

第六届学术报告论文集

上 册

1987.5.



西北电讯工程学院科研处

目 录

特邀报

微机电器件的发展.....	吴鸿适	1
非均匀的机随机的介质中波传播的正问题和逆问题.....	王一平	12
多处理机系统的研究和实践.....	蔡希尧	81

信息工程系

跳频技术在短波通信的一种应用.....	刘增基等	1 - 1
用旋转变换解Yule-Walker方程.....	戴善荣 李宝柱	1 - 8
有限离散正交变换的代数基础.....	张公礼	1 -23
运动目标识别系统.....	陆心如等	1 -37
双微机数字信号处理器.....	丁玉美等	1 -45
几种CCPLL电路分离解调共道FM信号的性能.....	张厥盛等	1 -54
干扰抵消技术原理的应用.....	杜武林	1 -62
非线性失真测量新方案——自动化失真仪.....	邹国杨等	1 -69
高等院校学生事务微机管理系统的设计与实现.....	王永康	1 -88
二元接入信道的唯一可译码.....	王育民	1 -98
纠错码中的几个重要问题及其最近进展.....	王新梅	1-105
利用微机实现话音和数据同时传输.....	李兵兵等	1-112
高压冲激脉冲发生器.....	常义林 龚俊	1-119
论计算机组网中的资源共享问题.....	林生	1-126

电子工程系

电感量的直读数字显示.....	陈经福	2 - 1
电子线路优化设计中设计变量的选取问题.....	任桂兴	2 - 6
关于奈曼——皮尔逊准则的注记.....	赵树杰	2 -11
模糊信息处理的塔形结构.....	谢维信	2 -16

雷达整机实习的组织实施及体会.....	郑宝珠 章潜伍	2 -22
雷达二次视频图象的实时裁取算法.....	许录平 李万宏	2 -30
MULTIPLAN 与高级语言的数据转换.....	李万宏	2 -37
弹丸结构特征量测系统.....	王立真	2 -44
教师系统的状态方程模型.....	宁德育	2 -51
含微机的系统设计开发要走向系统化、工具化、规范化.....	陈怀琛	2 -68
卡尔曼滤波用于时变采样周期的被动跟踪系统.....	杜文启	2 -74

计 算 机 系

BRC-2型工业窑炉微机控制系统的设计与实现.....	王宝树等	3 - 1
线性系统的状态能控性研究.....	张军英	3 -11
有根树上的图装填.....	张泽增等	3 -18
软件工程——既要重视开发应、又要重视基础理论研究.....	陈家正	3 -25
用多微处理器控制绘图机速度.....	高有行	3 -31
功能分布式多微机系统在数控技术中的应用.....	杨志诚	3 -39
直线电机驱动横梁式平台绘图的技术措施.....	周利华	3 -46
PVC 聚合反应微机自适应控制系统.....	于崇标等	3 -50
一种微机多窗口人机接口组合软件MWS.....	陈 平	3 -57
一种较通用的交叉汇编程序——纯软件构成的单片机开发系统报告之二	吴 华 金益民	3 -63

电 子 机 械 系

工程结构的可靠性分析——一种高维概率积分的近似算法	李 亮 叶尚辉	4 - 1
一种新的优化方法及其在双反射面天线机电一体化设计中的应用	徐国华 漆一宏	4 -12
工程结构优化设计的算子范数极小化方法.....	徐国华 段宝岩	4 -17
天线付面(馈源)支撑结构的机电综合优化设计.....	刘京生 曾余庚	4 -29
大型天线结构风振反应的动力可靠性分析.....	陈建东等	4 -37
双弯曲反射面天线风压的实验研究.....	李在贵 邱 杨	4 -46
使用IBM-PC机来测量陀螺仪的参数.....	季维发 李正根	4 -61
HSP3609—212A型高速打印机的软件分析.....	陈其昌	4 -73
二维几何构形、剪取与遮盖消隐.....	姚传治	4 -84

立轴式雷达结构动态特性分析	刘庆云 黄一红	4 - 98
---------------------	---------	--------

技术物理系

Fe:LiNbO ₃ 晶体中的DFWM相位共轭特性的研究	石顺祥等	5 - 1
半导体激光的相干测量	许长存等	5 - 6
光纤高温传感器的实验研究	沈忠尧等	5 - 11
Fe:LiNbO ₃ 晶体中双光束耦合特性的研究	石顺祥等	5 - 15
BF ₃ ⁺ 分子离子注入层的退火特性	刘家璐等	5 - 22
离子注入调整CMOSIC阈值电压的计算模拟	张廷庆等	5 - 29
a-Si:H:N的纯化研究	张鹤鸣等	5 - 34
氮化硅界面陷阱效应的研究	王云芝等	5 - 39
氮化硅膜的导电机理	周南生等	5 - 44
丝网印刷ZnTe/CdTe异质结的研究	吴 平 张显焱	5 - 49
我在教书育人方面的探索	孙承永	5 - 61
微电子学的崛起与微电子电路与系统专业的建立	姚立真等	5 - 66
一种用于三维半导体器件模拟程序的积分值方法	张义门 任建民	5 - 69
低频低噪声集成运放XD2531设计和分析	郝 跃等	5 - 77

电磁场工程系

计算微波谐振器导体损耗Q值的广义频率增量法	褚庆昕等	6 - 1
微波平面电路理论及其应用	廖永恩	6 - 6
标准分数法学生成绩计算机管理档案	董树义 王亚平	6 - 16
GTD中绕射场的射线寻迹	刘其中等	6 - 24
弹丸后向雷达散射截面的计算	赵玉韦 续树均	6 - 38
微波生物学效应非热机理探讨	牛中奇	6 - 53
低强度毫米波的生物学效应	李辑熙等	6 - 67
园形微带天线展宽阻抗频带技术的研究	郭渭盛等	6 - 75
Fresnel积分研究及其快速精确计算	李亚平	6 - 82

管理工程与情报工程系

试论市场、情报与企业	徐连科	7 - 1
------------------	-----	-------

浅谈教育领域的质量管理	李 良 能	7 -10
成组技术及其在企业生产系统中的应用	甘友仁 余佐群	7 -25
决策支持系统的系统分析方法——ROMC	王亚芬	7 -32
组织研究生开展研讨教学的体会	王亚芬	7 -36
谈机器翻译的可行性与艰巨性	胡荣安	7 -39
激光全息超缩微存贮技术	张德骥 陆滨灵	7 -45
环境、组织与行为——生态心理学简介	孙晓镛	7 -52
无界报酬马氏决策规划	胡奇英	7 -59
交叉式通用二维布局系统——IGLS	梁新来	7 -66
信息系统的定义及其它	吕崇周	7 -72

应用数学系

两指标AR过程的修正LS估计强相合速度的进一步结果

.....	卢科学 施仁杰	8 - 1
非对称交叉耦合锁相环路的基本性能分析	周荣星	8 -18
乘性交叉耦合锁相环路及对称情况下的环路性能分析	周荣星	8 -27
数学教学中的启发诱导方法	徐肇钦	8 -35
一个新的连分式算法及其收敛性	陈开周 王孔明	8 -40
分式规划的对称对偶性	刘三阳	8 -55

社会科学系

胡适的“好人政府”试析	唐兆顺	10- 1
巴黎和会中国代表团新考	董建中 刘兴潮	10- 3
宋美龄在和平解决西安事变中的作用	李学诗 董建中	10- 8
按照哲学自身的特点改革哲学教学初探	赵伯飞	10-13
按照美的规律塑造一代新人——试论美育的几个问题	谭炳坤	10-19
试论归纳过程	肖子健	10-27
现代非决定论的兴起和机械决定论的彻底破产	汪向阳	10-33
当代西方社会思潮对科学社会主义的挑战	张维周	10-38

物理系

应用电荷按曲率分布函数解静电场边值问题	罗恩泽	11- 1
---------------------------	-----	-------

重建电导率剖面的时域推进技术和近似方法.....	葛德彪	11-13
对薄膜溅射中 $r-z$ 曲线周期性的理论解释.....	景俊海	11-15
单键离子型分子离子性公式.....	郑茂盛 罗恩泽	11-23
水泥全黑生料配料微机控制系统.....	叶 明	11-25
温度场的静电模拟.....	王一平	11-27
SchwaYz—Christoffel变换的幂级数展开Pade逼近及应用	程登辉 肖景明	11-30
几种导电胶的性能研究.....	李 佐芝等	11-37
一氧化碳(CO)气敏元件的研制.....	蔡可芬	11-40

研究生部

Rice杂波下的杂波图恒警处理器.....	戴树荪 张义忠	12- 1
用位片设计可编程的时控电路.....	彭学愚 李万岩	12-10
以微机为处理手段的心功能检测仪.....	李 兴等	12-19

电子工程研究所

自适应天线旁瓣相消中的几个实际问题.....	张守宏等	13- 1
最小平均P次误差自适应算法族.....	张玉洪 保 铮	13- 8
奇点复FIR数学滤波器的简化格型实现.....	张玉洪 保 铮	13-16
高分辨空间谱分析技术及其存在的若干问题.....	高世伟 保 铮	13-23
一种高性能的可编程雷达信号处理机.....	吴顺君	13-36
对改进Booth算法的分析.....	彭春林	13-48
服装企业计算机软件的开发.....	张茂宝	13-54
自适应格型最佳雷达信号处理器*.....	张玉洪 保 铮	13-66
自适应天线旁瓣相消中的空间相关和统计相关.....	沈福民	13-75
秩和检测器与秩二进积累检测器的研究.....	张茂宝	13-84

计算中心

参数曲面片拼接的高次几何连续条件.....	毕文义等	14- 1
实域上 2^D 型组合极小化FFT算法.....	毕文义等	14- 5

运用 DBASE 的宏代换函数 “&” 增强管理程序的功能和灵活性	藏明相	14-12
--	-----	-------

电 路 教 研 室

二维谱因式分解的计算及其在递归数字滤波器设计中的应用	郭 云	15- 1
符号网络函数用于模拟电路故障诊断的新途径.....	杨林耀 王松林	15-12
定向图的对偶关系.....	陈士贤	15-23

微波电子器件的发展

吴 鸿 适

一、引 论

微波泛指波长在1米($f = 300$ 兆赫)以下的电磁波。上限到毫米波。波长在1到0.1毫米之间则为亚毫米波,与远红外已接近。

随着无线电电子学会事业的发展与应用的推广,如通信、导航、雷达、电子对抗、广播电视、工农业产品加热、医疗卫生、天文观测、地质探矿、大地(含海洋)遥测、物质结构研究等,电磁波谱不断地由低向高扩展。特别是二次大战对雷达的需要,由米波、米分波而发展到厘米波。

毫米波的波长介于微波与红外之间。与微波相比,毫米波具有方向性好、分辨率高和频带宽的优点;与激光、红外等更短波长比,它具有穿透烟、尘雾、云等恶劣气候的能力,基本上可全天候工作。随着现代化武器的发展,对实战武器系统要求有全面的功能,如目标搜索、识别和分类,导弹的制导等。毫米波武器系统可以作得小巧、机动性好、波束窄、天线增益高等。它还具有分辨率高、跟踪精度好和多目标识别,以及有较大的绝对带宽和多普勒频移、抗干扰能力强等优点,最适用于精密制导雷达。毫米波通信用于卫星(Ka波段),可解决频带拥挤问题。从1毫米以上,已发现有70、95、140、和220等千兆赫频率的大气窗口;另外还发现有59~64和126~134千兆赫的吸收窗口,可应用于特殊目的。

二、微波电真空器件的发展过程

为了应用微波,首先需要能产生一定功率输出的微波源,即振荡器;还需要能放大信号的放大器,以上能接收信号的检波器、混频器和变频器等等。

最早的火花放电式的振荡器虽能产生毫米波的输出,但这是一种不相干振荡,没有实用价值。

本世纪初,1904年Fleming发明的真空二极管和1907年DeForest发明的真空三极管为产生相干功率,提供了可能。

当频率高到几十兆赫,即接近微波时,普通三、四极管由于受到引线电感、极间电容以及电子渡越时间的影响,其性能逐渐变坏。空腔谐振器的采用解决了引线电感和极间电容的影响,但电子渡越时间的限制仍然是一个带根本性的问题。

实际上从二十年代开始,人们就对分瓣阳极磁控管, Barkhausen 减速场振荡效应以及电子速度调制原理进行了研究,探讨如何利用电子渡越时间效应。

1938年Varian兄弟发明的速调管标志着电子渡越时间在微波电子管内成功的应用。1939年英国Boot和Randall发明的多腔磁控管,后来拿到美国贝实验

室和麻省理工学院的辐射实验室进行改进，成功地用于当时首创的雷达上。

1948年英国Kompfner发明的行波管，后来在美国的贝尔实验室和RCA等单位进行改进，于五十年代投入实用。

推动这些微波管的发展主要是由于二次大战时雷达的需要，以及随后通信事业的发展。

五十年代是微波电子管发展的黄金时代。在美国好些大学成立了电子管实验室，在许多公司和政府部门也都开展了微波管的研制和生产工作。许多新的想法不断出现，在实验室中进行了大量工作。以下举一些例子：

W型器件，即利用电子旋转时产生的离心力与径向静电场力相平衡的器件。五十年代苏联科学院的切尔诺夫也提出类似器件。

静电周期性聚焦的行波管及返波管。

差拍行波管。在Michigan大学提出，利用电子注中波的拍频产生振荡。

电子注参量放大管。利用Cuccia耦合器，使快回旋波得到放大，导致低噪声。

电子注轰击半导体器件。利用经过几千伏电压加速的电子，在半导体PN结区撞击出几千“电子-空穴”对，得到电流放大。

印刷行波管。利用光刻技术把行波管慢波线及其它部件印在陶瓷基片上。电子注从两个陶瓷片间流过产生互作用。

返波变频管。由返波放大和返波变频以及中频输出部份组成。利用非线性特性直接把高频信号和本振信号在电子注上进行混频，以得到中频输出。

许多新的想法、试验、样管以及小批量生产往往是昙花一现，没有更多的生命力。因为从实用角度，要求管子结构牢固、轻巧、可靠、寿命长、便于实用，具有在增益、带宽、效率、相位、调谐特性以及许多其它特性方面的优良性能。另外，由于六十年代微波半导体器件的发展，取代了大批小功率、低噪声的接收放大的微波管。因此时至今日，真正实用的、有生命力的微波管已不太多。换句话说，从六十年代以后，普通微波管已进入成熟的阶段。

三、当前微波管的形势

已如上述，六十年代以后一直到现在，比较成熟而且定型生产的微波电子管主要有以下几类。

第一大类是行波管，它是微波管中最活跃的一种管型，主要用于雷达、电子对抗、卫星通信等，近年来还不断有新的发展。

雷达用行波管。主要用于放大链式雷达中。功率行波管的许多参量，如增益、带宽、效率、平均功率输出及稳定性，与其它放大管相比都有一定优越性。举一些数据为例。

大功率脉冲行波管，最低工作频率400兆赫（QKW1630，峰值功率41千瓦，增益40分贝）。频率和峰值功率最高的是VTA-S700， $f = 34.5 \sim 35.5$ GHz，

$\hat{P}=30\text{KW}$, $\bar{P}=3\text{KW}$, $G_{\text{sat}}=50\text{dB}$, $V=47\text{KV}$ 。一般大功率行波管的增益 $G=35\sim60\text{dB}$, 带宽约 10% , 最高效率为 48% (一般为 10%)。

中功率脉冲行波管, 工作频率为 400MHz 到 18GHz , 带宽从倍频程到百分之几十, 增益 30 到 60 分贝, 效率约 20% , 峰值功率 $1\sim10$ 千瓦, 用于宽带电子对抗系统、火箭自动制导系统和机载多普勒系统。

机载雷达中处理多普勒信息技术的能力取决于行波管, 特别要求高功率和高效率。在电子防御和功率控制等模式应用中, 需要变换波形。如空对空模式需低峰值功率和高重复频率; 而空对地模式则需要高峰值功率和低重复频率。但二者都要求有大的平均功率。

需要发展多模工作和用计算机控制的可编程序工作的行波管。可根据目标大小、距离、敌情、飞机燃料的约束以及对功率的要求来改变脉冲和重复频率。

电子对抗用行波管。用于电子支援措施 (ESM), 反电子措施 (ECM) 以及电子防御措施 (ECCM)。要求倍频程的带宽、 $1\sim3$ 千瓦的平均功率输出, 峰值与平均功率之比为 $8\sim10$ 分贝。

空间行波管。用于通信卫星、直播电视卫星和星际空间飞行器。要求高效率、长寿命、高可靠、体积小、重量轻等。目前的空间行波管已在 12GHz 达平均 400 瓦输出, 在 20GHz 达 75 瓦输出。效率高达 $40\sim55\%$, 增益达 $40\sim60$ 分贝, 寿命达 $10\sim15$ 万小时 (合 $11\sim16$ 年)。多级工作时有几千兆赫带宽和线性无失真的性能。正在研制的有 40 和 85GHz 的 200 瓦行波管。

地面站行波管。要求大平均功率、宽频带以及良好的付特性 (如失真小、对增益波动、调幅调相转换、剩余调制等均有特定要求), 还要求高可靠。目前达到的水平, 在 10GHz 以下, $\bar{P}=10\sim14\text{KW}$; 在 14GHz , $\bar{P}=5\text{KW}$; 在 38GHz , $\bar{P}=1\text{KW}$ 。带宽约 $3\sim10\%$, 增益 $25\sim35$ 分贝 (窄带宽的达 $40\sim50$ 分贝)。

第二大类是磁控管。除去民用微波炉磁控管外, 其产量和销售额仅次于行波管。主要品种有普通磁控管、同轴与反同轴磁控管、机械和旋转调谐磁控管、电调磁控管、信标磁控管等。近年来电压调谐磁控管已被固态器件所取代。

已研制出磁控管各项参数的最高指标分别为: 频率达 200GHz (相当于波长 1.5 毫米), 峰值功率 30 兆瓦, 平均功率 100 千瓦, 效率 $85\sim90\%$ 。举一具体例子, 当 $f=115\text{GHz}$, 峰值功率 3 千瓦的磁控管已经制出。

各种调谐方法普遍被用来提高雷达发射机的抗干扰性能。常用的有步进电机旋转调谐, 或用一功率源通过真空密封管壳由电磁传感器激励调谐叉的运动以实现频率捷变。在电调谐方面还有电子倍增调谐、PIN 二极管调谐等。铁氧体调谐的方法由于铁氧体本身损耗大、影响效率且散热困难, 故使用不多。

第三大类是速调管。最近文献报导不多, 主要是为加速器和托卡马克加热用的超高功率速调管。例如 1983 年美国 Stanford 的 LINAC 中心所宣布的速调管在 S 波段,

$\hat{P}\geq 50\text{MW}$, $\tau=5\mu\text{S}$, $\text{Prf}=180$, $\eta>50\%$, $G>50\text{dB}$, 它工作于 815KV , 导

流系数为2微朴。在2哩长的加速器上同时用了240个这样的速调管。

1985年日本原子能研究所宣布用于JT-60托卡马克上的速调管,在L波段, $\hat{P}=1\text{MW}$, $\tau=10\text{sec}$, $\eta_{\text{sat}}=55\%$, $G=44.5\text{dB}$, 5腔,工作于84千伏和26.4安。其中采用了微计算机控制的脉冲马达高速调谐,调制阳极以及汽相冷却收集极等。

凡是高压大功率器件都牵涉到散热(包括输出窗、腔体、收集极)、电击穿(电子枪区)以及在大反射功率下的稳定工作问题。

第四大类是正交场器件。六十到七十年代报导的超功率连续波泊管(输出425KW,效率75%,带宽8%)用水冷纯铂阴极,现已消失。

但阴极激励的高增益(达30分贝)正交场放大器仍是一种有希望的器件。

在阿波罗登月计划中曾采用了QKS1300泊管,在S波段,用0.5瓦固态器件激励可使其输出2.5瓦。被用来将从月球向地面传送包括电视在内的高数据率的信息。但由于电子的回轰,需用纯铂或钨钨阴极代替氧化物阴极以得到较大功率或较低噪声。

从产量和产值来看,在发达国家,尽管收讯管和黑白显象管的门类品种呈下降趋势,但大部分微波管,光电—电光转换器件及气体激光器件仍在上升。美国1984年真空电子器件总销售额21.5亿美元,比1983年增加4%。其中彩显管10.9亿,微波管为4.77亿美元(其中行波管又占整个微波管的57%)。美国今后重点将抓彩显管和微波管等高技术产品,而将一般产品转到国外。另据报导,从1986年开始,美国在微波管的研究发展的投资将略有增加,重点在毫米波管和回旋管方向。

四、普通微波管在毫米波段所受限制

普通微波管中采用了慢波,即使电磁波相速减慢以与电子注产生同步作用。这种电磁波具有表面波的性质,离开慢波结构表面其幅值按指数函数衰减。为了有效地作用,电子注必须很靠近结构。结构的横向尺寸不宜大,否则高次模衰减更严重。

随着波长减小,结构的几何尺寸、阴极发射电流也随之减小,导致了效率和功率的下降。在毫米波段, P 与 f 的4~4.5次方成正比(在厘米波段, P 与 f 的平方成正比)。此外还有机械加工精度、散热、寿命、高频高压打火和使用可靠性等一系列问题。举集肤深度 δ 的影响为例,对铜金属,在1毫米波长时, $\delta \cong 0.1\mu\text{m}$ 。表面粗糙度若为 $(1/2 \sim 1)\delta$ 时,高频损耗将增加20~60%。

普通微波管在毫米波段所达到的极限数据:

返波管。法国把返波管的频率提高到1000GHz,即 $\lambda=0.3\text{mm}$ 。苏联13个O型返波管系列37.5~1500GHz即 $\lambda=8\text{mm}$ 到0.2mm。

反同轴磁控管。最大功率210KW,在35GHz。

行波管。在35GHz, $\hat{P}=40\text{KW}$, $\bar{P}=9\text{KW}$ 。

属于功率速调管的改进型有EIO和EIA器件,已复盖15~825GHz($\lambda=$

2cm~1mm), 连续波输出功率比反射速调管高1000倍, 可进行机械或电调谐, 还有一些其它优点。

五、快波器件

在快波器件中, 与电子起相互作用的是波导中的快波, 即相速大于光速的波。快波不是表面波, 因此电子无需靠近波导结构的表面。波导结构可以比慢波结构大一个数量级, 电子在中间运行, 这样大大有利于在毫米波段提高功率量级。

与波作用的电子不一定沿轴向前进, 它可以是周期性地回旋前进或摆动前进。为了产生有利的相互作用, 电子运动的周期需要和电磁波的周期满足一定的倍数关系, 可以认为它们是同步的(实际上是准同步的关系)。

以回旋管为例。图1a示回旋管的结构示意。其中电子由磁控注入枪(MIG)的阴极以薄环状注的形式发射出, 作用区为一接近截止的圆波导, 其中电磁波以 TE_{01} 模的形式沿轴向传输。由于轴向磁场的作用, 电子在薄环内打小螺圈前进。图1b示电子轨迹和切向电场分布。

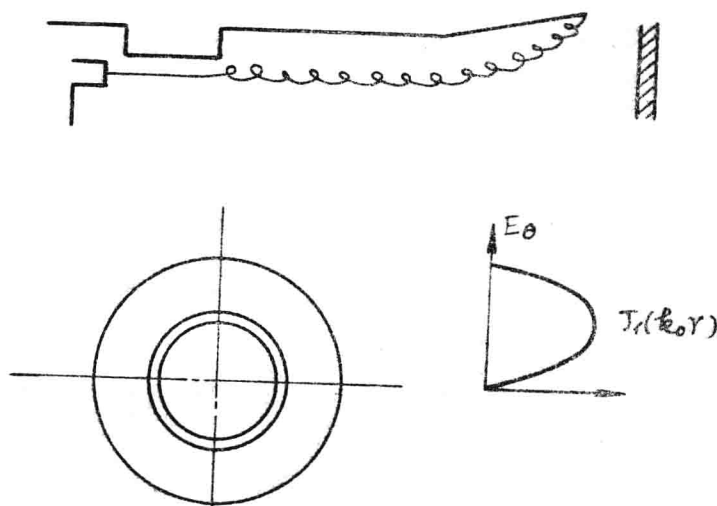


图 1

若将横截面上的一个小圈予以放大如图2a所示, 可以认为电力线是平行的, 并且一开始沿圆圈的电子均匀分布。取8个电子为例。电子回旋的角速度为 ω_c / γ_0 , 其中 $\omega_c = eB_0 / m_0$, $\gamma_0 = [1 - (v_{\perp}/c)^2]^{-1/2}$ 是横向速度的相对论修正因子。也相当于电子质量 $m = m_0 \gamma_0$ 。小圈的半径, 即拉莫半径 $r_L = v_{\perp} / (\omega_c / \gamma_0)$ 。

由图2a看出: 1, 5两个电子不受电场力影响。2, 3, 4三个电子受减速作用, 电子速度 $v_{\perp}$ 减小, 相对论修正因子 γ_0 减小引起电子质量也减小。回旋速度 ω_c / γ_0 增大, 电子相位将超前于波。拉莫半径 r_L 减小, 电子将向内旋转。6, 7, 8三个电

子正好相反, 电子受加速从场中吸取能量, 相位将滞后于波, 拉莫半径增大, 电子向外旋转。如果 $w \geq w_c / \gamma_0$, 在一个波的周期内, 每个电子在空间旋转角度略小于 2π 。经过几个周期以后, 电子将群聚在图 2 b 所示 x 轴的上半平面, 即大部分电子处于减速场内。于是, 总的说来, 电子将能量交给场, 引起波幅值的放大。

回旋谐振条件可写成

$$\omega - k_z v_z - S \omega_c / \gamma_0 \geq 0$$

式中第二项是考虑相对论效应的多普勒频移, 第三项中的 S 是谐波次数。

快波器件中的 Ubitron (Undulated Beam Interaction Device, 摆动注相互作用器件) 以及自由电子激光器 (FEL) 中的振荡, 是基于在泵浦场作用下的相对论性电子的受激辐射。这泵浦场可以是横向周期静磁场或静电场 (如图 3 所示), 或传播的高频电磁场。图 3 示在一横向周期静磁场作用下, 相对论性电子

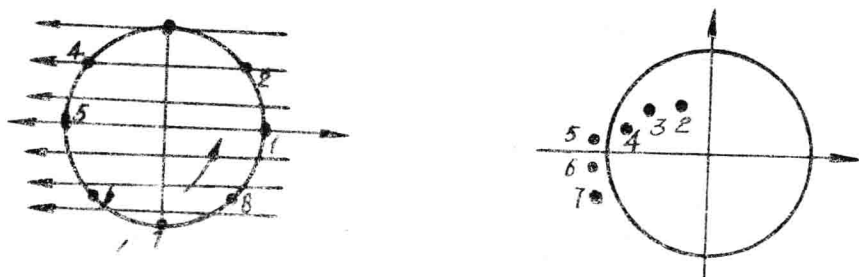


图 2

产生横向周期运动, 导致自发电磁辐射。这辐射场反过来加强对电子运动的调制, 将自发辐射进行放大, 其频率、极化、相位都和原辐射相同, 因此也称为“受激辐射”。

Peniotron 利用图 4 a 所示的双对脊弓波导中所传输的 TE 横快波。图 4 b 示 E_y 场的分布。电子在未进入波导以前

按大圆圈回旋前进。当电子从右边碰到 E_y 减速场, 速度 v_z 减小, 拉莫半径也减小, 电子交出能量, 回旋中心右移。如果 $T = T_c / 2$, 半个回旋周期后, 电子将碰上加速场, 但场的幅值较小, 净结果是这部分电子交能。另一方面, 若电子从右边一开始碰到 E_y 的加速场, v_z 增大,

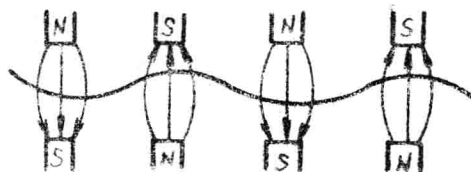


图 3

拉莫半径加大, 电子回旋中心左移。半个回旋周期后, 电子将遇到较大的减速场, 其净结果也是电子交出能量。这种器件的理论效率高达 95%。

Peniotron 的谐振条件是

$$\omega - k_z v_z - 2n\omega_c / \gamma_0 = 0, \quad n = \text{整数}$$

它的结构简单易于调整, 所需磁场比回旋管要小到一半, 瞬时带宽窄, 增益和带宽特性类似于正交场放大器件。还需设计一个合乎要求的薄空心电子注。

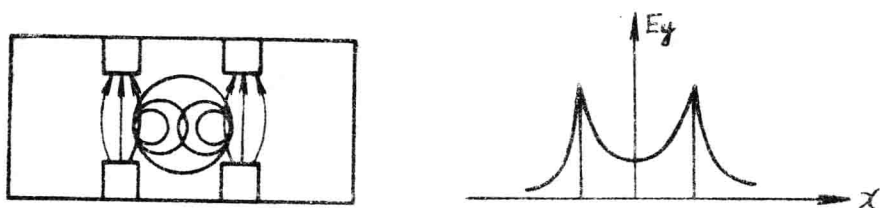


图 4

Gyro-Peniotron是将回旋管和 Peniotron 优点结合起来的一种器件。图 5 示圆波导内 TE_{02} 模的切向场沿半径方向的分布。虚线表示集中在第一个场峰值 $r=r_1$ 处空心注的 Gyrotron 作用，电子注可以较厚得到较大功率。但若将空心注放在 $r=r_0$ ，即电场变向的地方，则离开回旋中心，场将加强，这符合 Peniotron 的工作原理，电子注可以较厚以实现大功率。这种 Gyro-Peniotron 的谐振条件是

$$\omega - k_z v_z - (2n-1)\omega_c / \gamma_0 = 0,$$

$$n=1, 2, \dots$$

分析指出，当 $f=35\text{GHz}$ 采用 TE_{021} 模当 $\omega_0 \cong \omega_c$ ， $U=80\text{KV}$ ， $\eta=63\%$ ， $B=13\text{KG}$ ；当 $\omega_0 \cong 3\omega_c$ ， $U=60\text{KV}$ ， $\eta=48\%$ ， $B=4.4\text{KG}$ ；可以达到降低磁场要求的目的。

表 I 汇总了产生相干辐射的几种自由电子与慢和快电磁波相互作用的器件。表中示器件名称、电磁波模式、电子注模式、辐射（振荡）频率、群聚形式等。图 6 及图 7 中示各种器件的结构示意以及色散特性曲线。

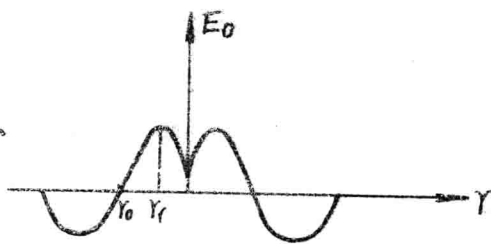
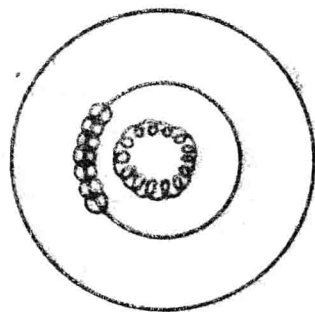


图 5

表 1

器 件	电磁波模式	电子注模式	工作频率	群 聚	文 献
慢 波 器 件					
RELATIVISTIC MAGNETRONS	$\omega = \omega_c$	$\omega = 1 V_\theta / r$	$\omega = 1 V_\theta / r$	AZIMUTHAL	1-11
CUSPTRONS	$\omega^2 = K_z^2 C^2 + \omega_c^2$	$\omega = 1 \Omega_z$	$\omega = 1 \Omega_z$	AZIMUTHAL	12-18
CERENKOV	$\omega^2 n^2 = K_z^2 C^2 + \omega_c^2$	$\omega = K_z V_z$	$\omega = \omega_c [n^2 - (C/V)^2]^{-1/2}$	AXIAL	19-30
SMITH-PURCELL (OROTRONS; LEDATRONS)	$\omega = (K_z - K_c) C$	$\omega = K_z V_z$	$\omega = K_c C / ((C/V_z) - 1)$	AXIAL	31-42
快 波 器 件					
GYROTRONS (CYCLOTRON MASERS)	$\omega^2 = K_z^2 C^2 + \omega_c^2$	$\omega = \Omega_z + K_z V_z$	$\omega = r_z^2 \Omega_z$	AZIMUTHAL	48-59
MAGNETIC WIGGLER FFELS (UBITRONS)	$\omega^2 = K_z^2 C^2 + \omega_c^2$	$\omega = (K + K_0) V_z$	$\omega = r_z^2 K_0 V_z$	AXIAL	60-68
LOWBITRONS	$\omega^2 = K_z^2 C^2 + \omega_c^2$	$\omega = (K + K_0) V_z + z$	$\omega = r_z^2 (K_0 V_z + \Omega_z)$	AZIMUTHAL AND AXIAL	69-74
RIPPLED -FIELD MAGNETRONS	$\omega = \omega_c (l, m)$	$\omega = (l + N) \Omega_z$	$\omega = (l + N) \Omega_z$	AZIMUTHAL	75-79

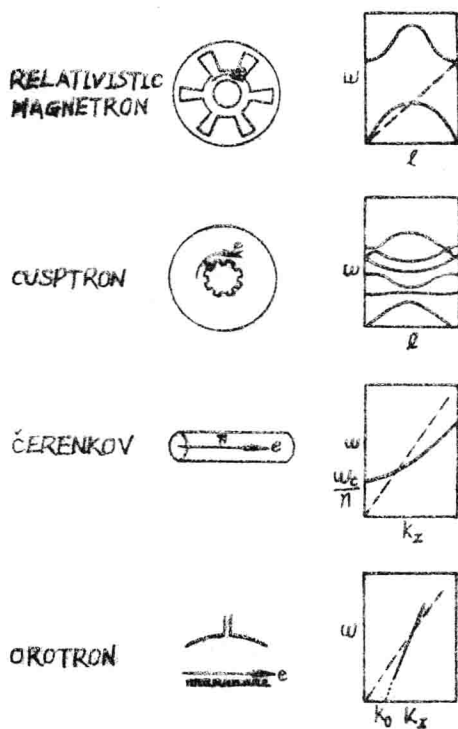


图 6 与慢电磁波的作用虚
线为注模式

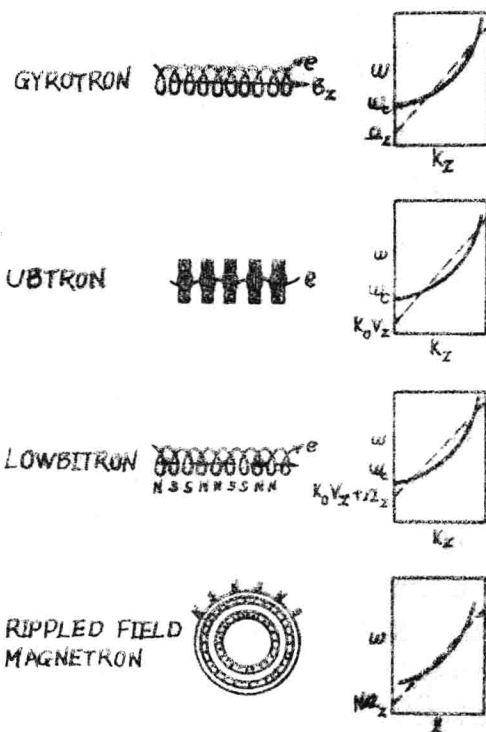


图 7 与快电磁波的作用虚
线为注模式

六、固态毫米波器件

离散的毫米波固态器件有耿氏器件, IMPATT, GaAs 场效应器件及其单片集成以及 TUNNETT 等。材料已从最早的锗、硅发展到 GaAs, GaAlAs, 以及 InP 等。GaAs 耿氏器件最高理论频率为 110 GHz, 现已作到 90 GHz, 30 mW; InP 耿氏器件最高理论频率为 200 GHz, 现已作到 94 GHz, 1.26 mW。Si 的 IMPATT 在 90 GHz 可输出 0.9 W。GaAs 的 IMPATT 则在 40 GHz 达 2.5 W, 效率 21.5%, 可进行功率合成, 并延伸到 $\lambda < 1 \text{ mm}$, GaAs 的 FET 已扩展到 $\lambda = 4 \text{ mm}$ 的放大器, 噪声低和频带宽。以 GaAs FET 为基础的单片微波集成技术把放大、振荡、混频和其它控制作用合为一个子系统。

总的说来, 在固态器件中由于受晶格原子碰撞, 电子速度比真空中自由电子慢 3~5 个数量级。器件面积比真空慢波器件小 10^2 , 比快波器件小 10^4 , 因此其输出比慢波管小 10^3 ; 比快波管小 10^6 。它的工作温度 $< 200^\circ \text{C}$, 因此散热能力差。可以说, 在低功率区, 固态器件占优势, 在中功率区它与真空器件处于竞争地位, 但在高功

率区以真空器件占主导。

近年来,有不少研究工作集中于行波型固态放大器件,这方面有许多设想,也进行了不少实验工作。例如GaAs行波放大器,利用了GaAs体积中的负微分迁移率所产生的增长型空间电荷波。在阴极端微波激励起空间电荷波,它随电子注运动得到放大,然后在阳极处又转换成微波。它的特点是单方向放大,高截止频率(20~40GHz)、高增益和宽频带。

第二类是多注型固态行波放大器,利用多或双电子注空间电荷波相互作用的不稳定性以得到放大。电子注速度是依靠改变与其运动方向相垂直方向的掺杂浓度而得到的。

第三类是分布式单片FET放大器,利用GaAs的MESFET,在倍频程内可得1W的连续功率,并实现20~30分贝增益,进入毫米波范围。这种单片结构可推广到相移器、环流器、隔离器、天线及其它控制部件。

七、微波电子管今后研究的重要领域

首先是改进现有微波管,提高性能以满足国防和国民经济上的使用要求。这些包括提高效率、增大带宽、提高可靠性及寿命等,还包括用栅控的行波管以及阴极调制的正交场器件等。除了需要针对上述要求进行大量的工艺、材料、和试验工作外,还要进行下述理论工作。

1. 深入研究电子与场的相互作用机理。

特别是开展非线性相互作用的研究,不仅是数值地而且解析地求解。某些器件在一定条件下呈现孤立子解。

对磁控管的许多基本现象现在还认识不清,如1961年Okress书中提出的“磁控管问题”,在静态磁控管内实验地观察到截止状态下的阳极电流、电子回轰、过量噪声等现象。由于其中电子运动是随机性的湍流,呈现的非线性特性,无法用微扰理论或小信号理论来解释。

2. 用场论更严格、细致地求解各种高频慢波系统,充分利用计算机进行各种数值计算。

3. 用数值法求解散热问题。

4. 从机电统一观点,求解电、磁、力、热、电子光学各种场耦合的问题,并建立目标函数、泛函、状态方程进行各种参量的综合优化设计求解,这特别适用大功率器件。

5. 将CAT、CAM等广泛用于工艺加工、材料及性能测试的研究上。

其次是发展新型毫米波及快波型电子器件。回旋管目前已研制出28GHz,250KW;60GHz,200KW;140GHz,100KW的连续波管,并向140GHz,1MW管努力。

需要研究高次谐波的应用以减轻对磁场的要求,用渐变波导及磁场分布以提高效率,改进电子枪设计以减小速度零散,提高模谱纯度减小模式竞争,并研制实用的回旋行波