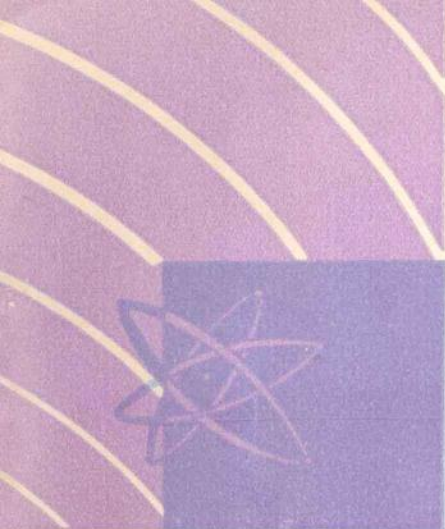




前向波放大管和钨钨阴极

经验交流会

资料汇编

〈 内部资料 注意保存 〉

会议会务组编印

1972.12.

毛主席语录

路线是个纲，纲举目张。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我们中华民族有同自己的敌人血战到底的气概，有在自力更生的基础上光复旧物的决心，有自立于世界民族之林的能力。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

目 录

综 述

微波电子管的一些新进展.....	(1)
------------------	-------

前向波放大管

104前向波放大管的研制情况	(31)
2014管阶段汇报.....	(42)
研制分布发射式正交场放大管中遇到的几个问题.....	(64)
三公分注入式前向波放大管研制情况简介.....	(71)
102前向波放大管的研制情况	(78)
连续波前向波放大管阶段小结.....	(98)
冷阴极在重入式分布发射前向波放大器中的应用.....	(125)
阳极棒电路的探讨.....	(138)
M型注入式电子枪的设计与计算.....	(146)

磁 控 管

磁控管基本问题的解释.....	(169)
频谱跳线、漏线产生的原因及消除办法的探讨.....	(176)
CKM55—57 存在的质量问题和提高质量的措施.....	(183)
CKM—99 磁控管频谱改进试验概况.....	(187)

钡 钨 阴 极

钡钨阴极研制情况简介.....	(191)
钨酸盐钡钨阴极的改进及应用.....	(200)
钡钨阴极的生产和应用情况.....	(208)
钡钨阴极在速调管中的应用.....	(212)

国外前向波放大管简介

国外正交场放大管进展简介.....	(215)
国外磁控型前向波放大器发展近况.....	(237)

微波电子管的一些新进展

吴 鸿 造

摘 要

微波电子管在现代无线电技术中起着相当重要的作用。目前,这一科技领域正在稳步向前发展。本文试图对近年来微波管研制工作的一些新的进展作一述评。全文分为十个部分。文中,首先讨论了七十年代微波的应用,然后讨论了微波管与半导体器件的比较以及相控阵雷达中使用的微波电子器件。文中扼要地叙述了速调管、行波管和正交场放大管在设计上的某些新进展。并介绍了制造微波管的一些基本工艺的改进和电子计算机在微波管设计中的应用。

最后,作者陈述了发展微波管的若干意见,供有关同志参考。

一、引 言

广义的微波电子器件包括在微波领域内应用的一切有源元件,例如电子管、半导体器件、微波声电器件以及激光器等,内容异常复杂广泛,近十年来的发展也极为迅速。从实验室发现的一些现象推动人们从理论上去进行探讨,而理论上的成就又进一步指导着实践。由此而研制、生产出的各种器件又促进了微波技术的应用。不仅是在已有的军事和空间的领域(如雷达、导航、无线电制导、遥控遥测、电子对抗、卫星通信),而且在一些民用的领域(如散射通信、中继通信、物质结构的基本研究、医药、生物学、化学的基本研究、工业加热等)都得到了日益广泛的应用。反过来,微波的有效利用又进一步对器件提出更多更高的要求,促使微波电子器件向高功率、宽频带、轻、小、省电以及高稳定性、长寿命等熟知的方向发展。

要对这些微波电子器件作出全面而系统的阐述和评价是极为困难的。特别是有些实验现象至今还不能从理论上加以完满地解释。有些争论的问题至今也还不能作出结论,有待进一步深入探讨。如磁控管在四十年代初期就已在雷达上作为大功率振荡管加以使用,而且也表现出良好的性能。但其机理长期没有得到阐明,目前,只是在高速大容量的数字电子计算机得到使用之后,才对磁控管和其它正交场器件内的电子与波的作用机理有一定的了解。

在本文中只选择了一些与微波电子管有关且为从事这方面工作的同志感兴趣的问题来加以讨论。文中首先展望了七十年代微波技术的应用,因为从这些应用里可以充分估计今后对微波电子器件的要求。然后,对微波管与半导体器件进行了比较,讨论了相控阵雷达中使用的微波电子器件。文中又分别讨论了速调管、行波管、正交场放大管设计上的某些进展,同时略述了一些基本工艺的改进和电子计算机在微波管设计中的

应用。

二、七十年代微波应用的展望⁽¹⁾

随着微波电子器件在各方面性能的改进和提高以及微波的传输、发射、接收等技术本身不断的发展,除了已经熟知的在雷达、电子对抗、通信和制导等以国防为主的应用外,根据国外资料的报导,向七十年代展望,微波还在中继通信、科学研究、医药卫生、工业加热、空间和地面运输等方面有一些新的应用。我们就以下几个方面来加以介绍:

1. 利用毫米波的通信系统⁽²⁾——为了适应日益增多的电话和电视信号的传输,在美国曾经展开过关于是利用激光还是毫米波作为载波进行多路的中继通信的辩论。贝尔实验室的科学家经过计算以后,认为从目前来看,利用毫米波的中继通信系统在实现可能性和经济性方面优于用激光系统。但对激光在这方面应用的研究也不予放弃。

估计到1974年将建成一个利用 TE_{01} 型波导传输的毫米波通信系统。目前从地面到人造卫星采用了4千兆赫的频段,从人造卫星到地面是用了6千兆赫的频段。为了扩大利用卫星通信的频段以同时运载几十路彩色电视和几万路的电话、电报和传真信号,拟将频率分别提高到30和18千兆赫,以避免目前低频段的挤塞现象。

此外还计划建立一个卫星到卫星间的毫米波通信系统,以充分利用毫米波天线的高增益特性。利用毫米波的高分辨率特性还拟在飞机、汽车上建立一些短距离定位、制导和探测的精密着陆雷达和防撞雷达等。

2. 微波在科学卫星上的应用⁽³⁾

(1) 地质学——装备有多段光谱照相和雷达设备的人造卫星将允许有经验的科学家测定地球表面的结构和地质特性。为此需要从对地面岩石和矿藏所得到的在不同波长的雷达频谱讯息中进行分析。

(2) 海洋学——利用微波频谱学的技术测量海洋表面温度、海浪(波)和流量的分布、海水污染情况、冰块分布及其运动、淡水和海水边界等情况,以确定鱼群的分布。

(3) 气象学——利用微波频谱的技术测定大气云层中温度和水蒸气的分布。这需要利用一对同步运行的人造卫星。

(4) 水文学——利用卫星中的微波频谱和红外检测计(Sensor),以研究并画出地面水流分布。

3. 微波电子加速器的应用

微波电子加速器的原理大致如图1所示,假定有一个包含一系列由轴上的孔耦合的圆柱腔体。在每个腔体间建立一个谐振场。相邻腔之间的相位差 120° 。设电子和电磁波都以光速在沿轴运行,那么以光速运动的电子每

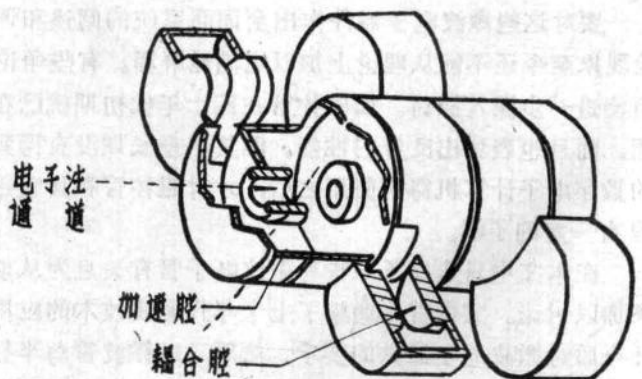


图1

通过腔中间就受到最大纵向电场的作用，通过耦合孔面时受到为最大纵向场约40%强的电场的作用。这样经过一段距离的运动以后，电子的动能就会逐步增大。这类作成直线的或圆型的加速器，最高可以达到10亿电子伏的能量。通常采用磁控管、泊管和速调管作为激励源，需要1到30兆瓦的峰值功率和1到150千瓦的平均功率，频率为600到9000兆赫。脉冲宽度约1到30微秒。

这类加速器当电子能量达10亿电子伏时用于基本粒子的研究。或用直线加速器输出的电子再去推动同步加速器（Synchrotron）可得100亿的电子伏特。一般为了弄清原子核结构以及质子和中子的运动，需要4亿电子伏能量的电子打上去即可。能量再高是为了击碎原子核，研究介子的产生。

电子加速器还用来进行化学反应、生物电子学的基本研究。用6亿电子伏特加速器产生X射线比钴⁶⁰治癌更为有效。在工业上利用高能电子的X光辐射对药品进行杀菌、对食品进行加工，并对金属件进行探伤。

4. 微波等离子体的应用

微波等离子体的应用主要有以下三方面：

（1）促进化学反应过程——利用微波等离子体（其中电子动能小于50电子伏）来促进有机物合成的试验已在进行。这是因为大多数有机电化学反应会产生污染产品的副作用，利用微波气体脉冲放电可对之加以控制。

（2）控制核反应——采用海水中丰富的氘作为核燃料，需要在反应炉中控制：（a）温度在 10^8 到 10^9 度绝对温度（相当于粒子能量为10万电子伏）。（b）粒子密度每立方厘米达到 10^{15} （相当于室温下 10^{-4} 大气压）。（c）反应时间在0.1到1秒或更长些。

高温使氘的带正电的原子核能克服其相互间的库伦斥力。在这样高温氘成为完全电离的等离子体，给出相当于10到100大气压。虽然反应室可以承受这样的高压，但不能允许反应室的壁（它的温度约为2000°K）与等离子体直接接触。因为这将很快地吸收高速正离子和电子的动能使等离子体冷却下来。因此，需要采用电磁场来限制隔开并加热这高达10到100大气压的等离子体。图2是核反应炉的示意图。

使等离子体加热，需要加脉冲磁场或使电流通过。但这样作，得不到麦克斯韦的能量分布和必需的热力学的平衡状态。

限制等离子体需要一个静态或准静态（脉冲）磁场。主要困难是在等离子体与场表面产生的不稳定性。

加热与限制场可以分开也可以合在一起，近年来的研究指出：采用微波气体放电可以较好地同时实现这两个目的。

（3）空间推进——在太

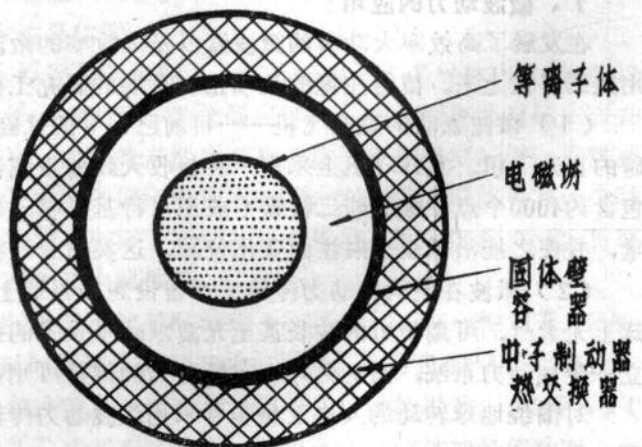


图2

空要发射一个空间体，采用微波等离子体推进比用化学燃料推进可以获得更大的比推力（即单位燃料重量所产生的推力）。其过程大致是用微波场产生一个高度电离的等离子体，使其耦合在回旋频率，在外加磁场下进行加速逸出，再产生一个反推力。对这种推进理论还不成熟，同时由于缺乏高效率（达90%）的微波功率管，所以工程发展性的工作尚未很好开展。

5. 微波在医药和生物研究方面的应用——在医药上主要有以下三方面：

（1）微波治疗——利用微波加热深入组织以消除病菌。

（2）微波诊断——这门学科发展还不快，但利用微波能量在人体内的衰减可以研究某些生理现象。

（3）微波辐射对人体的伤害——在广泛的基础上制定一种能为人类所能接受的雷达辐射能量的限度。

在生理研究方面有以下几个问题：

（1）生理组织的微波特性与组织内含水量、大分子和磷脂（Lipid）的含量有关。在微波频率下测出的介质常数和导电率能用来决定组织的特性。从而促进微波在诊断和治疗方面的应用。

（2）微波频率下研究结合水的特性有助于理解大分子的相互作用，例如酵素和蛋白对周围环境的影响。

6. 微波加热的应用

在国外微波加热已发展成对食品加工，以及对木材、塑料、水泥等结构处理的不可少的一项工业应用。

微波加热的主要特点是加热可以深入到食品或材料的内部，使之温度均匀，容易控制。对食品进行脱水、干燥、解冻（Thawing），即可杀菌消毒，又能保持原有的色、香、味。对木材加工也可杀死蛀虫和腐菌。对水泥进行保养可以缩短时间，改善其强度。对矿石和旧建筑物利用微波加热可以使之加速破裂。

国外市场上已有频率为915兆赫和2450兆赫，功率为千瓦级和几十千瓦级的微波炉供应使用。

7. 微波动力的应用

在发展了高效率大功率的微波管以及高效率的微波整流器件之后就能把微波动力应用提到日程上来。值得注意的几项正在开展的研究工作有：

（1）微波驱动的直升飞机——目前已报导的试验只是在千瓦级的功率和重量约几磅的直升飞机。直升飞机上采用一种接收天线与整流器的组合器件称为 Rectenna。它包含约4000个点接触的硅二极管（或用肖特基势垒二极管）。进一步的工作是需加大重量，并使之能沿微波辐射注而变化位置。这类直升飞机主要作为观测或通信塔使用。

（2）微波在空间的动力传输——曾设想在月球上用微波传输动力，主要考虑到月球上无大气，可用极短的波长甚至光波以减小设备的体积重量。当然在月球上首先应建立一个核动力系统，而对月球上车辆动力的传输可用微波。

对围绕地球转动的人造卫星也可采用微波动力传输，在卫星上也采用 Rectenna 装置。

空间发射也可直接采用微波动力，它的“比推力”比重氧化剂燃料要大1000倍。

(3) 微波波导型运输工具——在发展高速地面运输工具方面, 国外曾研究采用一个直径约6米的圆金属管, 利用230兆赫频率, 兆瓦级功率在里面传输低损耗的 $TE_{0,1}$ 波型。然后利用里面的电磁波功率驱动波导管内一列长30米的车辆。

采用这种运输工具的好处是安全可靠, 不受气候影响, 没有污染。圆筒内处于大气压不会引起微波功率的打火。车辆在高速(每小时400~600公里)运行时没有活动的电接触点。

但利用这种运输工具也存在一些问题。一个是除了 $TE_{0,1}$ 以外的高次模式干扰问题, 在上述波导筒内至少有20种高次模式。现正在研究一些模式滤波器来解决这个问题。另一个是激励问题, 还有关于高效率的微波发生、接收和转换问题。这些都正在积极研究中。看来对于这样一个设想的实现, 即用低损耗模式在圆波导管内有效地驱动车辆的工程方面, 并没有什么本质上的障碍。

三、微波电子管与微波半导体器件的比较^[4,5,6]

半导体近二十年来的迅速发展, 已在部分领域内取代了电子管。特别是近十年来, 半导体器件(也称固态器件)不断地向微波领域迈进。一个比较明显的迹象是在国外电子器件专刊上近年来发表的论文绝大多数是有关半导体的。许多原来以微波管闻名的大学实验室(如斯坦福大学、密执安大学)也几乎全部转到半导体和激光专业方面去。由此很自然地就引起了一个争论的问题, 微波电子管会不会全部被半导体器件代替? 电子管到底还有没有前途?

要正确地回答这个问题, 需要对它们进行具体的分析。我们知道, 属微波应用的半导体器件通常有下列几种:

(1) 作为混频、检波用的点接触二极管以及以后改进的肖特基势垒二极管。后者是由半导体—金属结形成的。

(2) 作为微波开关、衰减器、移相器、限幅器等用的PIN二极管。

(3) 作为倍频器用的变容二极管和阶跃恢复二极管。

(4) 利用负阻特性进行放大的隧道二极管。

(5) 作为放大器或振荡器的微波晶体管。

(6) 雪崩二极管——它的基本原理可解释如下: 在高场强下, 半导体内的高能载流子能撞击出价电子, 从而造成电子—空穴对。若场强足够高, 这种现象将持续下去并产生大电流的载流子放电, 称为雪崩。由于撞击游离产生载流子积累需要时间, 故雪崩比电场滞后一个时间。这些载流子最后被反偏压电极所吸收, 它和雪崩中间也有一个时滞, 若这两个时滞约略相等, 并且它们的和等于高频的半个周期, 那末电流与电压反相, 器件呈现负电导, 于是就可以产生放大或振荡。

上述现象称为IMPATT模(碰撞雪崩渡越时间模)。另外, 还有一种TRAPATT模(俘获等离子体雪崩触发渡越时间模)是69年才发现的。在TRAPATT模中, 利用外电路在适当时间加大电流触发雪崩, 来产生等离子体以维持振荡。IMPATT用以产生连续波振荡, 而TRAPATT由于有高效率, 故可产生高的脉冲峰值功率。

(7) 耿氏二极管——这类器件不同于以上各种半导体器件, 它不是利用一个P-N

结,而是利用半导体的本体效应,所以又称为体效应二极管。器件在结构上通常是利用一个薄层的N型砷化镓,加上两端的接触电阻。当半导体内电场增强时,电子获得能量从一个低能带跃迁到一个高能带。可是它的迁移率反而减小,亦即运动速度减小。这样,当电压增加到某一临界值时电流反而减小,于是就产生了一个负电阻,从而引起放大或振荡。耿氏二极管放大器也称为电子转移放大器。

(8) LSA 二极管——它也是一种体效应二极管,但在这种模式应用时,高频场和偏压加在一起使管体内的空间电荷积累不起来,体内电场没有畸变,所有载流子都能对与高频场的能换作出贡献,以得到更大的功率。它的输出功率比耿模要大得多,也称为限累模(限制空间电荷积累模)。

在以上所介绍的半导体器件中,能与微波电子管竞争的有两个方面:其一在于作为放大或振荡的低功率源;其二在于作为低噪声的接收放大器。

首先从功率源的角度来看,所有半导体器件受限于频率和阻抗要求,它的作用区尺寸都很小。因此,能耗散的功率也小。

Nergaard⁽⁷⁾曾根据发射面积、最大场强、负载电阻、渡越时间、载流子速度等从理论上推导出不论是半导体或电子管,它们的输出功率 P 和频率 f 都满足下列关系:

$$\text{当 } f < 30 \text{ 千兆赫时, } P_0 f^2 = \alpha$$

$$\text{当 } f > 30 \text{ 千兆赫时, } P_0 f^{9/2} = \beta$$

式中, α 、 β 是常数。但对于电子管来说,其 α 、 β 值比半导体器件的对应值大 $10^3 \sim 10^6$ 倍。图 3 中示出了现有的电子管和半导体器件的 $P_0 \sim f$ 曲线。与 Nergaard 1970 年发表的曲线比较时可以发现,电子管部分没有什么变动,而在半导体器件则前进了一步,但其 $P_0 f^2$ 和电子管的差距仍在 10^3 倍以上。

总起来说,在高频率和大功率方面,半导体器件在可以预见的将来是无法与电子管竞争的。但可认为,大约在频率高于 50 千兆赫,功率大于 1 瓦时,电子管占明显优势,而在这个界限以下,电子管与半导体器件则处于竞争地位。

对许多测试设备来说, O 型返波管的应用仍占主要地位。因为返波管能在宽频带范围内进行高速度扫频,而这一点是半导体器件目前所代替不了的。此外返波管的可靠性也很高,在 100 千兆赫能达到 20,000 小时以上的寿命。

在窄频带范围内,反射调速管得到了广泛的使用。虽然

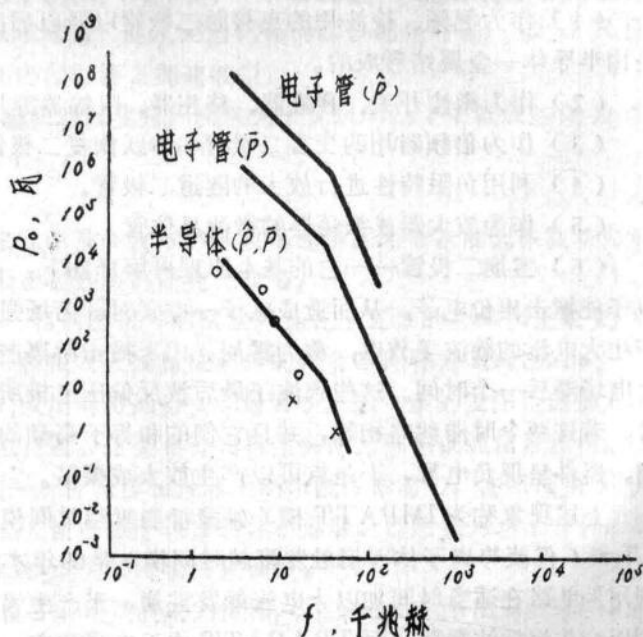


图 3

在窄频带也有采用半导体振荡源的,但它的噪声较高,效率也低。

分布作用的返波管(EI-BWO)具有高效率、高的频率稳定性、低的调频噪声,产生的频谱质量高。在采用新的钐钴磁铁后,这类返波管加上电源包装在一起,可以做得体积很小,能与可调固态信号源相媲美。

固态二极管信号源所需电压较低,可以改进它的频率稳定性和噪声特性,但达不到反射速调管或分布作用返波管那样低的调频噪声的水平。在可靠性方面,由于电子管的结构牢固,导热性能好,耐辐射性能随温度变化较小,所以要比固态器件高得多。

其次从低噪声放大器的角度来看⁽⁸⁾,目前可以和低噪声行波管相比较的有参量放大器、量子放大器、隧道二极管放大器、晶体管放大器以及电子转移放大器(即耿氏放大器)。参量放大器和量子放大器虽可得到最低的噪声,但由于需要泵源和致冷设备,故只在一些要求噪声特别低的场合(如射电天文学)才予使用。其它的固态器件总的来说都可作到体积小、重量轻、寿命长,可以达到倍频程,适合用于微波集成电路。晶体管放大器在耐脉冲能力、输出功率、动态范围和温度稳定性方面优于隧道二极管放大器,但噪声略大。电子转移放大器⁽⁹⁾是较新的产品,据说可以与低噪声行波管在各种性能上媲美。

低噪声行波管的优点主要是动态范围宽、噪声低、功率大、增益高、频带宽、可靠性和稳定性高。缺点是比较庞大笨重,采用了高压电源,成本高,与集成电路不能配合使用等。目前从X波段到毫米波段一般还是使用低噪声行波管。另外,为了与固态器件相竞争,低噪声行波管目前正向多样化方向发展(如小型化、省电、高增益、极低噪声、双倍频程、高饱和输出功率等)以适应各种不同应用的要求。

综上所述,可以认为,低噪声行波管与低噪声固态器件各有优缺点,在相当长一段时间内两者将同时并存,并不断改进,提高其适用于不同要求的性能。

最近已经出现了一种把电子管和半导体结合起来的器件,叫做电子注半导体器件⁽¹⁰⁾。它是在一个壳管里包含电子枪、调制系统、半导体靶和输出耦合网络。其工作原理是基于用高能电子注轰击一个反向偏压二极管来获得电流增益。每个电子打在 $p-n$ 结上会成倍地产生空穴-电子载流子对,使得电流增益达到2000或更高,信号可用电子注偏转或强度调制,或以二者结合的方式加到器件上。

目前,这类器件的研制水平大约是峰值功率为千瓦级,增益20~30分贝,效率达50%,频率在1~2千兆赫范围内。

这类器件可以产生上升时间为 10^{-12} 秒,持续时间为 10^{-9} 秒量级的大功率脉冲,可以得到比隧道二极管大2到3个数量级的开关速率。它可以发展成为一种新型宽频带、大功率线性射频和视频的器件,并应用于雷达、电子对抗、飞机防撞和应答系统中,以代替行波管和平面型真空管。这种器件比相应的行波管要便宜得多,可以和晶体管放大器竞争。

四、相控阵雷达中使用的微波电子器件⁽¹¹⁾

相控阵雷达是新近发展起来的一种利用面阵天线进行无惯性扫描的新型雷达。通过电子计算机对馈入每个天线单元的微波进行相位控制,以达到在几微秒内就能改变波束

指向，而普通雷达则需几秒钟。并且它能在空中形成多波束，对付多目标，完成多功能。总的发射功率可以由单管发射机给出或由许多中小功率发射机合成，可以十分巨大。

这种雷达主要用于跟踪航空和空间飞行器，特别适用于防空及反导弹系统。

这种雷达中所用的微波管主要是发射机中的功率管。接收机大多数是全固态化。选择管子要考虑价格、寿命、可靠性、工作参量、冷却方式、体积、重量以及外部设备（电源、调制器、激励器、隔离器、磁铁、控制设备等）。在每单元一个管子的系统中还要考虑管子间参量的一致性以及外形是否适合等。

在用单管输出的大功率相控阵雷达中（采用空间馈电反射型天线阵），可以选用速调管。到现在为止，速调管仍然是微波管中能提供最大脉冲和平均功率的管子。在高功率下，它的带宽约10%，效率约为50%，并具有结构简单的优点。但在较低功率下，它的带宽受到限制。因此，在中等功率或采用多个输出管的相控阵雷达中就不采用速调管。

在P和L波段，还可采用大功率的同轴管（一种内腔四极管）或陶瓷三、四极管。这类管子的相位稳定性好，总效率约50%。在每单元发射的系统中，采用中功率三、四极管，它的结构简单，体积小，辅助设备简单，成本低，便于大量生产。此外，它的阳极电压低，对负载失配和环境温度变化不敏感，寿命可达几千小时。

在L波段以上，三、四极管不易做到在较大功率下有适当的寿命，同时增益低，降低了整机效率。因此，作为大功率输出的单管宜采用速调管。作为中等功率或采用多个输出管的相控阵雷达中的就需要在行波管和正交场放大管之间进行选择。

行波管单管能得到60分贝的增益可以减少放大器的级数，使设备简化，提高可靠性。慢波结构中有衰减器，一般不需要外加环流器。正交场放大管的增益低，一般需与行波管组成放大器链，而且它是双向器件，必需外加环流器或隔离器。

正交场放大管的主要优点是工作电压低（为同样功率行波管的1/3），脉冲功率100千瓦的管子电压为10—12千伏，效率最高可达80%以上，可使用冷阴极，并在直流下工作。与行波管相比，它具有相位稳定性高、体积小、重量轻等优点。

正交场放大管和行波管都能得到10%以上的带宽，寿命达几千小时。冷阴极重入式正交场放大管利用控制电极，非重入式代玛管甚至不需控制极。注入式非重入正交场放大管和行波管可用栅控（后者在大功率下可用调制阳极）进行直流工作。

因此，在L波段以上，在地面固定相控阵雷达中可选用行波管，取其整机结构简单。可运输的轻便式相控阵雷达可以选用冷阴极正交场放大管，取其轻、小和电源电压低。这些管子的峰值功率1~10千瓦，带宽10%左右。增益20分贝以及工作比达到5%。可用光刻或化学沉积法来制造这类管子的慢波结构，并在管内引入分布的铁氧体隔离器，既省去外加隔离器及其引起的损耗，同时还可改善管子的性能。

半导体器件的功率虽然远敌不过电子管，但通过增加相控阵雷达的单元数来加大其总功率，也可能取代微波管。这里，顺便指出，全固态相控阵雷达和采用微波管的雷达有下列不同点：

1. 半导体器件电压最多几十伏，因此，150千瓦的全固态系统需要10⁴安培的电流，引起一系列大电流的问题。

2. 有效负载相位变化和严重失配对固态器件的影响较大，必须加入隔离器。
3. 半导体器件可以和微波集成电路相结合，可以做得小而轻，适合于机载之用。

国外在机载相控阵雷达上已开始使用全固态化器件。估计在这方面今后还会有所发展。

五、速调管设计上的进展

1. 静电聚焦速调管^[12]

目前，已研制出从分米波到X波段功率电平从几瓦到1兆瓦的静电聚焦速调管。由于静电聚焦速调管的重量轻、尺寸小以及效率高（最高达70%），故已成为电子管中一种重要的微波放大管。这类速调管的结构和工作性能与一般速调管相似，不同之处在于其电子注不是用磁场而是由一组静电透镜来聚焦，如图4所示。所有的透镜都设计成工作于阴极电位，所以不需要单独的透镜电压电源。

静电聚焦系统具有以下几个优点：

(1) 因为透镜与阴极相连，而使电子注在相当宽范围内的电压下都能保持聚焦，所以它有宽的输出功率范围。

(2) 透镜相对于电子注处于负电位，所以从电子注中心吸取正离子。这就避免了离子

振荡引起的噪声以及离子对阴极的回轰。实测结果表明静电聚焦速调管的噪声特性优于一般的速调管，同时也避免了离子回轰对阴极的损伤。

但是由于静电聚焦系统对电子注导流系数的限制（在1微朴以下），故它的瞬时带宽要比一般速调管低一些。此外，由于透镜与腔体间的最大耐压和导热能力也限制了这类速调管的最大峰值功率输出和最大平均功率输出。

近年来设计上的改进主要是体现在利用了数字电子计算机来进行设计。这样就可以考虑空间电荷力的影响，精确地求得电子的运动轨迹，从而大大提高电子注的通过率，同时也改善管子的高频性能。

为了得到稳定的电子注聚焦，静电聚焦的周期（亦即相邻透镜间的距离）通常被限定在某一有限值。这个数值和直流电子注功率成正比，而与电子注导流系数和频率成反比。透镜间的距离必须为透镜提供足够的耐压特性，并为腔体提供足够的腔板厚度，以保证适当的导热能力。其余的空间决定了腔的高度。解腔体间距离与输出功率、电子注导流系数和频率的理论公式以及腔高、电压梯度和热导公式，可得出如图5和图6所示的功率限制曲线。

图3表示1~10千兆赫的静电聚焦速调管的最大峰值输出功率。图4表示具有适当的电子注导流系数（ ≥ 0.4 微朴）的静电聚焦速调管的最大连续波输出功率。

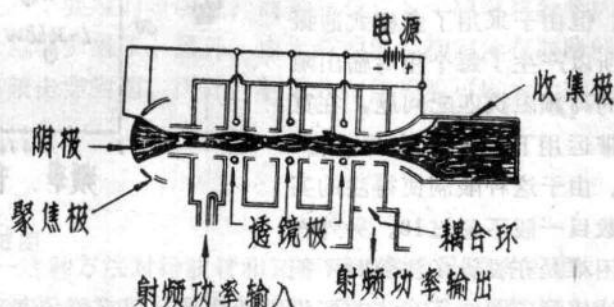


图4

2. 速调管功率的提高^[13]

为了满足超远程雷达、大功率粒子加速器以及其它方面应用的需要,要求进一步提高速调管的连续波或脉冲峰值输出功率。在这方面,曾尝试将一些速调管并联使用,且使其从一个单独的机构中输出。但由于中间腔体的热漂移,故在并联运用中很难达到适当的相位同步和高的稳定性。

为了解决这个问题,六十年代初期便开始着手研制多注速调管,即在一个真空管壳内包含着多个平行的电子注,并使它们相应的腔体紧密耦合。采用多注速调管的好处是可以降低工作电压,解决了多个单管并联运用中的相位同步问题。但由于采用了多模式谐振腔所以产生了每个注与输出隙缝的高频阻抗匹配问题,在宽频带运用下这个影响更为严重。由于这种限制使得注的实际数目一般不超过10。另外一个困难是在设计多注管时不能

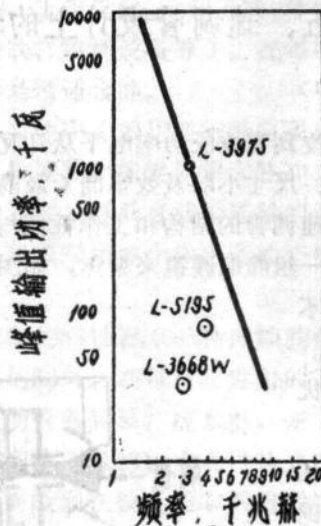


图5

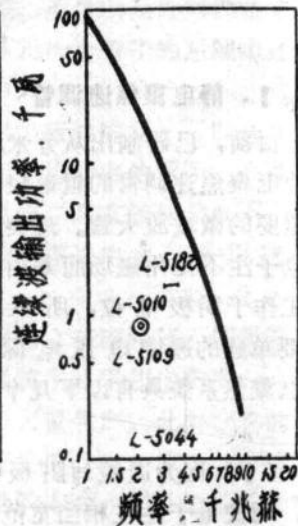


图6

设计使管内围绕每个注的聚焦磁场都具有很完善的圆形对称。因此,总的截获电流将加大。再加上机械结构上的复杂性,故在一定功率范围内多注速调管的性能并不比单注速调管优越。

现在,我们可以举出一个例子来加以说明。设一个单注速调管的功率输出为 P_0 , 电压为 V_0 , 电流为 I_0 。若制成一个10注管,则输出功率为 $10P_0$ 。但若在单注管内,保持电子枪和漂移管直径不变,将电压增到 $V = 2.5V$, 阴极尺寸增大一倍,即 $A = 4A_0$, 那么,若保持导流系数不变,则

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{3/2} = (2.5)^{3/2} \approx 4$$

聚焦磁场

$$\frac{B}{B_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{1/2} = (2.5)^{1/2} \approx 1.6$$

可能的电流截获在单注管内会加大很多,但由于采用了高压,与此同时并加大漂移管直径和隙缝距离而不致降低注与高频场的耦合作用,这样就可以减少电流截获和线路损耗,也较容易解决冷却问题。这个单注速调管的功率输出 $P = VI = 10P_0$, 它的缺点是电压提高到2.5倍,磁场提高到1.6倍。可是,另一方面它的机械结构简单,电子注阻抗较低 $\frac{V}{I} = \left(\frac{2.5}{4} \right) \left(\frac{V_0}{I_0} \right) = 0.62 \left(\frac{V_0}{I_0} \right)$ 。这在理论上便具有较大的通频带,达到

$$\frac{1}{0.62} = 1.6 \text{ 倍。}$$

漂移管加粗之后,在单注速调管内可能产生寄生振荡,另外,电压提高到如超过20万伏则会导致严重的X光辐射。因此,作者倾向于这种看法,即在极高的输出功率的要求下,X波段超过1兆瓦(连续波),S波段超过30兆瓦(脉冲波),采用多注速调管比较有利,否则还是采用单注管。在这样巨大的功率下,输出窗和线路的损耗是一个严重问题,故最好是考虑多路输出以减轻窗和线路的负担。

单注大功率速调管目前最有代表性的是X3030管。在8千兆赫可得到1兆瓦的输出功率。在这类管子的输出级采用了分布作用腔的结构^[14]。分布作用腔实际上是一个多间隙的作用腔(也称耦合腔),也就是一段两端短路的慢波系统。它可以加在速调管的前级、中间级或末级。但用在末级对管子的功率和效率的提高以及通带的展带最为有效。

分布作用腔中与一般速调管谐振腔中的高频场都是驻波,但在分布作用腔中与电子注作用的纵向高频电场不是集中在一个狭窄的隙缝里,而是分布在N个隙缝或较长的一段区域里。因此,与电子作用的区域被扩展了。另外,由于高频电场均匀分布而降低了腔中的电场强度,也大大减轻了高频击穿问题。因此,利用分布作用腔可以大大提高单注速调管的功率。

3. 速调管效率的提高

提高效率通常有以下几种途径:

(1) 采用降压收集极^[15]——这种方法对行波管和正交场器件也是同样适用。微波管内能量损耗的主要来源是由于换能后的电子仍具有相当一部分功能。它们打上收集极就变成热能。这些电子从输出隙缝出来具有不同的动能。设隙缝的电压为 V_s ,电子的动能相当于 V_e 电子伏特,则能吸收电子的收集极最低电位为 $V_{e\text{最小}} = V_s - V_e$,如果收集极电位, $V_e < V_{e\text{最小}}$,则电子走了一段途径将返回隙缝;若 $V_e > V_{e\text{最小}}$,则电子将以一定速度打上收集极,还是变为热能损耗。所以,最理想的办法是通过一个外加偏转磁场将换能后的电子按其速度分为若干“群”,使每一“群”的电子能打上具有适当的最低电位的收集极,这样,在理论上便可以将换能后的电子动能全部收回。曾经有过多到10级的降压收集极的管子设计。但实际上这种管子的结构和电源都很复杂,不一定可取。一般采用单级或双级的降压收集极。单级降压可以将效率约提高10个百分点。但如果管子的群聚原来就比较好,效率原来就比较高,那么采用降压收集极的效果将不显著。

在降压收集极内应采取一些措施(如加涂复层或将极内加槽等)来防止次级电子返回作用区引起整管工作的不稳定。

(2) 利用谐波功率改善群聚——为了提高效率,就需要使电子群聚得更有效。在理想情况下,如果所有电子能以同一速度到达输出隙缝,在高频场的适当相位以极紧密的群聚进入隙缝,并在极短时间内将速度降为零,以防止场的反向作用,那么,与隙缝场的能换效率就可以达到100%。为了达到这个目的,曾有人提出不少建议。譬如说,如果在中间的调制隙缝用一个锯齿波来代替普通的正弦波,那么,从电子运动的观点来看就可以改善群聚。为了要得到锯齿波的调制波形,就需要在中间级的调制腔注入二次谐波,甚至三次或高次谐波。Varian公司曾在输入腔之后加上一个腔体,使其谐振于二

次倍频。依靠电子注流过在这个腔体隙缝上产生二次倍频的电场以改善群聚,从而得到近80%的效率。此外还有人提出通过加长漂移区⁽¹⁶⁾,利用二次空间谐波的电场力以代替注入的谐波场来产生较好的群聚,这就要整管较长,但对宽频带速调管还是可以应用的。上述这些方法虽然复杂,需要应用电子计算机求大信号分析的解,但为了提高效率,这样作还是值得的。

(3) 采用分布作用腔作为输出级⁽¹⁴⁾——一般速调管效率为30~40%,采用分布作用腔以后效率可提高到40~65%,其理由可以解释如下:

(a) 电子注同分布作用腔内分布的高频场作用比较均匀,换能较充分。

(b) 在分布作用腔中,空间电荷力的作用可以减小速度零散,因而允许有更高的高频电压,而不致产生电子返转。

(c) 分布作用腔的 R/Q 值为一般单腔的3~5倍,因而提高了迴路效率。

(4) 其它方法——包括在输出隙缝或其以前加以速度跳变,目的是为了减小群聚中电子的相对速度零散。另外,在输入级或中间级采用双或多隙缝腔改善群聚也可达提高效率的目的。

4. 速调管通带的展宽

速调管的理论指出它的带宽决定于输出腔的参数 M^2R/Q ,其中, M 代表一个电子注与隙缝场相互作用有效程度的量。 R/Q 代表腔体的特征阻抗。如果输出级采用分布作用腔,它的 M^2R/Q 值高达200~300(一般输出腔的 M^2R/Q 为50~80),这意味着它本身就有较大的带宽。

如果分布作用腔的两端不短路,这就构成了一个行波型的输出电路,可使它的相速和电子注同步。这样的速调管称为行波速调管(Twystron)。它在3千兆赫已做出10兆瓦,在7千兆赫已做出5兆瓦功率的管子。若使前面几级腔体参差调谐,并适当调整电压,则不仅加大了带宽,而且也提高了效率(可达10%的带宽,40%的效率)。但必须指出,特别是在高功率和高导流系数的管子中,输出级通常容易产生带边振荡。

采用多注管的结构形式时,通常将输入和输出级做成行波型,而中间各级则采用参差调谐的腔体。这种多注的行波速调管可以达到采用参差调谐的单注速调管的效率和带宽水平,但平均功率可以大得多,当然,它还有多注管本身存在的一些困难。

除此之外,最近还报导了两个S波段大功率宽频带8腔速调管⁽¹⁷⁾。它在前级的腔体采用参差调谐,在最后一级采用复合的谐振型的滤波电路。其中的一个管子能在20兆瓦峰值功率、30千瓦平均功率和30%的效率下给出1分贝的10%的带宽。另一个在8兆瓦峰值功率、200千瓦平均功率下也给出10%的带宽。从这些管子都能得到较好的稳定工作特性。

六、行波管设计上的进展

1. 采用轴向导电屏蔽的宽带行波管⁽¹⁸⁾

在一般采用螺旋线作为慢波结构的行波管中,都取 γ_{ra} 之值在1与2之间,为了要得到宽频带运用,需在螺旋线外加上一个导电的屏蔽筒以减小其相速的变化,使电子注能和行波在一个相当大的频率范围内达到同步。

理论设计指出, 如果将屏蔽筒的导电方向局限在沿轴方向, 那么这种螺旋线的色散特性可以得到进一步的改善, 图 7 示出当屏蔽筒半径与螺线半径的比值 r_s/r_a 在几个不同数值下, 采用一般屏蔽筒和轴向导电屏蔽筒时, 螺旋线归一化相速随 r_a 的变化。这些曲线表明, 当屏蔽筒相对靠近螺旋线 (γ_s/γ_a 的值较小) 在较小的 r_a 值范围内速度的色散特性可以得到显著改善。

从图上也可以看出, 当 r_a 较小时, 具有屏蔽比为 2 的轴向导电屏蔽和屏蔽比为 1.5 的一般屏蔽差不多对改善色散有同样的效果。这是很重要的, 因为屏蔽比大就意味着有较高的耦合阻抗。亦即有较高的效率和较大的单位长度增益较大。

图 8 示出了一个具有轴向导电屏蔽筒的螺旋线的具体结构。图 9 示出了在不同屏蔽比下在 $0.5 \leq \gamma_{ra} \leq 1$ 范围内计算和测出的相速特性。

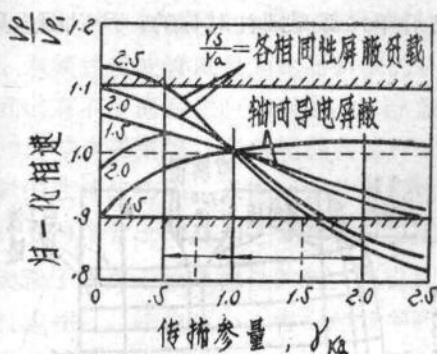


图 7

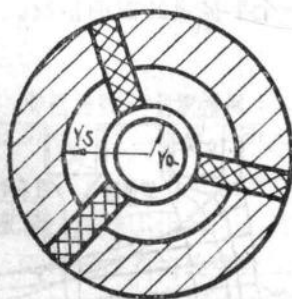


图 8

将 γ_{ra} 选在 0.5 和 1.0 之间对提高耦合阻抗有好处, 这时 K 值比 γ_{ra} 在 1 与 2 之间要大一倍 (见图 10)。特别是将屏蔽比从 1.6 提高到 2, 更可以进一步将耦合阻抗提高一倍, 这样可使电子效率从 20% 提高到约 30%。在这种倍频程功率行波管中, 为了提高效率还需要采取速度渐变 (或电压跳变), 以使电子和相速产生再同步。另外, 采用多级降压收集极, 可将管子效率提高到 40%~50%。这些问题不在本文介绍之列。

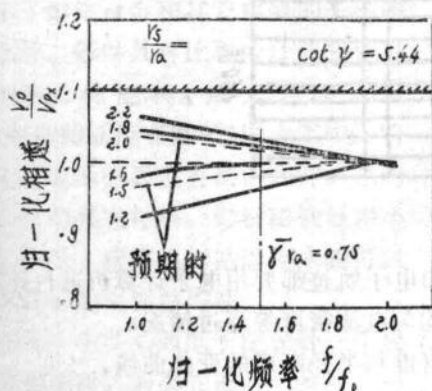


图 9

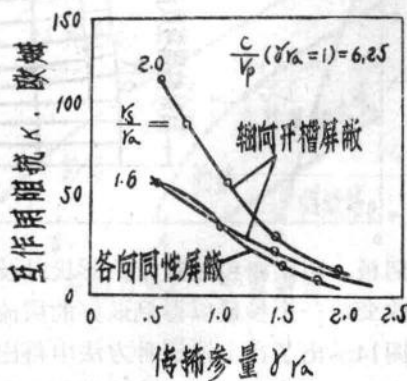


图 10

2. 非截获式栅控电子枪的设计⁽¹⁹⁾

在大功率脉冲微波管(包括行波管和速调管)中,采用了高电流密度的收敛型电子枪。若采用阴极调制技术,对脉冲调制器的体积、重量和调制管等往往有较高的要求。目前已采用高放大系数的栅极脉冲调制技术,但由于栅极截获一般达总电流的15~20%,因此栅极调制只限于小功率管。

为了减小栅极截获,国外正在研制非截获型的控制栅。具体作法有下列三种:

(1) 在控制栅和阴极之间放上一个靠近阴极并与阴极同电位的阴影栅(或屏蔽栅)。

(2) 将阴影栅直接贴在阴极表面上。

(3) 阴极表面面对控制栅处加上不发射的涂层。

图11、12、13分别代表上述三种情况下,在一个发射单元(即对应于控制栅的一个孔)内的等位线分布和电子轨迹。由于每个发射单元都是圆柱对称的,所以图上只画出了它们的一个半径上的截面情况。

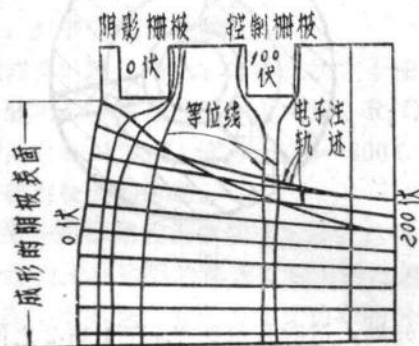


图11



图12

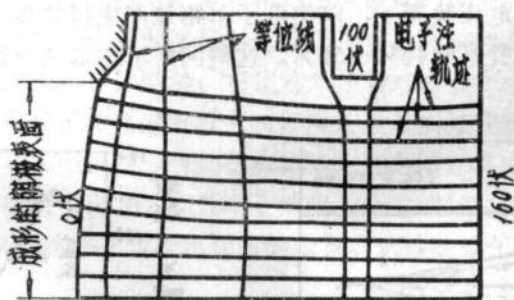


图13

阴极、阴影栅和控制栅的形状以及等位线和电子轨迹都要用电子计算机进行计算。通过改变每一个参量以得到最好的层流特性和均匀电流密度等通过情况。

图14示出了在上述三种方法中得出的电流密度与半径距离的变化曲线。

在这几种方法中,困难的是要找到在高温下不发射或发射很小的栅极材料及涂层。最有希望的材料是钛、锆、二硅化钛和二硅化锆、碳化钨等。