

中国电子学会文集

# 微波理论与技术

中国电子学会微波专业学会 编

**CIE**

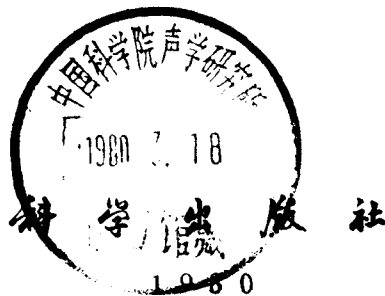
科学出版社

19

中国电子学会文集

# 微波理论与技术

中国电子学会微波专业学会 编



## 内 容 简 介

本文集包括微波理论与技术方面的论文十八篇，其中微波理论与技术动态四篇；微波铁氧体单晶材料研究三篇；磁调振荡器和滤波器研究六篇；微波集成电路研究五篇。

本文集可供从事微波理论与技术、微波铁氧体单晶材料和器件、微波电路、微波仪器、雷达、电子对抗、微波通信等方面的科研和技术人员参考。

## 中国电子学会文集 微波理论与技术

中国电子学会微波专业学会 编

\*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1980年2月第一版 开本：787×1092 1/16  
1980年2月第一次印刷 印张：11  
印数：0001—5,640 字数：255,000

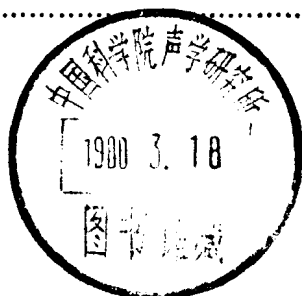
统一书号：15031·269

本社书号：1676·15-7

定价：1.70元

# 目 录

现代微波理论与技术的发展 .....	黄宏嘉 ( 1 )
微波开放式系统与马丢函数及其他 .....	林为干 ( 14 )
微波超导 .....	鲍家善 ( 25 )
微波集成电路的发展 .....	李 英 ( 36 )
石榴石铁氧体单晶共振线宽频率特性的研究 .....	莫育俊 赖武彦 王庆光 ( 63 )
钕钒离子对 BiCaInVIG 单晶微波磁性的影响 .....	李顺方 庞玉璋 徐孝贞 曹克定 王金玲 ( 69 )
含铋的钕铁石榴石单晶生长和微波磁性 .....	贾惟义 冯金梅 李顺方 刘朝信 王金玲 ( 74 )
十厘米磁调振荡器的研制 .....	潘更生 ( 79 )
YIG 磁调振荡器负阻特性的分析 .....	黄捷第 刘述章 姚 君 ( 87 )
三厘米磁调振荡器及放大器的研制 .....	姚中兴 ( 95 )
磁调宽带 YIG 滤波器设计 .....	郑茂林 陈继红 ( 104 )
YIG 调谐的 1—12.4 GHz 梳状谱线发生器 .....	姚慧海 肖德坚 ( 113 )
YIG 统调及统调的测频精度 .....	范光泉 柳维君 ( 122 )
微槽理论及应用 .....	杨铨让 ( 129 )
介质谐振器在微波集成电路中的应用 .....	顾其谔 ( 139 )
交指定向耦合器 .....	王小峰 刘 红 ( 153 )
宽带介质支撑带线宽边耦合器 .....	严 方 李晶哲 ( 160 )
倍频程微带交指滤波器的设计 .....	杨孝友 ( 167 )
编后记 .....	( 172 )



# 现代微波理论与技术的发展

黄 宏 嘉

微波的发展已经经历了差不多半个世纪。半个世纪的漫长时间使微波已经发展成为一门成熟的技术科学分支。但是,从微波发展的现状和动向来看,这门学科仍然处在兴旺发达的时期,它的生命力并没有显得减退。为什么微波继续保持着它的青春?其中一个原因是由于微波拥有很宽广的(已开拓和未开拓的)电磁频谱。从发展的观点来看,微波的频谱早已超出分米、厘米和毫米波段的界限。经典的微波理论已经成功地直接应用到亚毫米波直到可见光波段;典型的微波技术很多都在更高的频段找到了模拟。另一个原因是,微波理论与技术是一门十分活跃的电子学分支,它一方面和物理学发生紧密联系,不断地从物理学的新的成果中汲取营养,另一方面,又和许多其它技术科学相结合,形成新的边缘学科,使微波继续保持着青春。

在短短的一篇报告里,不可能全面地探讨微波的发展问题。这里,让我们就以上述的电磁频谱的开拓和微波的边缘学科为主题,来概述现代微波理论与技术的发展。

## 一、微波源

不同自然科学领域都有各自的发展方向。不过,对于大多数学科、特别是电子学的许多分支来讲,似乎都可以概括为两个主要方向,即能量与信息。从图 1 可以大体看出现代微波源的发展水平。纵坐标代表连续波或平均功率,横坐标代表频率;如果换一下尺度,

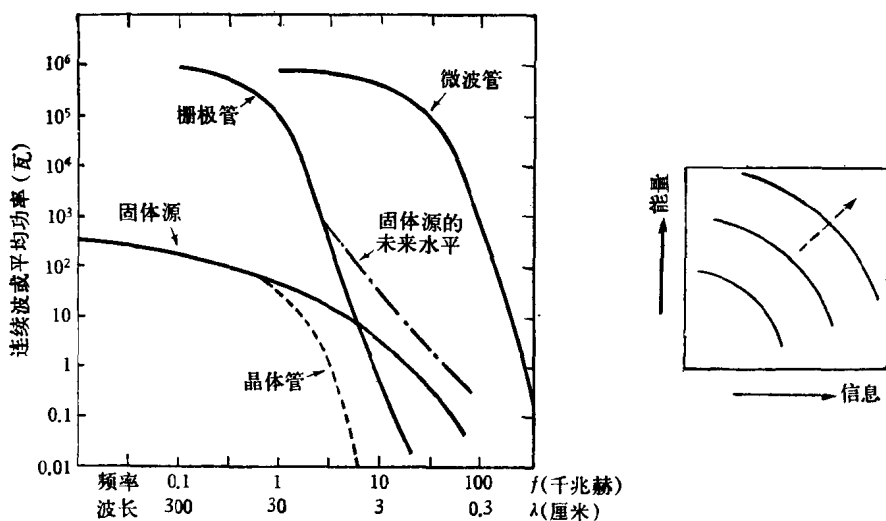


图 1 微波源的现代水平

这两个坐标就分别代表能量和信息。半个世纪以来,微波理论与技术的研究正是朝着更大能量和更高频率(或更大信息量)的方向不断向前发展。

典型的微波源大体分为三类,即栅极管、微波管和固体微波源。

栅极管是从普通电子管脱胎出来的一类高频管。在分米波段,栅极管仍然是一类有用的微波源,它的功率要比固体微波源高。栅极管的频率上限大致在 10 千兆赫,如果频率再提高,电子束电流密度以及电路损耗的增大就会使功率输出按频率的反五次方(即  $P \propto 1/f^5$ ) 很快地下降。

常规微波管(速调管、行波管和正交场管等)已经发展到成熟的阶段<sup>[1]</sup>。在过去十年中,大量的工作已经从研究转入工业发展。不过,常规微波管的最新进展仍然引起人们的注意。近年来,微型(重量约 1 磅) 10—50 瓦行波管的研制成功被认为是微波源的一项重大成就。另一项被认为重大成就的微波源是磁控管炉;由于大量生产的成本低廉(每只售价低于 30 美元),使得这种器件普遍地用于工业和人民日常生活。对于这些成就的意义,并不能低估。

在常规微波管中,输出功率最高的是具有谐振腔结构的一些管种(速调管、磁控管、增幅管等)。如果对功率源的输出特性加上一些附带的要求、主要是对频宽的要求,那么所能获得的功率输出就要降低。

由于不断利用新原理和采用新材料、新工艺,固体微波源的发展非常迅速,新的管层出不穷,工作频率已经推进到毫米波段,输出功率不断提高。在很多应用中,固体微波源已经取代、或逐步取代常规微波管。虽然常规微波管也将继续发展,但潜力最大的无疑是固体微波器件。直到 X 波段,数百瓦量级的连续波功率将有可能全部由固体微波器件提供。在频率较低的分米波段,固体微波源的功率可达千瓦量级;但到毫米波段,功率就只能达到数十瓦。

## 二、迴旋管和多普勒管

短于 1 毫米(亚毫米波)微波源的研究是微波工作者长期以来的一个努力方向,也是微波技术的一个难题。在这方面,迴旋管的出现是近年来微波技术的一项重大突破。

所谓迴旋管,是从“经典的”自由电子微波激光器(以下简称“自由电子激光器”)演变而来的一种特殊管型。它的基本原理是利用电磁波和在宏观静态场中振动电子之间的相互作用,或自由电子受激发射。

自由电子激光器无论和量子器件(微波激光器、光激光器)或和常规微波管(速调管、行波管等)相比较,都有相似点,但又有区别。

和量子器件相似,自由电子激光器中电磁波和振动电子之间的相互作用必须满足一定的谐振条件,即

$$\omega - \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_0 \approx n\omega_0, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

式中  $\omega_0$  和  $v_0$  是电子的振动频率和漂移速度,  $\omega$  和  $\mathbf{k}$  是电磁波的频率和波矢;  $\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_0$  是多普勒频移。谐振条件(1)很容易从直观来理解,它的物理意义是很清楚的。

由于自由电子激光器的谐振条件(和量子器件的情况一样,而和常规微波管不同)对于快波也能得到满足,因而在自由电子激光器中可以采用具有平滑壁和普通波导或开式

波导和开式谐振腔。

另一方面,和常规微波管相似,而和量子器件又不同,在自由电子激光器中单个电子能够辐射出很大数目的信号频率的量子。因而,只要合适地设计激光器系统,就有可能利用强流、高能(“相对论性”)电子束,产生高效率的电磁波。

正是由于自由电子激光器既具有量子器件,也具有常规微波管的特点,所以它产生的电磁振荡落在毫米和亚毫米波段,就不是一件奇怪的事。

宏观电场或宏观磁场都能使振动自由电子和电磁波发生相互作用。从原理上讲,正栅极振荡器和回旋谐振(平滑柱面电极的)磁控管可以看成自由电子激光器的前身。所谓回旋管,正是磁控管的一种演变。

在正交的均匀静电场  $E_0$  和静磁场  $B_0$  作用下,自由电子以某一固有频率沿一条螺线轨迹向前运动(假定电场  $E_0 < cB_0$ ,  $c$  是光速)。根据相对论原理,存在着一个唯一的参考坐标系,其中静电场是一个单纯的磁场;在这个坐标系中电子的轨道是一个圆,回旋频率为  $\omega'_H = (e/m') B_0$ , 这里上标撇号是指参考坐标系。对于实验室坐标系来讲,相应的回旋频率等于  $\omega_0 = \omega_H = \omega'_H [1 - (v_0/c)^2]^{-1/2}$ , 式中  $v_0$  是实验室坐标系和参考坐标系之间的相对速度。

任何电子枪所形成的稳态电子束本身只产生静电场。电磁波对电子束的影响是产生交变电流,从而导致电子的受激发射或受激吸收,使得电磁波的能量被加强或减弱。

基于电子束的感应回旋辐射原理的器件称为回旋谐振微波激光器,其中回旋管是最有成效的一种管型。回旋管的原始思想最早是 A. V. Gaponov 等人于 1967 年提出的(苏联正式公报发表于 1976 年)<sup>[2]</sup>。但回旋管的研制成功却是近几年的事;从原始思想的提出到它的实现经历了好几年的过程。

早期研究中所遇到的困难主要是强流电子束所固有的漂移速度弥散太大,以致回旋谐振线的多普勒加宽非常严重,因而不能使所有的电子都满足(1)式所规定的谐振条件。解决的办法最后是从典型的微波理论找到的。根据 Л. А. Вайнштейн 的著名的开波导理论<sup>[3]</sup>和 Б. З. Каценельбаум 的缓变参数不规则波导理论<sup>[4]</sup>,在横截面缓变的准光开式谐振腔中,当工作频率接近于截止值时,纵向传播常数  $k_{||}$  趋于零(亦即波矢量  $\mathbf{k}$  几乎是在垂直于纵向静态磁场的方向),于是有

$$k_{||} \rightarrow 0; \quad \omega/k_{||} \gg c. \quad (2)$$

从谐振条件(1)看出,如果上式得到满足,那么多普勒加宽就将很小。工作在这种条件下的回旋谐振微波激光器就称为回旋管<sup>[5]</sup>。

总起来再说一下:自由电子激光器是泛指利用自由电子受激发射原理的器件,其中利用磁场产生电子振动的一类器件称为回旋谐振微波激光器,而回旋管则是属于后者的一种特殊管型。

回旋管的工作原理可以用经典方法,也可以用量子理论来描述。

回旋管的经典描述和 O 型微波管相似,即将稳态磁场中高能电子束与电磁波的相互作用描述为“集聚”和“减速”两个过程。电子在回旋轨迹上的原始相位是无规的;由于电子的相对论性的质量改变而发生“集聚”;这是因为,失能(即能量交给电磁波)的电子变轻了,于是它的相位越来越超前,而得能(即从电磁波取得能量)的电子则变重,于是它的相位越来越滞后。相位的集聚使得电子群在减速场中发生相干辐射,从而将电磁波放大。

为了获得从电子到电磁波的最佳的能量转移，频率应略高于电子回旋频率，或它的谐波。

量子理论的描述是考虑电子在磁场中的离散能谱；相邻能级间的能量差也就是朗道能级 ( $\approx \hbar\omega_H$ ,  $\hbar$  是普朗克常数)。由于回旋频率随着能量的增高而减小，能级间的距离是不等的， $\epsilon_k - \epsilon_{k-1} > \epsilon_{k+1} - \epsilon_k$ 。因而， $k \rightarrow k-1$  跃迁所产生的感应辐射，和  $k \rightarrow k+1$  跃迁所产生的感应吸收发生在稍微不同的频率上。这就相当于一个三能级的量子系统。严格地讲，感应辐射和感应吸收不是截然分开的，实际观察到的结果是某种过程超过另一种过程。

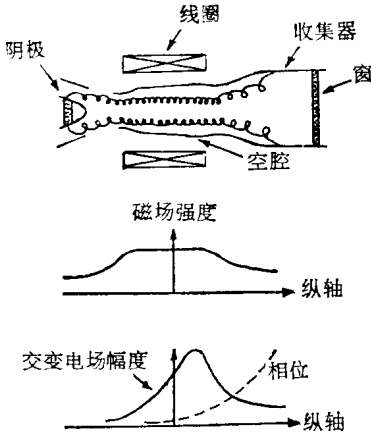


图2 迴旋管(取自文献[5])

目前，采用弱相对论性电子束的迴旋管，无论在理论上或在技术上都已经达到几乎和常规微波管同样成熟的阶段。毫米波段的输出功率已经达到连续波几十千瓦；在亚毫米波段，达到连续波千瓦。

迴旋管是近年来关于高能电子束和电磁波相互作用研究的一个主流。另一主流是研究高能脉冲电子束对电磁波所产生的相干散射<sup>[6]</sup>。这种散射可能发生在急速上升的电子束前沿，类似于镜面反射；也可能发生在电子束内部，由于感应电荷密度的振动而产生受激散射。在相干散射过程中总要发生多普勒频移，因而基于这种原理的器件就称为多普勒管<sup>[7]</sup>。

在多普勒管中，脉冲高能电子束对输入波所产生的多普勒频移可能很大。和其它普通的变频方法（例如，非线性元件中高次谐波的产生、光泵分子激光器中亚毫米波的产生）都不一样，利用多普勒管的机制可获得能量和功率增益；根据门雷-罗威关系式，输出能量与输入能量之比可能高达相应的频率之比，即  $W_s/W_o = \omega_s/\omega_o$ 。因而，多普勒管是高效率的，可在毫米波和亚毫米波的高频上获得高功率输出。此外，多普勒管的输出频率是连续可调的，无论改变输入波频率或改变电子能量，都能使输出波频率改变。

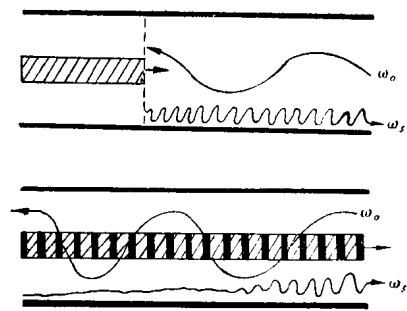


图3 多普勒管的原理示意图(取自文献[7])

上图：电子束前沿对入射波的后向散射；  
下图：电子束内部密度振动对入射波的后向散射

关于电磁波和以相对论性速度运动的反射器之间的相互作用，早在1905年就为 A. Einstein 所认识<sup>[8]</sup>。利用相对论性电子束对微波的受激散射而产生亚毫米的思想，是 R. H. Pantell 等人于1968年提出的<sup>[9]</sup>。目前，关于多普勒管一类的相干散射的研究，还处于探索性的基础研究阶段。在厘米波段，已达到千兆瓦脉冲功率输出的水平；在毫米波段，达到兆瓦量级的脉冲功率输出。

关于迴旋管和多普勒管的主要应用，目前可以预见的是在两个方面，即等离子体加热和毫米波、亚毫米波雷达。实验性反应堆中等离子体加热所要求的毫米波(280千兆赫)



连续波功率约为50兆瓦<sup>[10]</sup>。目前,距这个目标还有几个量级。

七十年代自由电子受激发射研究的成就是在六十年代激光出现以后技术科学的重大突破之一。微波技术的这一新领域的发展无疑将具有极其深远的意义。

### 三、 $H_{01}$ 毫米波波导传输

从  $H_{01}$  波在实验中被发现的年代(1931—1932)算起,已经过了四十余年;即使从国际上大规模的实验和理论工作开展起来的时期算起,  $H_{01}$ 毫米波波导传输的研究差不多也已经经历了二十年。这项研究发展到今天,它的现状和前途怎样?这是人们关心的问题。

总的说来,世界上大多数科学先进的国家(主要是美国,其它如日本、苏联、意大利、德国、法国、英国等)<sup>[11]</sup>都在继续开展这方面的研究。1977年10月贝尔系统技术杂志(BSTJ)发表了关于 WT4/WT4A 传输系统的专刊<sup>[12]</sup>,标志着  $H_{01}$ 毫米波波导的研究,从科学技术问题来讲,已经基本完成。

$H_{01}$ 波导系统的较大规模的应用也即将在一些国家实现。美国国家射电天文台正在建造一座由多个巨型抛物面天线组成的天线阵,其中21公里长的传输线选用  $H_{01}$ 毫米波波导;于1973年动工,计划于1981年完成<sup>[13]</sup>。所以选用  $H_{01}$ 波导的根据,除了信息容量满足要求外,主要是因为这种系统的高度稳定性和可靠性已经在长期的系统实验中得到了肯定。

日本也是毫米波波导通信发展很快的国家。他们研究的 W40G 波导传输系统预计于近期完成<sup>[14]</sup>。由于在通信容量、通信质量以及经济因素等方面的优越性,  $H_{01}$ 毫米波波导系统将成为日本的主要通信干线之一。

英国和一些其他国家也预计在八十年代早期将  $H_{01}$ 毫米波波导用于远距离多路通信<sup>[15]</sup>。

$H_{01}$ 毫米波波导将近20年的发展,经历了曲折的道路。这是因为,这种波导系统涉及到一系列复杂的理论问题和技术问题。从传输的观点看,它的主要特点是选择了低衰减圆电波  $H_{01}$ 作为传输模式。微波技术中常规波导的传输模式是主模;只要波导尺寸选择得合适,就能做到只允许主模传输,而使所有的高阶模都被截止。和常规波导的情形不一样,  $H_{01}$ 波不是圆波导的主模,而是一个高阶模;因此,无论对尺寸作怎样的选择,除  $H_{01}$ 波本身外,至少还有四个模式可以同时在这波导中传输,其中一个为  $H_{01}$ 的简并模  $E_{11}$ ,另外三个是低阶模  $H_{11}$ ,  $E_{01}$ 和  $H_{21}$ 。另一方面,由于  $H_{01}$ 波的低衰减特性只是在波导尺寸比波长大很多(即频率够高)的情况下才表现出来,因此就有必要选择较大的波导尺寸;这样,在圆波导中比  $H_{01}$ 波更高阶的一系列模式也都成为传输模式(例如,在直径为50毫米、工作波长为8毫米的圆波导中,传输模式的数目有上百个)。这就使  $H_{01}$ 圆波导成为一个不像主模波导那样单纯的传输系统,而是一个复杂得多的传输系统:不仅在  $H_{01}$ 波下面有好几个传输模式,在它上面还有更多的一系列传输模式,  $H_{01}$ 波只是居于中间的一个模式。从传输特性来看,  $H_{01}$ 圆波导是一个多模波导,因为在这种波导中(如果条件允许),至少有上百个波可以同时传输而不被截止;然而,从实际应用的要求来看,  $H_{01}$ 圆波导又是一个单模波导,这就是说,在这种波导中实际上只允许单纯的  $H_{01}$ 波传输,而不允许其它低阶的或更高阶的模式(杂波)传输,而且一旦这些杂波产生出来,就要设法把它们抑制掉。这

就是为什么实际采用的  $H_{01}$  毫米波波导不是内壁平滑的金属圆波导,而是所谓“自滤波导”(螺旋波导或介质膜波导)。这样,就给  $H_{01}$  波导传输带来一系列的理论问题和技术问题,而中心问题是对模式(或波型)的控制。

技术问题解决了,应用问题提上了日程。在未来(大体说,到本世纪末)的通信网络中, $H_{01}$  毫米波波导究竟将会占怎样的地位,获得多大规模的应用,这是目前还很难回答的问题。 $H_{01}$  毫米波波导传输在技术上的优越性虽然已经得到充分肯定,但未来通信系统的选择还取决于许多因素,包括和其它通信系统(例如,大容量同轴电缆和光导纤维,特别是后者)的权衡比较。

近年来光导纤维的突破性成就使一些人产生了一种概念,认为有了光导纤维,毫米波波导就可以不要。这种概念是不全面的。光导纤维的出现显然将使毫米波波导的可能应用范围比原来估计的缩小了,但并不意味着它将全部取代毫米波波导。未来的通信网络很可能是一种综合的系统,而不是一种单一的形式。

关于  $H_{01}$  波导的应用,当然不限于在通信方面。这是因为, $H_{01}$  波导不仅具有适用于远距离极多路通信的特点(衰减低而工作频率高),而且还具有大功率的特点(因为所用的波导尺寸比波长长很多,而且场分布是圆对称的、又比较均匀,所以有可能载运大功率而不产生过高的局部能量密度)。近几年出现的回旋管等一类高能微波源,大多数正是利用了  $H_{01}$  波这种模式,只不过波导是变截面的,而且是开式的。除了高信息量和高能这两个主要特点外, $H_{01}$  模式还具有其它一些有利的特点,例如:波导壁上电流是环行的(不存在纵向电流),因而波导节之间的连接并不要求紧密的机械接触,这就简化了旋转接头的结构。此外,公差允许范围内波导不规则性所产生的非  $H_{01}$  模式(杂模)一般很小,而且容易被滤除。由于上述的一系列特点, $H_{01}$  波导传输的研究在微波理论与技术中具有普遍的科学意义和实际意义。

#### 四、光导纤维和集成光学

近代微波理论与技术的一个主要趋势是朝着越来越高的频率发展。正如前面说过的,频率的提高意味着信息容量的增大。从微波到可见光是一段宽广的电磁频谱,也是一个极其丰富的信息资源。很多年来,微波工作者和物理学(光学)工作者一道,正是为了开拓这个丰富的资源而努力。

由于微波和光的结合,产生了微波光学这门边缘学科。在这个新的领域中,光导纤维和集成光学所取得的成就是近年来技术科学的大事之一<sup>[14-15]</sup>。

从传输理论的角度来看,光导纤维和集成光学的主要研究内容实际上就是两种类型的波导:圆柱形的和平面或条形的波导。这两类波导和微波介质波导并没有原则上的区别:不过,原来的微波介质波导理论<sup>[16]</sup>用于光导纤维和集成光学是远远不够的。直到最近几年,由于光导纤维和集成光学研究的需要,介质波导理论才得到极大的丰富和发展<sup>[17]</sup>。

通常将光导纤维和集成光学合在一起研究,不仅是从波导的普遍概念来考虑的,更重要的实际原因是由于研究这两项技术的主要目标都是为了实现光通信。

光导纤维本来是一项大约已有五十年历史的旧的技术。还在激光出现之前,人们就早已用玻璃或塑料丝组成的多股纤维传送(非相干光)图象。但是这种纤维的透明度很

差,只能用于短距离,例如医学中胃的内部检查。激光出现后的早期,人们开始想到的光波导形式也不是光导纤维,而是一些基于准光原理的光波导,特别是波束波导;这是因为,玻璃材料在当时所达到的透明度还远远谈不到远距离传输。近十年来,光导纤维技术的进展是惊人的。有人作过这样的比喻<sup>[18]</sup>:如果海水有目前光导纤维那样的透明度,就能够很清楚地看到最深海洋的底部。和原始的玻璃纤维束相比,现代的光导纤维已经从量变到质变,发展到前所未有的新水平。

光导纤维可以按照介质折射率的不同分布,分为均匀光纤和非均匀光纤。均匀光纤至少也包含两层折射率不同的介质,不过每层的折射率都是均匀的;这种光纤也称为阶梯式光纤。非均匀光纤也就是折射率渐变的光纤。按照传输模式的数目,光纤也可分为单模与多模两类。

单模光纤和传输主模(矩形波导  $H_{10}$ , 圆波导  $H_{11}$ )的微波波导没有本质的区别,不过前者是开波导,而后者是闭波导。单模光纤所传输的模式实际上就是圆柱形介质波导的主模,即混合波  $EH_{11}$ 。这种模式的传输特性早在微波理论与技术中就已研究得很清楚。和闭波导模式不同,它的一个突出特点是没有截止频率,也就是说,无论频率怎样低, $EH_{11}$ 波都能在波导中传输,因而不存在波导尺寸的下限。根据微波理论中的已有结果,为了避免第一个高阶模( $H_{01}$ 或 $E_{01}$ )出现,单模光导纤维的尺寸(直径)和波长应满足下列条件:

$$D < \left( \frac{2.408}{\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \right) \lambda, \quad (3)$$

式中 $n_1$ 和 $n_2$ 分别是光纤内芯和包层的折射率。这就是说,单模光纤尺寸的上限(和一般主模波导的情况一样)和工作波长是在同一量级。由于光波波长很短(在1微米量级),所以单模光纤的内芯必须细到1微米左右,这就给工艺制造带来困难。

多模光纤显然是指能够同时传输多个模式的光波导。从波导理论与技术的发展来看,光导纤维的多模传输是一种不同于以往各种波导传输的新颖的传输方式。它的新颖特点不在于所传输的电磁波是波长很短的光波(因为单模光纤同样也是传输光波),而在于“多模”。多模光纤中实际上传输的模式,真正是多模;既不同于主模波导(其中只传输最低阶的单模),也不同于高阶模波导,例如 $H_{01}$ 波导(虽然其中可能有多模存在,但实际上也只允许一个单纯的高阶模 $H_{01}$ 传输)。从常规的微波波导理论与技术来看,在一根多模光导纤维中有数以千计的大量模式以不同的幅度、相位和极化方向同时沿波导轴向前传输,似乎是难以想像的。因为常规波导技术对模式的相位和极化方向要求很严格,不允许丝毫的紊乱。对于光导纤维来讲,这种多模传输所以可能,主要是由于光学(接收)技术方面的原因:目前,光脉冲的接收方式主要还是一种基于“光子计数”的直接接收方式。对于这种接收方式,只有功率和群速是重要的,而波的相位关系和极化方向并不重要。

功率衰减和群时延是波导传输,也是光导纤维的两个重要指标。功率衰减的原因一部分是由于光波在纤维内部传播过程中被玻璃材料吸收或散射,大部分则是由于纤维的各种非理想性(接头不准、内芯与包层界面的各种几何不规则性、纤维的微细弯曲,等等)都会产生辐射损耗。根据常用的波导理论公式,光导纤维的群时延可以表示为

$$T = L(d\beta/d\omega), \quad (4)$$

$L$ 是光纤长度, $\beta$ 是传播常数, $d\beta/d\omega$ 是群速。如果假定折射率随频率的变化 $dn/d\omega$ 在光纤内部处处都一样,那么,通过理论计算就能近似地得到以下结果:如果折射率沿半径

方向按抛物线规律变化,则不同模式的群时延差别最小(或模式平衡最佳)。

对于均匀(或阶梯式)多模光纤来讲,由于群速不同而产生的模式弥散是限制通信容量(或脉码速率)的主要因素。即使模式弥散被减到最小的程度(例如,采用折射率为抛物型的光导纤维),也还存在着由于光源频宽而产生的信号失真。每单位频宽所产生的群时延等于

$$dT/d\omega = L(d^2\beta/d\omega^2). \quad (5)$$

关于传播常数随频率的变化,有两方面的原因:一方面是和波导模式的特性有关,因为 $\beta$ 是自由空间波数 $k$ 的函数(由于这种原因而产生的色散称为“波导色散”),另一方面是因为折射率 $n$ 又是 $\omega$ 的函数(产生所谓“材料色散”)。在材料色散和波导色散之间又存在着互相影响的复杂的函数关系。

由于多模光纤的尺寸较大(内芯在数十微米量级),这种光纤的工艺问题比较容易解决。此外,多模光纤对于光源的要求也较简单,只需要发光二极管就可以了(而高效率的单模光纤则需用激光器)。不过,单模光纤的通信容量比多模光纤至少高一个量级(原因是多模光纤中不仅存在波导色散和材料色散,而且还存在多模的模式弥散)。

看来,多模光纤和单模光纤都会得到应用和发展。大致地说,阶梯式多模光纤只适用于中继距离在10公里左右、传输速率不超过10兆比特/秒的通信系统。在10—100兆比特/秒的传输速率范围内,需要采用折射率渐变的(抛物型)多模光纤;当然也可用单模光纤。超过100兆比特/秒的远距离通信系统,看来只有单模光纤有希望获得实际应用。

现在转到集成光学的问题。如果说光导纤维相当于低频传输线和微波波导,那么,集成光学的思想就是集成电路和微波集成技术的自然发展。从结构形式看,这种相似性也是明显的:光导纤维和低频传输线、 $H_{10}$ 波导一样,都是圆柱型,而集成光学和集成电路、微波(微带)集成一样,是平面或条型。

集成光学对于实现光通信这一长远目标具有重大的实际意义。看一下低频电路、微波波导逐步发展到集成化的道路,很容易理解这一点。特别是由于传统光学设备对准直精度的要求很高,对微小的机械振动和温度变化非常敏感,所以集成光学的研究就显得更加重要。集成光学将光波限制在衬底表面上的薄膜波导内。由于光波的波长很短,所以薄膜波导的尺寸也很小;这样,原来需要在钢轨和笨重台面上进行准直和调整的庞大的常规光学系统就有可能被尺寸只有几厘米见方的集成光学结构所替代。除了尺寸的极大紧缩外,集成光学的固有优点是对机械振动和环境的温度变化不敏感,而且对功率的要求也低。

目前,人们对集成光学的理解是泛指所有利用光波导技术实现各种新的微型光学器件(包括无源器件和有源器件)的研究<sup>[19]</sup>。集成光学的最终理想,和集成电路一样,是在单块材料上实现一整套的光电子学技术,包括光的产生、放大、传输、耦合、调制和检测。

从原理上讲,集成光学的主要问题是波导问题。无源的集成光学元件或器件,包括接头、弯头、分支、定向耦合器、滤波器等,实际上就是微波波导和微波器件在光频频段的模拟。有源的集成光学器件也同样可以归结为波导问题<sup>[20]</sup>。例如, GaAs-GaAlAs 异质结注入激光器的受激发射是在复合区薄层中发生的,这个薄层具有较高的折射率,因而起着导波作用;这里,我们用负的损耗系数来描述粒子数反转状态,除此以外,整个问题可以归结为波导问题。同样,检波器的波导分析也和集成光学中其它器件的波导分析非常相

似。

从原理上讲,集成光学波导和光学波导一样,既可以是单模的,也可以是多模的。不过,目前的集成光学波导主要还是单模波导。多模波导在集成光学中不大引起人们的注意。原因是多方面的。从工艺方面讲,采用现代的薄膜技术来制造单模平面或条形波导并不困难,因而采用多模波导的必要性就不很大。从传输特性来看,单模波导也是优越的。在单模传输的情况下,集成光学波导和各种波导元件的设计就和微波波导、微波波导元件的设计没有本质的区别。特别是对于集成光学中某些需要利用干涉效应或相位控制的波导元件或器件,多模就更不合适。

由于光导纤维看来是单模与多模并用,而集成光学波导主要是单模,因而给耦合问题带来更多的麻烦。即使是单模光纤和单模集成光学波导之间的耦合,也是很复杂的理论问题和技术问题,更不要说将光纤中的多模场有效地转换成集成光学中的单模场了。这里,很自然地会想到这样的问题:集成光学是否也有可能全部建立在多模的体系上,从而和多模光导纤维很好地匹配起来?可能性是存在的。不过,要解决这个问题,现有的方法是不够的,还有待于新的概念和创造性思想。

光导纤维通信的发展速度比原来估计的还要快。原来估计在八十年代初期达到的目标,一部分已经提前实现了。目前,中短距离上的光导纤维通信试验(军用的和民用的)正在许多国家进行<sup>[21-23]</sup>。

就中短距离通信来说,已有的试验结果已经足够说明光导纤维的优越性。人们关心的问题是,在未来的年代里,长达数千公里的干线通信是否将取光导纤维的形式?由于光导纤维技术还在继续发展,而集成光学研究还处于探索性阶段,目前还很难对光纤通信和微波( $H_{10}$ )波导通信从各方面作权衡比较。如前所述,从技术上讲, $H_{10}$ 波导和有关的一整套毫米波技术已经发展成为一种成熟的系统,它的通信容量和可靠性都很高(在6000公里上误码率小于 $10^{-7}$ ,信息容量274兆比特/秒,中继距离50—60公里,业务可用率 $>0.9998$ )。在未来的远距离通信系统中,光导纤维通信是否将占有绝对优势,在很大程度上还要看集成光学的今后发展。

## 五、微波理论

微波理论是在电磁场理论和经典电动力学的基础上发展起来的。由于微波朝着更高频率发展以及微波和其它学科相结合而形成若干新的边缘学科,量子理论也越来越广泛地渗透到微波的领域;突出的例子是微波半导体、微波超导、微波和光激光器。不过,除了一些基本的理论研究(例如,关于受激辐射的相干性、量子噪声对检测器极限灵敏度的影响,等等),量子电动力学或量子场论的问题是比较少的。许多实际问题的求解常常是利用半经典理论,即用经典的方法处理电磁场,而用量子力学来描述和场发生相互作用的物质或媒质。

从理论上讲,经典理论是量子理论的近似。不过,对于微波理论中所遇到的一些研究课题来说(例如,关于光“速调管”的理论)<sup>[24]</sup>,量子理论的修正项往往小到可以忽略;这时,量子理论和经典理论的结果就趋于一致。根据对应原理,在大“量子数”情况下,经典理论是量子理论的很好近似。

量子力学的一些基本概念在现代微波理论中也越来越显得重要。例如,从经典微波理论看,衍射是一种典型的波的现象。然而,根据波-粒二象性,衍射也同样可以用粒子的图象来描绘。传播矢量和频率分别为  $\mathbf{k}$ ,  $\omega$  的波,也可以看成是具有动量  $\hbar\mathbf{k}$  和能量  $\hbar\omega$  的粒子流。在“微波声学”中,也同样存在着波粒二象性。当声波的频率高到微波频率时,它的粒子性就明显地表现出来。声的传播特性既可以用波(波矢  $\mathbf{k}$ , 频率  $\omega_s$ ) 来描绘,也可以用声子(动量  $\hbar\mathbf{k}$ , 能量  $\hbar\omega_s$ ) 来描绘。从粒子的观点来看,光入射到声波上所发生的衍射(布拉格衍射)也就是光子流和声子流的碰撞现象;根据粒子的动量守恒和能量守恒可以导出布拉格条件<sup>[25]</sup>。

量子理论对现代微波理论的深刻影响更多地表现在量子理论中所采用的许多数学物理方法都在微波理论中得到应用。微波理论的发展从一开始就大量地引入了量子力学的各种数学分析方法,其中最重要的是正交函数展开和一系列的近似方法,特别是微扰法、变分法、WKB法,等等。量子理论中数学方法对现代微波理论所起的作用更加明显,例如,微波光学(其中一个主要方面是光导纤维和集成光学)的很多理论问题都归结为求解非均匀介质波导的波动方程,而这种方程经过简化以后的形式恰好和薛定谔方程的形式完全相同,因而量子力学中求解薛定谔方程的一系列数学结果不需要作任何变动就可以直接引用过来<sup>[26]</sup>。由于数学形式相同,量子力学的术语也用来形象地描述一些抽象的微波现象。

不过,总的来讲,微波的理论问题大量还是属于经典理论的范畴。即使对于一些新的微波边缘学科来讲,也是这样。理论问题最终总是归结为麦克斯韦方程的求解。现代微波理论包含极其广泛的内容;概括地说,耦合波理论的发展、近似数理方法的广泛应用以及微波理论与计算机的结合(“计算机辅助微波设计”)是三个特别值得注意的方面。

耦合波理论并不是一个新的理论课题。在微波理论与技术这个学科分支中,耦合波理论最早是结合波导传输、微波电子学和参量电子学等方面的研究而发展起来的<sup>[27-29]</sup>。耦合波理论的特点是它不仅建立在严格的数学方法上(这种方法就是正交函数展开),同时还有非常明晰的物理意义。根据这个理论,许多表面上看来似乎不相关的现象都在统一的观点上联系起来。七十年代以来,随着微波技术的进展以及微波的一些边缘学科的出现,耦合波理论又有了新的一个重要发展。主要在以下几个方面:首先是耦合功率方程<sup>[30-41]</sup>。耦合功率方程实际上早在毫米波波导研究中就已经被提出,并用来分析高阶模传输中出现的伴流;但原始的耦合功率方程只是一种唯象的形式,其中耦合系数是待定的。由于近年来多模光纤发展的实际需要,才又重新在严格的理论上建立了耦合功率方程。对于多模光导纤维,耦合功率方程具有特别重要的意义,这是因为,多模光导纤维中的传输模式是极多的,因而直接求解耦合模式方程就变得十分困难。引入在统计意义下的平均功率的概念,在弱耦合近似下就能从耦合模式方程导出耦合(平均)功率方程。目前对于多模光导纤维一些传输特性的了解(例如,空间瞬态、脉冲变宽和耦合长度的关系,等等),正是从求解耦合功率方程得到的。

统计数学在耦合波理论中占有重要的地位;这是容易理解的,因为很多微波技术问题都包含有某种形式的随机性。在毫米波波导传输的研究中,为了分析远距离波导的随机不规则性,已经引用了统计数学<sup>[32]</sup>。对于多模光导纤维,耦合功率方程和统计数学的结合

就变得更加简单方便(功率耦合系数简单地表示为随机不规则性的自相关函数)。

耦合波理论的现代发展还表现在它的应用范围越来越广泛。耦合波理论不仅用来分析微波波导和光导纤维,而且还深入到其它方面。在集成光学中,从光栅耦合、波纹波导滤波器到分布反馈光激励器,从光调制器、TE-TM 模式变换到非线性光学效应,几乎全部都利用了耦合波的分析方法<sup>[33]</sup>。看来,在今后的若干年中,耦合波理论还将继续是许多微波理论研究的焦点。

微波理论的发展和数学物理方法的广泛应用分不开的。这是因为,在微波理论中我们遇到的电磁场问题是最典型的、可能也是最复杂的边值问题。这里没有必要举出微波理论中用到的各种数学方法的名目,因为应用数学中已有的数学方法几乎都在微波理论中得到应用。在各种数理方法中,函数论方法是值得重视的方法之一。在这方面,特别应该提到 Вайнштейн 从半无限长平行板波导辐射理论发展起来的开式谐振腔和开式波导理论<sup>[3]</sup>。半无限长波导本来并不是新问题,它的解早已用 Wiener-Hopf 法得到过<sup>[34]</sup>;但是,过去的工作都包含有若干限制(例如,对传播波型数和对称性的要求)。Вайнштейн 理论的特点是把分离变量法和函数论方法结合起来,得到的解更加严格和普遍。开式谐振腔和开式波导理论无论在迴旋管的研究中,或在激光器理论中都起着重要的作用。函数论方法的物理意义不像耦合波理论那样明晰和具体,但它是一种非常有用的巧妙的数学方法;在描象的数学分析过程中,数学和物理似乎完全分离开来,然而所得到的最终结果却总是正确地描述了客观的物理现象。在函数论方法中我们特别感觉到一种引人入胜的合乎逻辑的统一和优美。

关于微波理论中数理方法的应用,还应该提到有限傅里叶变换,它是指积分号上下限有界的、以指数函数为核的第二类齐次 Fredholm 方程。在微波光学中,最早遇到这类积分方程的问题是关于共焦多模谐振腔的本征模式分析(BSTJ, 1961, 3月<sup>[35]</sup>)。在同年两个月前(即1961年1月)的BSTJ上曾经发表过关于有限傅里叶变换的应用数学文章<sup>[36]</sup>,其中讨论了有限傅里叶变换的本征函数(长椭球波函数)及其正交性。引用这个数学结果,共焦腔的本征模式问题就直接得到了解决。这个例子说明了应用数学对于微波理论所起的作用。也可以用另一种数学语言来描述上类积分方程的解,即长椭球波函数在有限傅里叶变换下是“自互易”的。这种数学描述的好处是和本征函数(模式)的物理概念联系了起来。无论从数学或物理方面看,“自互易”都是一个普遍的概念<sup>[37]</sup>。结合拉盖尔-高斯函数是在汉开尔积分变换下的自互易函数<sup>[38]</sup>,这个数学结果也直接用于微波光学的模式分析<sup>[39]</sup>。

尽管微波理论在发展中不断地汲取应用数学的已有成果,但有些微波理论问题往往不能仅仅依靠已有的应用数学而得到解决。因而,微波工作者有时不得不尝试解决某些有关的应用数学问题。举例来说,还在微波理论发展的早期,J. A. Stratton、朱兰成等就对旋转椭球波函数(包括这类函数的数值表)作了大量工作;这些工作不仅对微波理论、而且对应用数学也是有价值的贡献<sup>[40]</sup>。微波理论深入到应用数学的例子是不少的,例如,具有复对称核的齐次第二类线性积分方程本征值的存在性<sup>[41,42]</sup>,伽偶函数的渐近公式<sup>[43]</sup>,等等。

在结束这篇报告之前,最后提一下现代微波理论的一个很重要的特点,即微波理论和计算机的更加紧密的结合。这种结合产生了“计算机辅助微波设计”<sup>[44-45]</sup>这样一个重要的

分支。关于计算机辅助设计的含义，不能简单地理解为单纯的高速度大量运算。大体说来，它包含有三方面的内容，即分析、综合与最佳化。近年来，计算机辅助设计的最大进展是自动最佳化。虽然计算机辅助设计可以看成是理论研究的一部分，但这种方法的思想却更近于实验研究，不过，这种实验不是人们在实验室中用电路和仪器进行的那种实验；形象地说，它是计算机本身按照某种数值模型进行的实验，通过这种实验而完成最佳设计。

计算机辅助设计对于微波理论的发展将起着越来越重要的作用。（当然，它也将对微波技术起重要作用，例如，在微波测量中计算机已用来“辅助”微波电路如多节滤波器的调谐<sup>[46]</sup>，使原来的繁复调谐大为简化）。就理论方面讲，计算机辅助设计是微波理论和计算技术的一个交叉的领域。微波理论工作者的任务不仅是建立起数学模型，还需要通过解析方法将计算量和对存贮量的要求减到最低限度。数学方程的离散化是一个首先需要解决的关键步骤<sup>[47]</sup>。此外，利用对称性分析<sup>[48]</sup>和模式分类等技巧也有助于简化数值计算。

## 附 记

在这篇报告里，我们以电磁频谱的开拓和微波的边缘学科为主题，概述了现代微波理论与技术的若干发展。在边缘学科方面，侧重联系了微波光学的问题。关于微波声学，可参阅另一篇文章<sup>[49]</sup>。微波超导是微波技术和固体物理相结合而发展起来的一个重要的新领域；它是本论文集另一报告的主题<sup>[50]</sup>。微波在空间技术中的应用、微波高能加速器的发展、微波传输太阳能的宏伟目标<sup>[51,52]</sup>、微波和化学相结合而形成的分支“微波化学”、以及微波和医学<sup>[53]</sup>、生物学相结合的问题，等等，都是值得注意的发展方向；但这些内容已经超出了本文的预定范围。

## 参 考 文 献

- [1] P. Gudenard, European Microwave Conference, p. 151, 1975.
- [2] A. V. Gaponov, et al, Copyright 1967, Official Bulletin USSR 1976 (见 IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-25, June 1977, p. 521, Ref. 16).
- [3] Л. А. Вайнштейн, Открытые резонаторы и открытые волноводы, изд. Советское Радио, 1966.
- [4] Б. З. Кауценеленбаум, Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами, изд. АН СССР, 1961.
- [5] V. A. Flyagin, A. V. Gaponov, et al, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. MTT-25, June 1977, p. 514.
- [6] V. L. Granatstein and P. Sprangle, *ibid*, p. 545.
- [7] T. F. Godlove and V. L. Granatstein, IEEE MTT-s International Microwave Symposium Digest, 1977, p. 69.
- [8] A. Einstein, Ann. Phys., vol. 17, 1905, p. 891.
- [9] R. H. Pantell, et al, IEEE Trans Quantum Electronics-4, 1968, p. 905.
- [10] Microwaves, July 1977, p. 14.
- [11] Millimetric Waveguide Systems, IEE Conference Publication No. 146, Nov. 1976.
- [12] Bell System Tech. J. Special Issue on WT4/WT4A Systems, Oct. 1977.
- [13] S. Weinreb, et al, Microwaves, 1977.
- [14] S. E. Miller, IEEE Trans. Quantum Electronics, vol. QE-8(2), 1972, p. 199.
- [15] 田炳耕, Appl. Opt., vol. 10, Nov. 1971, p. 395.
- [16] R. E. Collin, Field Theory of Guided Waves, 1960, ch. 11.
- [17] D. Marcuse, Theory of Dielectric Optical Waveguides, 1974.
- [18] W. S. Boyle, Scientific American, Aug. 1977.
- [19] H. Kogelnik, Fiber & Integrated Optics, vol. 1 No. 3, 1978, p. 227.
- [20] J. R. Whinnery, Radio Science, Special Issue on Integrated Optics, July-Aug. 1977.



- [21] *Laser Focus*, Jan. 1978, p. 58.
- [22] *Laser Focus*, Mar. 1978, p. 42.
- [23] *Microwaves*, June 1977, p. 17.
- [24] A. H. Beck, Fourth European Microwave Conference, 1974, p. 405.
- [25] A. Yariv, *Introduction to Opto-Electronics*, ch. 12, 2nd ed., 1976.
- [26] M. S. Sodha and A. K. Ghatak, *Inhomogeneous Optical Waveguides*, 1977.
- [27] S. E. Miller, *Bell System Tech. J.*, vol. 33, 1954, p. 661.
- [28] W. H. Louisell, *Coupled Mode & Parametric Electronics*, N. Y. Wiley, 1960.  
中译本: 耦合模与参量电子学, 上海科学技术出版社, 1964.
- [29] 黄宏嘉, 微波原理, 科学出版社, 卷 I, 1963; 卷 II, 1964.
- [30] D. Marcuse, *Bell System Tech. J.*, vol. 51, 1972, p. 229.
- [31] S. D. Personick, *ibid*, vol. 54, 1975, p. 47.
- [32] H. E. Rowe and W. D. Warters, *ibid*, vol. 41, 1962, p. 1031.
- [33] A. Yariv, *IEEE Trans. Quantum Electronics*, vol. QE-9, 1973, p. 919.
- [34] A. E. Heins, *Quar. Appl. Math.*, vol. 6, 1968, p. 157, p. 215; vol. 8, 1950, p. 281.
- [35] G. D. Boyd and J. P. Gordon, *Bell System Tech. J.*, vol. 40, Mar. 1961, p. 489.
- [36] D. Slepian and H. O. Pollak, *ibid*, p. 43.
- [37] A. G. Fox and T. Li, *ibid*, p. 453.
- [38] W. Magnus and F. Oberhettinger, *Function of Mathematical Physics*, 1954.
- [39] G. D. Boyd and H. Kogelnik, *Bell System Tech. J.*, July 1962, p. 1347.
- [40] *Handbook of Math. Functions*, US NBS Appl. Math Series 55, 5th printing, Aug. 1966, p. 755.
- [41] D. J. Newman and S. P. Morgan, *Bell System Tech. J.*, vol. 43, 1964, p. 113.
- [42] H. Hochstadt, *SIAM Rev.* vol. 8, No. 1, 1966.
- [43] L. Lewin, *IEEE Trans. Microwaves Theory Tech.* vol. MTT-22, No. 10, 1974, p. 910.
- [44] *IEEE Trans. MTT-s Special Issue on Computer-Oriented Microwave Practices*, Mar. 1974.
- [45] H. Howe, Fourth European Microwave Conference, 1974, p. 301.
- [46] J. Marquardt and G. Müller, *IEEE Microwave Symposium*, 1977, p. 147.
- [47] M. Albani, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* vol. MTT-22, No. 4, 1974, p. 446.
- [48] P. R. McIssae, *ibid*, vol. 23, No. 5, May 1975, p. 421.
- [49] 黄宏嘉, 电子科学技术, 1978, 1期, 第17页.
- [50] 鲍家善, 微波超导, 本论文集.
- [51] W. C. Brown, *Proc. IEEE* vol. 62, No. 1, Jan. 1974, p. 11.
- [52] R. M. Dickinson, *IEEE Trans. MTT-s* vol. 26, No. 5, Special Issue on High-Power Microwaves, May 1978.
- [53] *IEEE Trans. MTT-s Special Issue on Microwaves in Medicine with Accent on the Application of Electromagnetic Treatment to Cancer*, July, 1978.