

第一届毫米波、亚毫米波学术年会
回旋管学术及其应用讨论会

论文摘要集

北京一九八一年十月

目 录

第一部分 毫米波和亚毫米波论文

毫米波和亚毫米波固态器件	陈克铭 (4)
毫米波精确制导技术	赵澄谋 (8)
亚毫米激光器的应用	傅恩生 (13)
毫米波雷达	方再根 (18)
毫米波固态器件的研究发展动态	沈克彬、陈效远 (21)
平行介质波导间的耦合	冯正和 (32)
单模和多模倒置介质微带毫米波集成电路	李英、 潘生根 (40)
光泵甲醇亚毫米波寻激光系统	黄 贡、 张锡年、蔡佩佩、徐日长 (44)
亚毫米波段金属网栅和法布里—珀罗干涉仪	张锡年等 (48)
亚毫米波扫描法布里—珀罗干涉仪的工作原理和设计要求	叶伦英 (52)
毫米波谐波混频	高藻新、洪兴福 (56)
三毫米肖特基势垒二极管混频器	郑 东、 王 森、柳吉林、方浦明 (63)
二毫米雪崩二极管混频器	相玉芬、刘衍芳 (69)
三毫米硅 P^+N 二极管混频器	王茂森、黄日晖、 金立荣、黄志远、乔宝文 (77)
四毫米 $GaAs$ 体器件混频器	朱世年、沈怡怡、戴沛然 (81)
ELO 互作用腔中的光干涉	袁广扬、 岳根才、刘忆椿 (86)

毫米波另热式功率计	匡龙海、刘忆椿、周夕祺 (90)
短毫米波的检测	匡龙海、马丹波、周夕祺 (95)
毫米波波导法兰的讨论	匡龙海、周夕祺、马丹波 (102)
毫米波功率合成技术	刘洪为 (105)
亚毫米波技术及其应用	王士杰、孔凡平 (107)
八毫米高方向性定向耦合器设计	王茂华 (113)
两种新型的毫米波波长计	黄冰玉 (119)

第二部分 回旋管及其应用论文

回旋管在聚变等离子体 ECRH 加热中的应用	曹黄强 (123)
回旋管中电子与波非线性相互作用的数值模拟	相祥林、 许大信 (125)
三公分回旋管实验研究	朱锦林、 关 铨、蔡熙章、张文录、俞士萱 (129)
波动方法分析空心圆柱电子回旋脉泽	姚 毅、 陈戈林、张克潜 (133)
平板加载波导系统慢波回旋放大器的线性理论	张晋林、 吴鸿运 (138)
回旋单腔管中高频场分布的优化	张明德、王祖明 (142)
圆波导及全轴波导开放腔的衍射理论	朱锦林 (147)
用于回旋管中的开放式谐振腔的设计	陈增圭 (152)

轴对称变截面式谐振腔的数值介... 程玉琪、林 瑜 (158)

磁控型电子注分析及回旋管电子枪主要参数的测量

张殿杰、卢圣煜、顾树华、蔡熙章 (164)

绝热磁控注入式电子枪的简化模型设计方法 李声沛 (168)

回旋管绝热电子枪速度分散的研究 顾本立、孙小燕 (171)

回旋管电子注能量分布的实验分析 李声沛、江钧基、

张汉英、孙儒生、刘桂芬 (176)

回旋管绝热磁控注入枪的计算机计算 李声沛、夏福根、

刘桂芬、孙儒生 (181)

八毫米回旋管输出窗的研究 师绍明、秦文珍 (186)

回旋管腔体场分布的自动测试 刘成泰、

李汝祯、孟长祥 (191)

长脉冲回旋脉基单腔振荡器参数的测量 阮益华 (196)

回旋管几种磁场方案的探讨 孙 瑜、袁家伟、

朱庆泥、陈魁姜 (200)

回旋管超导磁体的设计 朱庆泥、孙 瑜、

袁家伟、陈魁姜 (203)

回旋振荡管工作参数的最优化 朱 敏 (207)

毫米波技术与回旋管在管控聚变中的应用 刘铁群 (213)

毫米波亚毫米波器件研究与发展概况 李松栢、陈淑淑 (218)

电子回旋脉基不稳定性自治非线性理论 李明光、邓华生、钟哲夫、

姚昌裕、杜品忠、李宏福 (220)

变截面波导开放式谐振腔的研究 徐孔义 (226)

线射辐射振荡器的简介及其动力学理论 于善夫 (231)

第一部分 毫米波和亚毫米波论文

毫米波和亚毫米波固态器件

陈克铭

科学院半导体所

近30年来,许多无线电专家致力于特高频振荡的研究,并将米波,分米波和厘米波的器件应用到实际中去,继之而来的新的电子器件技术发展阶段就是毫米波和亚毫米波器件。

本文在介绍国外毫米波固态器件发展水平基础上,仅讨论各种器件本身固有的频率限制及亚毫米波固态器件的前景预测。

1. 毫米波固态器件的当前水平及其向亚毫米波段发展的限制。

(1) 转移电子器件

目前用分子束外延的GaAs材料做成体效应器件,在90GHz可得到20mW;在100GHz可得到10mW;在110GHz可得到4mW。从体效应物理基础看,在有耗尽区内电子的渡越时间不能短于它在高场下从中心能谷到子能谷的转移和在低场下子能谷的电子返回中心能谷这两个散射过程所确定的总时间,因此,体效应器件的频率上限是由谷间散射所限制。计算机模拟指出,有耗尽区的长度、掺杂浓度和谷间散射及接触类型对效率和频率特性都有直接影响。对于相同的谷间散射率体效应器件的频率上限介于100~200GHz(GaAs)。

(2) Impatt二极管和Mitatt(mixed Tunnel-avalanche transit time)二极管

现已研制成硅Impatt二极管的水平是频率100GHz,

连续输出功率 980 mW ；频率 140 GHz ，连续输出功率 100 mW ；频率 220 GHz ，连续输出功率 50 mW 。 150 GHz GaAs 雪崩隧道混合注入渡越时间二极管能提供连续输出功率 3 mW ，转换效率 0.5% 。但是应当指出，按照碰撞雪崩渡越时间二极管的工作原理，这种器件中载流子的雪崩倍增过程至少应跟上电场强度的变化，因此，载流子的雪崩倍增所需时间和倍增载流子的分佈宽度决定了 Impatt 二极管的频率上限，人们利用有效渡越方程计算出 GaAs 的 Impatt 和 Mitatt 的频率上限分别为 75 和 150 GHz 。

(3) GaAs 场效应晶体管

- 日本东芝公司采用电子束曝光技术，刻制栅长 $0.25 \mu\text{m}$ 电极及减少混一栅寄生电阻方法，已成功地研制出 30 GHz 低噪声 GaAs FET，其噪声系数为 4 dB ，相应增益为 5 dB ，最大有用增益为 8 dB 。法国 Conetant 改善降低沟道渡越时间，同样设计 $0.25 \mu\text{m}$ 栅长的 FET，工作频率可达到 70 GHz ，噪声系数为 $7 \sim 8 \text{ dB}$ 。由此说明，栅长是影响频率上限的主要因素之一，继续缩短栅长将受到工艺技术上的限制。在表压层电流的电子有效迁移率，由于受表压态等影响大为降低，也严重影响场效应晶体管的频率进一步提高，对现有的平压结构进行计算机模拟，其结果表明，GaAs FET 的最高频率可达 $100 \sim 150 \text{ GHz}$ 。

(4) 肖特基势垒混频器

毫米波混频器已进入实用阶段，目前已成功地研制出 230 GHz 肖特基势垒混频器，其单边带噪声温度为 2000 K ，其变频损耗为 9.6 dB 。当器件冷却到 20 K 时，其噪声温度为 300 K ，其变频损耗为 5.9 dB 。频率进一步提高将受到趋肤效应的寄生电阻限制。但是，把现有短毫米波肖特基二极管安放在一个锥

形反射凹的结构腔中，可以实现从 1 mm 到 $170\text{ }\mu\text{m}$ 范围内超外差式混频。

2. 在亚毫米波段下工作的几种固态器件

(1) 隧道注入渡越时间二极管

为了进一步提高频率，就要尽可能地减小雪崩区的厚度。当它小到一定程度时，最后雪崩注入禁止发生，而在这样窄区中还保持充分电场强度下隧道注入占主导作用。这种隧道注入载流子在漂移区中渡越而形成的交流负载的器件称隧道注入渡越时间二极管 (Tunnelit)。目前日本作为研究重点，已研制出 $\text{GaAs } p^+nn^+$ 结构的 Tunnelit 二极管，在脉冲偏置下，振荡频率最高已达到 338 GHz 、输出功率 20 mW 。利用有效渡越时间的唯象方程，计算出 GaAs 的 Tunnelit 的最高频率 $f_{\max} > 400\text{ GHz}$ 。

(2) Si 的 Impact 和 Mitutit 二极管

用具有浓度为 $2 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs 和 Si 的离子率、饱和速度的实验数据计算表明，在 $1 \times 10^6\text{ V/cm}$ 的电场强度下， GaAs 中雪崩倍增建立的时间大于 $5\text{ }\mu\text{s}$ ，而载流子分佈宽度超过 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ ，所以在 100 GHz 下 GaAs 中载流子的雪崩倍增建立跟不上电强度的变化；而 Si 的载流子雪崩倍增建立的时间小于 $1\text{ }\mu\text{s}$ ，载流子分佈的宽度小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ，所以 Si 的载流雪崩倍增建立的时间和载流子分佈宽度仅有 GaAs 的五分之一，因而 Si 的最大频率比 GaAs 的最大频率大 5 倍，因此 Si 的 Impact 和 Mitutit 可能是有发展前途的五毫米波器件。

3. 可渗透基区的非平凸晶体管 (PBT)

1979~1980 年美国 MII 的科学家们提出一种称为 PBT 晶体管，这种结构的主要特征是一个埋在 GaAs 晶体内的钨栅，此钨栅与 GaAs 形成肖特基势垒，在钨栅之外区域的 GaAs 材

料由于质子轰击而成半绝缘体，故从发射区流出的电子流只能经过栅极而到达收集区。这种垂直沟道 FET 的优点是消除了平面型结构 FET 中电子的流动途径中易受表面态和衬底界面态的影响。在 PBT 结构中电子的流动途径完全在体内。另一个更重要的是在 PBT 中不需要套刻，再加上采用 X 射线刻蚀的新技术，栅长可短至几十 $\text{\AA}$ 。依据二维数值分析，可得到最高频率 $f_{max} > 1000 \text{ GHz}$ 。总之这种非平面型垂直埋栅晶体管将是未来主要亚毫米器件之一。

(4) 亚毫米波的倍频器

肖特基势垒二极管的倍频器在 44.7 GHz 可输出功率 0.12 mW ，变频损耗 20 dB ；在 589 GHz 可输出功率 1 mW ，变频损耗 39 dB 当然也可用 Impact 二极管进行谐波输出获得。

(5) Inp 体效应器件

由于 Inp 的谷间散射时间、峰值电场高及饱和速度稍高于 GaAs，计算表明，Inp 器件频率的上限比 GaAs 器件高两倍，那么 Inp 的体效应器件的频率上限可在 $200 \sim 400 \text{ GHz}$ 之间，亦可能成为亚毫米波器件之一。

(6) 亚毫米波的固态混频器

a. 肖特基势垒混频器

通过改进肖特基势垒二极管和腔体的结构，已实现亚毫米波肖特基势垒混频器。当然，亦可利用谐波混频实现亚毫米波接收。

b. 超导约瑟夫逊效应 (JE) 器件和超导体-绝缘体-超导体 (即 SIS) 器件，这两种器件都可以工作在几百千兆赫，但是 SIS 器件的性能优于 JE 器件。SIS 器件是在毫米波接收方面最有前途的器件。

3. 结束语

综上所述，亚毫米波固态器件的成立是可能的，而且很有发展前途。亚毫米波固态流在小功率流的应用中发挥自己的特长，为使亚毫米波固态流起更大的作用，研制极高灵敏度的混频器或探测器是极其重要任务，以 Si Impact 二极管和 Si Tunnel 二极管为最现实，PBT 的潜力为最大。

通过各国科学家在器件新工作原理、结构和材料的研究，不久将会获得更理想的亚毫米波固态器件。

毫米波精确制导技术

赵澄谋

国防科委资料研究所

现有制导武器的制导技术大致上是采用惯性制导、微波(这里指厘米波和分米波)制导和光电(包括电视、红外、激光)制导三种手段，这三种制导手段都各有其优点和局限性(见表10)。

表 10. 现有制导手段的比较

制导手段	优 点	局 限 性	主要应用
惯性制导	不受电子干扰和气象影响	制导精度较低	远程战略和战术导弹
微波制导	全天候作战能力	制导精度较低 易受电子干扰	中、近程战术导弹
光电制导	制导精度高	全天候作战能力差	近程战术导弹

这些制导手段的局限性限制了制导武器的能力，不适应未来战争的要求。有可能改善制导武器能力的技术途径是：毫米波、长波红外以及合成孔径雷达制导系统。

1. 毫米波制导系统的特点

毫米波介于微波和红外波段之间，兼备有这两个波段固有的特性，是高性能制导系统比较理想的折衷选择频段。

毫米波制导系统与微波制导系统相比，它的特点是：(1)制导精度高；(2)抗干扰能力强；(3)体积小、重量轻。而它的缺点是：大气传输和降雨衰减较大，作用距离有限，大雨时难以正常工作等。

毫米波制导系统与光电制导系统相比，它的特点是：受气象和烟尘的影响小，具有“有限的全天候”作战能力；但缺点是：制导精度较低。

2. 毫米波制导的方式

毫米波制导系统具有精度高、抗干扰性能好、全天候能力强的突出优点，早就引起了人们的注意。近年来，毫米波元器件，特别是固体元件的迅速发展，才使毫米波制导系统的实现成为可能。在毫米波段大气传输衰减较小的窗口频段有四个：

35、94、140和220千兆赫，目前毫米波制导系统都是使用35和94千兆赫这两个大气传输窗口频段，而140和220千兆赫频段的元器件还不很成熟，制导系统的应用尚在探讨中。

毫米波制导有五种方式：

- (1)指令制导；
- (2)驾束制导；
- (3)主动寻的制导；
- (4)被动寻的制导；
- (5)半主动寻的制导。

它们可单独运用，也可复合运用。

毫米波主动寻的制导和被动寻的制导都是所谓发射后不用再管的自主制导系统。武田投掷系统向目标发射导弹后就可脱离目标区，不用再管，完全由导弹制导系统自行控制导向目标。它们的应用领域最广，最灵活，不仅可作为近程导弹的制导系统，也可用作各种远射程武田的末制导系统。当主动寻的与被动寻的制导作复合运用时，则可达到更好的效果，即用主动寻的模式解决远距离目标捕获问题，在接近目标时，转换为被动寻的模式来保证精确命中目标。但它们的研制技术较复杂、成本也较高。

根据制导方式的能力、实际需求、技术条件和成本的折衷权衡，五种制导方式都有其适用的特定场合，都是有发展前景的。表2归纳了这五种制导方式的优点、局限性、复杂程度和可能应用的范围。

表之 毫米波五种制导方式的比较

制导方式	制导精度	抗干扰能力	用作远程制导的能力	发射系统的能力	发射系统同时攻击多个目标的能力	对目标的探测要求	对发射设备的要求	弹上处理难易	导弹成本	应用范围
指令制导	距离远时较差	较差	无	差	无	毫米波跟踪雷达、计算机指令传输系统	有线或无线指令接收机	易	低	地对空 地对地
寻束制导	距离远时较差	强	无	差	无	毫米波跟踪雷达	毫米波雷达接收机	易	低	地对空 地对地
主动寻的	高	强	有	强	有	无	毫米波雷达、计算机	难	高	地对地、 地对空、 地对空、 地对空
被动寻的	高	较差	有	强	有	无	毫米波辐射计、计算机	难	高	地对地、 地对空、 地对空、 地对空
半主动寻的	高	较强	无	差	无	毫米波目标照射雷达	毫米波雷达接收机、计算机	较难	较高	地对地、 地对空、 地对空、 地对空

3. 毫米波制导系统的进展

美国、苏联、英国等正在发展的毫米波精确制导武器约有二十种，其范围包括战略和战术导弹、炮弹及炸弹。苏联和英国研制的毫米波半主动寻的制导的 SA-10 和“长剑”地对空导弹已经装备使用，毫米波指令制导、主动寻的制导、被动寻的制导武器的样弹都已试验成功，毫米波驾束制导的反坦克和反直升机导弹也在酝酿发展中。美国毫米波制导武器的发展项目较多、规模较大、技术较先进，比较有代表性的美国毫米波制导武器有：

(1) 战略弹道导弹的毫米波末制导系统，它利用 35 千兆赫辐射计在目标区上空作地图匹配制导，可使导弹命中精度提高到几米或十几米，1977 年机载飞行已试验成功。

(2) 小“黄蜂”空对地导弹，它采用毫米波主动寻的和被动寻的复合的制导系统，一架 F-16 飞机可携带 24 枚“黄蜂”空对地导弹，进攻集群坦克，现已制出样弹，计划 1987 年开始装备部队。

(3) “探测和摧毁装甲车”系统，用在大口径榴弹炮 4 弹的末制导系统中，每发炮弹有三个子弹头，子弹头用 35 千兆赫辐射计作被动寻的制导，已试射七枚样弹，五枚命中目标，击毁两辆坦克，预计 1986~87 年开始装备部队。

4. 毫米波制导系统存在问题和发展趋势

毫米波精确制导系统经过初步研制样弹试验，证明了它的能力，但要达到实用化，还要克服一些技术障碍。

(1) 目前 140 和 220 千兆赫的毫米波元部件还不太成熟。虽然 35 和 94 千兆赫的元部件已基本完备，但电性能、可靠性、小型化、低成本和重复生产能力都有待改善。为使毫米波制导武器的样弹能够大量装备部队，今后重点着重解决毫米波元部件

件自动化生产及降低成本问题。

(2) 毫米波制导系统的另一个突出问题目标是目标识别问题。毫米波的分辨率虽然比微波高，但比红外和可见光要低，对目标的成像能力较差，这给直观地区分目标与周围背景造成困难。今后趋向于进一步加强毫米波目标与背景信号特征的研究和信号处理技术的发展，利用超高速集成电路微处理机从周围背景中分析和提取目标信息，解决目标识别问题。

亚毫米波激光器的应用

傅恩生

上海光机所

亚毫米波的开发是红外和微波科学研究的前沿。亚毫米波激光器的诞生，在一定程度上解决了这一波段区长期缺乏辐射流的问题，亚毫米波的应用也相应地逐渐提到日程上来了。至今，已报导了从 34 微米 (CH_3OH) 到 1.96 毫米 (CH_3Br) 的近 1000 条激光谱线，相邻谱线的间隔绝大多数在 0.2 ~ 1 毫米之间。连续波亚毫米波激光输出功率一般在几毫瓦 ~ 100 毫瓦等级；脉冲输出功率在几千瓦到兆瓦等级。对于远红外光谱学、托卡马克等离子体诊断、非线性光学，光频测量、亚毫米波频率标准，半导体外延层厚度的测量、绝缘电缆质量检验、保密通讯、公安侦破等应用，亚毫米波激光器都是优良的辐射

流。

1. 在分子光谱学中的应用

在亚毫米波区研究分子的吸收光谱是很困难的，因为通常的辐射流功率极微弱，只有微瓦等级，这不仅限制了测试样品的厚度，也为测试结果带来较大的误差。用亚毫米波激光代替通常的辐射流，使辐射流功率提高了几十倍甚至到万倍，极大地改善了信噪比，减少了杂散光，增加了测试样品的厚度，为远红外吸收光谱研究带来了新的生命。

光泵亚毫米波激光本身是研究分子光谱的良好工具。通常泵浦频率可精确测定的，倘若测得激发频率和输出频率，则可在非常窄的带宽内确定与跃迁有关的分子能级和分子转动常数。用这种方法，T. Y. Chang首次测得了 CH_3F 的振动激发态的转动常数，精确度达到 10^{-8} 等级。

在回旋共振微波谱学的研究中，早在1966年就利用了亚毫米波激光。在垂直于直流磁场 B 的方向的平面中，带电粒子以回旋频率 ω_c 做圆周运动，回旋角频率为

$$\omega_c = eB/mc$$

式中： e — 电子电荷；

m 是粒子的质量；

c 是光速。

调整磁场强度，使带电粒子的回旋频率与辐射流频率共振，便得到回旋共振吸收峰的谱值，由此可以确定半导体材料中的空穴或电子的有效质量、杂质种类及杂质浓度。

2. 诊断等离子体

为解决人类的能源问题，世界各大国都很重视用托卡马克装置实现受控热核聚变反应的研究，对托卡马克等离子体各种

参量的诊断是推动这项工作发展的主要手段。

(1) 用干涉法测量电子密度和电子温度

由同样 CO_2 激光四泵浦的两台亚毫米波激光四，调整其中一台的腔长，使输出的激光产生频移（几兆赫）

$$\Delta \omega = - \frac{\Delta L}{L} \omega$$

式中：L、 ΔL — 腔长及其变化。

ω — 亚毫米波激光频率。

通过马赫—陈德永干涉仪，从两个探测口得到差频振动信号。在没有等离子体时，把两探测口的位相差调节到零。当存在等离子体时，位相差为 $\phi(x)$ ，由 $\phi(x)$ 即可计算出电子密度 n_e 。

用干涉法测量电子温度 T_e ，是根据电磁波在等离子体内的衰减长度 d 与电子—离子碰撞频率 f 下述关系式，

$$d = 2 \frac{c}{f} \left(\frac{\nu}{\nu_p} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{\nu_p}{\nu} \right)^2 \right]^{1/2}$$

式中：c — 光速；

ν_p — 等离子体的电子振荡频率。

如果从干涉仪已经测定出 d 和 n_e ，则可确定出碰撞频率 f 。 f 与电子温度有关

$$f = 2.6 n_e Z(T_e)^{-3/2} \ln \Lambda \quad \text{赫芝}$$

式中：Z — 原子序数；

$\ln \Lambda$ — 与德拜屏蔽距离有关的数值。

(2) 用法拉第效应测量等离子体参量

当线偏振的激光沿着磁场 B 的方向通过等离子体时，因法

~16~

拉塞效应而使偏振面旋转，其旋转角度 ψ 与磁场强度 B 、电子密度 n_e 、等离子体长度 l 以及激光波长 λ 有下述关系，

$$\psi = 1.5 \times 10^{-10} B n_e l \lambda^2$$

式中各量的单位： B 为千高斯；

n_e 为厘米 $^{-3}$ ；

l 为厘米；

λ 为微米；

ψ 为度。

因为旋转角度 ψ 正比于 λ^2 ，所以用长波的激光有利，但是长波极限由截止密度 n_c 限制

$$n_c = \epsilon_0 m e \omega^2 / e^2 = 0.112 \times 10^{14} \frac{1}{\lambda^2} \text{ 厘米}^{-3}$$

通常利用亚毫米波最为合适。实验中如果已知 B 、 l 、 λ ，则测定了 ψ 就可以计算出 n_e 。

(3) 用汤姆逊散射测量等离子体参量

用亚毫米波激光的汤姆逊散射测量托卡马克等离子体的离子温度 T_i 具有重要价值，因为至今还没有更合适的方法能够测量这一重要参量。激光通过等离子体时，等离子体中的电子对激光产生散射，即汤姆逊散射。实际上不仅激光电场、还有周围的离子电场也对电子发生作用，这后一种作用以德拜屏蔽长度 λ_D 表示。通常用散射参量 α 描述不同类型的散射，且有

$$\alpha = \frac{1}{2|\vec{K}_i| \lambda_D \sin \theta/2}$$

式中： $\vec{K}_i$ —入射光波矢，

θ —散射角度。