)。

3. 微波线路的加工

微波线路的加工工艺是毫米波管的一个最突出的问题。由于线路的尺寸非常细小,很难从厘米波段的管子加工工艺找到相类似的方法。近年来,出现了一些制造精度很高的、毫米波管微波线路的新的加工方法,使得这个波段的管子能够向更高的水平发展。

精密电火花加工工艺的成熟使得人们能够制造出精度很高的慢波线路,特别是梳形慢波线和交叉指形线路。比较严格一些的电火花加工可达12级光洁度,公差约5微米,加工隙缝为几个微米。

圆柱状的复式慢波线可以采用薄片结构,亦即将慢波线分成很多的小薄片,每一薄片可用精密冲制法加工,然后将这些薄片叠起来,组成所要求的慢波线,用加压焊接可以得到满意的结果。其办法是将每一薄片的表面弄得非常平滑与清洁,然后将这些片叠起来,在加温的同时,也加上一定的压力,直至片间的金属颗粒互相渗透而结合在一起。

光蚀法与光积法也是近年来发展起来的慢波线加工工艺。在法国,有人用在陶瓷表面沉积金属的方法来制造交叉指形毫米波线路。其办法是先在陶瓷表面用照相的办法印上交叉指形线的平面轮廓,然后用化学方法在陶瓷表面的线路轮廓上沉积上金属。

在加强螺线散热能力方面的工艺也取得了很大的进展。美国贝尔实验室研制了一种5毫米波段的螺线型行波管,螺线是釉在刚玉块上,并将刚玉在铜座上夹紧,这样使螺线的热损耗能力比不上釉时高一个数量级。这种管子在5至6毫米波长工作,输出功率为半瓦。

四、毫米波及亚毫米波段功率源的发展趋势

从毫米及亚毫米波段功率源的发展看来,这些器件是要求高强度,加工精密,并且具有新颖的作用方式。

高强度是指高的工作电压,工作电流与磁场。用新的物理方法产生电磁波大都采用预群电子束。当电子束进入作用区之前,先经过一微波调制装置,使电子束得到良好的密度调制。电子群的尺寸要小于作用区的工作波长才能得到有效的作用。在短的毫米波段工作时,小尺寸的电子群与较高的电流密度就会遇到强的空间电荷力的反作用,使电子群扩散。要抵消这种效应往往要在高至50千伏的电压下工作。在直线束型管子中,所采用的电子束流密度很高,电子的速度分散很厉害,所以要提高束工作电压以抑制电子速度分散所引起的种种效应。同样,根据微波管的理论,微波线路部分的尺寸不仅决定于工作波长,而且也决定于工作电压,例如在行波管中,工作电压的提高,慢波线结构周期及电子束通路的尺寸可以相应增大。束通路的作用阻抗也可以提高,因为随着工作电压的提高,高频场在束通路中的跌落也变得缓慢了。同样,如果工作电压高,由于电子速度的分散所引起的电子效率下降也相对减小。目前在短波长工作的行波管和返波管都采用接近或大于10千伏的工作电压。法国的0.7毫米波长的返波管其输出功率只有毫瓦级,但所用的电压却是5~6千伏。美国一家公司所研制的3毫米波段高功率返波管其工作电压高达70至200千伏。

高的工作电流也是毫米波功率源所要求的。在毫米波短波长部分工作的管子一般要求束密度为50安/厘米²以上。在1毫米波段工作的返波管就得用100安/厘米²的束密度才能得到有效的功率输出。如果要进一步增加功率输出,束电流就要有更大的密度了。毫米波管子

线路的发展趋势是采用大横向尺寸的线路,这种线路要求采用高导流系数的电子枪与之配合,即在一定的电压下,要求尽可能大的电流值。利用等离子体与电子束作用来放大微波时,要求高的离子浓度,在毫米波段,要求的浓度为 10^{14} 至 10^{15} 离子/厘米³。

毫米波器件的发展同样要求高的直流磁场。一方面这是与高密度的电子束形成有关,而另一方面是与电子在磁场中的回旋频率有关。在“O”型管中,由于工作电流密度大,要求的聚焦磁场也大,一般在5~6千高斯的数值。在“M”型管中,磁场的作用不单对电子束的聚焦重要,而且对能量交换也同样重要,所要求的磁场,一般与所要求的电子在磁场中的回旋频率相适应。在毫米波段“M”型管要求磁场值一般都在10000高斯以上。利用电子的回旋运动而产生电磁波辐射的物理方法(如旋风管)和利用等离子体作为毫米波的微波线路,都要求高的磁场值。在短的毫米波段工作时,要求的磁场值高达十万高斯,而产生这样高的磁场本身已经是一个尖端的学科问题了,目前还未很好解决。

毫米波管所要求的精密加工本身有一定特点,被加工部件的尺寸非常小(例如慢波线和高收敛比的电子枪加工)。这种工艺非常类似钟表零件的加工工艺,另一方面小部件上的某些尺寸又非常接近光学仪器的精密零件,例如梳形慢波线上的梳齿部分,类似光栅的结构。因此,这两种工艺方法(钟表工艺,光学仪器工艺)对毫米波及更短波长管子的精密加工肯定有帮助。

毫米波管的作用机理、工艺等都有其本身的特点,而与厘米波段的管子不大相同。因为这到底是一个新的波段,必然对应着一些新的问题。例如,由于微波线路细小就产生了增加线路的横向尺寸的要求,这是厘米波段的管子所不必考虑的。横向尺寸的加大必然会引起新的模式出现,就产生了对它们的控制问题。同样也产生另寻出路的问题,使人们对许多产生电磁波的新的物理方法发生了兴趣。

随着波长的缩短,其电磁波的性质与光相类似,因此,用“准光学”理论去研究这些短波段的技术问题是有好处的。目前在研究毫米波的传输方面已经采用了准光学原理并取得一些结果。研究电磁波在多维慢波线上的传播特性是否可以借用光在晶体内传播性能的电理论来解释,只有在更深入研究之后才能对这个问题作出肯定答案。无论如何,研制这个波段的器件的技术人员熟悉了光学方面的理论和技术肯定会对工作有很大的帮助。

五、结 束 语

毫米波及亚毫米波段的功率源,无论是采用新的物理方法的器件或是老管型(“O”型及“M”型),近年来都取得了很大的进展,但还未达到成熟阶段。近年来出现的量子器件和一些采用新的物理方法的器件,都有可能作为这两个波段的功率源,但这终究是较远期和较渺茫的工作。如果从工程技术的角度出发,老管型,特别是“O”型管,在这些波段内的潜力很大。如果其作用机理得到进一步的发展,并且与新的工艺技术结合起来,老管型的发展道路将会是宽广的。

作者感谢黄国祥先生和陆孝厚先生对本文提了很多宝贵的意见。