



GH

微波与光导波技术

应嘉年 顾茂章 张克潜

国防工业出版社

TN814
Y69

435678

微波与光导波技术

应嘉年 顾茂章 张克潜

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

微波与光导波技术/应嘉年等编. —北京: 国防工业出版社, 1996. 2

ISBN 7-118-01277-7

I. 微… II. 应… III. ①微波技术-微波理论②光波导
IV. TN015 TN814

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94) 第 01089 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京市怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 21. 7/8 494 千字

1994 年 11 月第 1 版 1996 年 3 月北京第 2 次印刷

印数: 1001—4000 册 定价 16.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我们承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想;组织我部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类教材 1991~1995 年编审出版规划,由电子物理与器件教材编审委员会电子物理与器件编审小组征稿并推荐出版。责任编委为电子科技大学张兆铨。

本教材由清华大学应嘉年担任主编,东南大学曹世昌担任主审。

自从孟昭英先生在清华大学无线电电子学系首次讲授“微波技术”课,迄今已历 40 年。在这期间,系内多位教师讲授过多种类型的微波技术课。根据多年来为物理电子技术专业开设微波技术课的经验,1987~1988 年由顾茂章和本人编著了《微波技术》一书,经电子物理与器件教材编审委员会审定、推荐,1989 年由清华大学出版社出版。在此后的五年中,随着科学技术的进步,特别是光波技术和光纤通信的迅速发展,一些学校对“微波技术”课的内容进行了更新,增加了介质光波导、介质谐振器及光学谐振腔等与光导波有关的内容,精简了某些原有内容。为此电子物理与器件教材编审小组在“八五”规划中确定组织编写本书,定名为《微波与光导波技术》,经编审组评选,选定清华大学应嘉年所编同名讲义作为编写的基础。

“微波”这门科学技术自诞生以来,经过 50 多年,有了很大的发展。它的概念与范围已大大扩展,超出“特定波段电磁波”的界线。可以说,研究对象所涉及的波长可与器件尺寸相比拟或小于器件尺寸时,都属于广义的“微波”。因此光导波技术、体声与表面声波技术、静微波技术等都是广义“微波”的内容。在这个广阔的领域中,“微波”的基本理论及概念诸如模式、相位、反射、行波、驻波、阻抗、匹配、谐振等仍然是适用的和重要的。或者说,这些基本概念在一切涉及波动过程的科学技术问题中都是适用的。正因如此,现在学习微波技术就不宜只着眼于狭义的“微波”。

本书可供大学本科电子类专业及相近专业作为教材,也可作为具有大学程度的在职工程技术人员的进修参考书。

本课程的参考学时数为 70 学时。全书分为九章。第一章为绪论。第二章是传输系统的一般场理论,给出导波系统的传输特性、模式、传输与截止、相速与群速、导波波长等基本概念,为分析实用的波导或传输线打下理论基础。第三章是传输线理论,即长线理论,它是处理波动问题的最基本的概念和方法。第四章为金属波导,第五章为介质波导与光波导,第六章为微带传输线,这三章的内容包括了现代电子与信息技术中所有常用的导波系统。第七章是微波网络或称微波电路理论,可以说它是第二章的继续和发展。网络理论是处理导波系统中不均匀性的有效方法,应用很广。第八章讲述谐振系统,包括金属谐振腔、介质谐振器及开放式光学谐振腔。第九章讲述各向异性介质在微波中的应用,包括铁氧体和等离子体。

每章之后附有习题,它是本书不可分割的部分,有助于读者学习和掌握本书的基本内

容。

本书的执笔者是应嘉年,部分内容的素材由顾茂章提供,由本人通读并定稿。主审人曹世昌教授认真细致地审阅了书稿,提出许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。限于编著者的水平,书中难免存在缺点或错误,殷切希望读者批评指正。

张克潜

1994年2月28日

内 容 简 介

本书系高等学校工科电子类物理电子与光电子技术专业的专业基础课统编教材,主要讲述微波与光导波技术的基本理论和基本分析方法。

全书共分九章,包括绪论,均匀传输系统的电磁场问题,均匀传输线,金属波导,介质波导与光波导,微带传输线,微波电路,谐振器各向异性媒质在微波中的应用。每章末均附有一定数量的习题。

本书可用作物理电子与光电子技术专业及相近专业的教材或教学参考书,也可供从事微波与光导波工作的研究人员和工程技术人员参考。

目 录

第一章 绪论	1
第二章 均匀传输系统的电磁场问题	5
2.1 柱形系统中的电磁场	6
2.1.1 场量的波动方程	7
2.1.2 纵横关系	8
2.2 导行波及其传输特性	10
2.3 导行波的分类	11
2.3.1 按 k_c 值分类	11
2.3.2 按纵向场 E_z 与 H_z 存在与否分类	13
2.4 局部平面波方法	17
2.4.1 矩形金属波导中 TE_{m0} 模	18
2.4.2 光波导中局部平面波方法	20
习题	24
第三章 均匀传输线	26
3.1 均匀传输线上的波	27
3.1.1 传输线的分布参数	27
3.1.2 传输线的物理模型——等效电路	30
3.1.3 电报方程及其解	31
3.2 终端接负载的无损线	34
3.2.1 两种坐标体系	34
3.2.2 负载反射系数和电源反射系数	35
3.2.3 传输线上任意点的反射系数	36
3.2.4 传输线上的驻波	36
3.2.5 驻波系数与驻波相位	37
3.2.6 传输线上的阻抗与导纳	38
3.2.7 阻抗、导纳与反射系数	39
3.2.8 传输线上几种工作状态	40
3.3 传输线圆图	44
3.3.1 Γ 平面上的阻抗轨迹	45
3.3.2 圆图上的反射系数	46
3.3.3 导纳圆图	47
3.3.4 圆图上的驻波系数	48
3.3.5 传输线圆图的基本用法	49
3.3.6 圆图综合应用举例	51

3.4 传输功率与传输效率	53
3.4.1 传输功率	53
3.4.2 传输效率	54
3.5 阻抗匹配及阻抗匹配器	55
3.5.1 传输系统的三种匹配状态	55
3.5.2 阻抗匹配器	57
3.6 有损传输线	61
3.7 同轴线的场分布与分布参数	63
3.7.1 无损同轴线的场解	63
3.7.2 无损同轴线的分布参数	64
3.7.3 有损同轴线的分布参数	65
3.7.4 同轴线特性阻抗的选择	67
习题	68
第四章 金属波导管	72
4.1 引言	72
4.1.1 金属波导中的传输功率	72
4.1.2 金属波导中的衰减	75
4.2 理想矩形波导	77
4.2.1 矩形波导中的电磁场一般表达式	77
4.2.2 矩形波导的边界条件	78
4.2.3 TM波(E波)	79
4.2.4 TE波(H波)	80
4.2.5 矩形波导中的模式	81
4.2.6 传播特性	83
4.2.7 传输功率	86
4.2.8 衰减常数	86
4.3 矩形波导中的主模—— TE_{10} 模	87
4.3.1 TE_{10} 模电磁场分布	87
4.3.2 TE_{10} 模波导壁表面电荷密度分布	87
4.3.3 TE_{10} 模波导壁表面电流密度分布	88
4.3.4 TE_{10} 模的功率传输	90
4.3.5 TE_{10} 模的衰减常数	90
4.3.6 TE_{10} 模的等效(特性)阻抗	91
4.4 圆波导	92
4.4.1 圆柱坐标系统中电磁场解的一般形式	92
4.4.2 圆波导的特点及其电磁场	94
4.4.3 圆波导中的TM波(E波)	94
4.4.4 圆波导中的TE波(H波)	95
4.4.5 圆波导的临界波长和模式简并	96
4.4.6 圆波导中的传输功率	97
4.4.7 圆波导中的衰减	98
4.5 圆波导中的几种常用模式	98

4.5.1 圆波导中的最低波型 TE_{11} 模	98
4.5.2 圆波导中最低的圆对称模式 TM_{01}	99
4.5.3 圆波导中损耗最低的模式 TE_{01}	101
4.6 同轴线中的横电波和横磁波	103
4.6.1 TM 波	103
4.6.2 TE 波	103
4.7 充填介质的波导	105
4.7.1 相位常数	105
4.7.2 导波波长	106
4.7.3 相速和群速	106
4.7.4 波阻抗	106
4.7.5 衰减系数	107
4.8 激励与激励装置	108
4.8.1 波导-同轴转换	108
4.8.2 磁环激励	109
4.8.3 窄缝耦合与小孔耦合	110
习题	111
第五章 介质波导与光波导	114
5.1 几何光学方法	114
5.1.1 射线方程	114
5.1.2 平面介质波导中的光线	115
5.1.3 二维限制光波导中的光线	117
5.2 平面介质波导	122
5.2.1 TM(E)模	124
5.2.2 TE(H)模	126
5.2.3 平面介质波导的截止与模式	127
5.2.4 对称平面介质波导	129
5.2.5 色散特性和模式简并	132
5.3 条型光波导	134
5.3.1 马卡梯里分区近似法	134
5.3.2 以 EH_{11} 模式为例讨论	135
5.4 阶跃折射率介质圆波导(光纤)	137
5.4.1 数字模型	137
5.4.2 场解	137
5.4.3 色散方程(本征值方程)	140
5.4.4 模式分类准则及 HE 与 EH 模式的物理意义	142
5.4.5 导波模截止条件	147
5.4.6 导波模 U 值的上、下限	150
5.4.7 基模 HE_{11}	152
5.4.8 模式简并与线极化模	153
5.4.9 弱导介质圆波导中的传输功率	156
5.4.10 介质圆波导中的损耗	157

附录 贝塞尔函数	159
习题	160
第六章 微带传输线	162
6.1 微带的模式	163
6.1.1 微带的主模——准 TEM 模	163
6.1.2 微带中的高次模	165
6.2 微带的准静态分析方法	166
6.2.1 保角变换法	168
6.2.2 有限差分法	176
6.2.3 有限导体带厚度的修正	178
6.2.4 相速和导波波长	178
6.3 微带线的损耗与衰减	178
6.4 微带的色散特性与尺寸选择	181
6.4.1 色散特性	181
6.4.2 微带的尺寸选择	182
习题	183
第七章 微波电路	185
7.1 等效传输线	187
7.1.1 等效原则与基准矢量	187
7.1.2 等效(特性)阻抗	188
7.1.3 归一化等效传输线	188
7.1.4 均匀传输系统等效为均匀传输线	189
7.1.5 等效举例	190
7.2 微波网络的各种参量矩阵	192
7.2.1 多口网络的参量矩阵	193
7.2.2 双口网络的参量矩阵	196
7.3 网络矩阵的性质	199
7.3.1 互易网络	199
7.3.2 无损网络	200
7.3.3 对称双口网络	201
7.4 基本电路单元的网络参数	202
7.5 简单不均匀性的近似分析	204
7.5.1 截面尺寸不同的传输系统的连接	205
7.5.2 TE_{10} 波导中的金属膜片和谐振窗	205
7.5.3 波导销钉	206
7.5.4 微带线不均匀性	207
7.6 双口网络	209
7.6.1 微波双口元件的工作特性	209
7.6.2 无损互易双口网络的基本特性	211
7.6.3 无损互易双口网络可以等效为理想变压器	211
7.6.4 双口元件举例	213

7.7 微波三口、四口网络	230
7.7.1 无损互易三口网络的基本特性	230
7.7.2 无损互易四口网络的特性	231
7.7.3 常用的三口、四口微波元件及其等效电路	234
习题	243
第八章 谐振器	247
8.1 谐振器的基本性质	247
8.1.1 谐振回路	247
8.1.2 谐振器振荡的基本特性	249
8.1.3 谐振器的基本参量	251
8.2 金属波导谐振腔	257
8.2.1 矩形谐振腔	257
8.2.2 圆柱形谐振腔	260
8.3 同轴谐振腔	270
8.4 微带谐振器	273
8.4.1 矩形片微带谐振器	274
8.4.2 环形微带谐振器	277
8.4.3 圆形微带谐振器	278
8.5 介质谐振器	280
8.5.1 圆柱形介质谐振器(改进磁壁法)	282
8.5.2 圆柱形介质谐振器(开波导法)	285
8.5.3 介质基片上圆柱形介质谐振器特性	287
8.6 法布里-珀罗谐振腔	288
8.6.1 理想法布里-珀罗谐振腔	288
8.6.2 孔耦合法布里-珀罗谐振腔	289
8.7 开放式光学谐振腔	292
8.7.1 共轴球面腔的稳定条件	293
8.7.2 开放式光学谐振腔中的工作模式	298
8.7.3 光学开腔的主要参量	300
8.8 谐振器与系统耦合及其等效电路	303
8.8.1 单口耦合谐振器	305
8.8.2 双口耦合谐振器	307
8.9 谐振腔的微扰	311
8.9.1 谐振腔的频率微扰公式	311
8.9.2 微扰公式的应用举例	312
习题	315
第九章 各向异性介质在微波中的应用	320
9.1 铁氧体的旋磁特性	320
9.1.1 各向异性介质和回旋介质	320
9.1.2 铁氧体的张量磁导率	321
9.1.3 铁氧体中的平面波	323

9.1.4 铁氧体中的回旋谐振现象及其应用	324
9.1.5 铁氧体中的场移效应及其应用	326
9.1.6 铁氧体中的法拉第旋转效应及其应用	327
9.2 等离子体	329
9.2.1 等离子体振荡	329
9.2.2 磁化等离子体的张量介电常数	331
9.2.3 等离子体和铁氧体比较	332

第一章 绪 论

微波和光导波是近 30 年发展起来的新技术,已经得到了广泛的应用,虽然跨越了微波到光波的广阔频率范围,但在理论上和技术上却有许多共同特点。首先,它们都是被导电磁波;其次,它们研究对象所涉及的波长均可与器件尺寸相比拟或波长小于器件尺寸,所以微波和光导波所依据的基本理论、基本概念和方法是相同或相近似的。这就是本课程要讨论的内容。

微波是电磁波谱中介于普通无线电波(长波、中波、短波、超短波)与红外线之间的波段,光导波主要应用于红外线波段,它们在电磁波谱中的地位见图 1.1。在微波波段内部又可划分为分米波、厘米波和毫米波,见表 1.1。

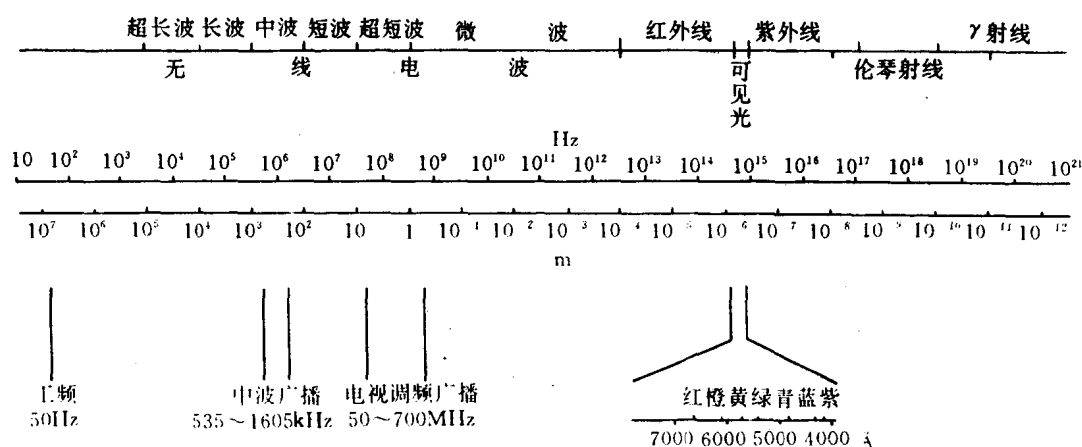


图 1.1 电磁波谱

表 1.1 微波波段

波长范围 (m)	频率范围	波段名称			
		按波长	按频率	代号	
10~1	30~300MHz	米 波	甚高频	VHF	普通无线电波与微波的过渡
1~0.1	300~3000MHz	分 米 波	特高频	UHF	
0.1~0.01	3~30GHz	厘 米 波	超高频	SHF	微 波 (超高频)
0.01~0.001	30~300GHz	毫 米 波	极高频	EHF	
0.001~0.00001	300~30000GHz	亚毫米波			微波与红外的过渡

有时用一些特定的字母来代表微波中的某一波段,这些代号起源于初期雷达研究的保密需要,后来沿用至今。它们没有严格的和统一的定义。比较通行的代号如表 1.2 所示。

表 1.2 雷达波段代号

波段代号	P	L	S	C	X	K	K _u	Q	V
波段	米波	22cm	10cm	5cm	3cm	2cm	1.25cm	8mm	4mm

光导波的目前主要研究波长范围为 $0.5 \sim 10 \mu\text{m}$, 涉及红外线与可见光。

由于我们研究的波长可以同电路或元件的尺寸相比拟,因此电磁波在电路内甚至元件内的传播时间(相位滞后)就不再是微不足道了,我们在普通无线电电子技术中使用的集总参数的概念和方法就不那么有效了。在频率较低的电路中,我们往往可以区分出电路的某一部分是电容(即电场集中的地方),另一部分是电感(磁场集中的地方)或电阻(损耗集中的地方),而连接它们的导线则既没有电容、电感,也没有电阻,这就构成集总参数电路。但是到了微波波段,元件中的电场与磁场已构成一个整体——交变电磁场或电磁波,使用的元件成为传输线、波导、谐振腔等,因此,集总参数电路的方法就失效了,代之而起的就是本书将要介绍的分布参数电路方法。当进一步过渡到红外线以至可见光,频率更高的电磁波谱时则可以采用我们熟悉的几何光学方法。而以麦克斯韦方程为基础的宏观电磁理论是研究微波与光导波技术的最基本、最重要的研究方法,习惯称为场的方法。

微波与光导波技术的发展是由实际的需要推动的,而实际应用则与它们的特点密切相关。

1. 波长短,易于实现窄波束定向辐射,且视距传播能穿透电离层

早在无线电发展的初期,人们在实践中就认识到可以利用无线电波的反射测定目标物的位置,这就是雷达的原理。为了精确定位,则必须让无线电波定向发射,也就是聚成一个窄束,不这样就无法判断反射波究竟是从哪个方向反射回来的。理论和实践表明,为了使电磁波定向发射,必须使用尺寸远大于波长的天线。例如常用的抛物面天线,它发射电磁波的波束角约等于

$$\theta = \frac{140^\circ}{D/\lambda}$$

其中 D 为抛物面直径, λ 为波长。为了得到波束角为 5° 的波束,就必须使用直径为波长 28 倍的抛物面,即使选用短波段的最短波长(10m),也要使用一个直径达 280m 的抛物面天线,这样大的天线建设在地面上已十分困难,更不用说装在船舶或飞机上了。而如果选用微波波段,例如 3cm 波段,则一个直径 84cm 的抛物面天线就可获得同样窄的波束,这样的天线装在小型歼击机上也是不困难的。因此,只有掌握了微波波段,才能使雷达的实现成为可能。

事实上,在微波发展历史的初期(40 年代),微波技术几乎是和雷达一起发展起来的。现在,雷达的种类和用途已是多种多样,如远程或超远程警戒雷达,炮火控制和瞄准雷达,火箭或航天器的制导及轨道警戒雷达,导航雷达,气象雷达,汽车防撞雷达等等,它们所使用的几乎无例外地都是微波波段。

微波易于实现定向辐射的特点还有助于点对点通信及定向广播。

光波的波长更短,它的定向辐射特性无疑更优于微波,但由于大气吸收光能,点对点通信质量随气候变化,可靠性差,通信距离短,只适用于空气稀薄的深空。光通信主要是用空间通信,而不是陆地通信。

向空间定向辐射电磁波,进行点对点通信、定向广播或接收其反射波的各种雷达测定目标位置都必须选择大气吸收电磁波能量弱的波段,即习惯称为(低损耗)大气窗口。表 1.2 中所列雷达波段就是大气窗口,进入光波范围后大气窗口为 $10.6\mu\text{m}$ 。

各波段的无线电波在空间传播特性是不一样的,长波可以沿着地球的弯曲表面传播到很远,这种传播方式叫地波。短波可以借助 $60\sim 300\text{km}$ 高空的电离层折射返回地面,这种传播方式叫天波。到了超短波、微波和光波波段,则能穿过电离层达到外层空间(视距传播),这种传播方式称为空间波。考虑到大气吸收,利用穿透电离层的视距传播通常采用微波波段。地球和宇宙空间之间的通信、卫星通信等必须使用微波。陆地通信也常用微波通信。

微波视距传播特性的不利一面是明显的,即在地球上它不能直接传播到很远的地方。因为地球表面是弯曲的球面,一个高 100m 的发射天线其作用半径只有约 40km 。为了解决微波在陆地上传播距离有限这个困难,通常采用以下几种方法:(1)中继通信(接力通信)。在发射台与接收台间设立若干中继站,站与站之间距离不超过视距,这样微波信号就可以像接力棒一样一站一站地传递下去。(2)散射通信。地面上几十公里以内的大气层叫做对流层,可以利用它对微波的散射作用进行远距离通信。(3)卫星通信和卫星广播。把中继站设立在人造地球卫星上,这样通信距离和广播的服务半径就很大了。目前广泛使用的是赤道上空距地面约 36000km 的同步轨道上的同步卫星,三颗同步卫星就可覆盖全球的大部分面积(南北极除外)。

2. 频率高,频率宽,信号容量大

任何通信系统,为了传递一定的信息必须占有一定的频带,纯粹的单频正弦波并不携带任何信息。为传递某种信息所必须的频带宽度叫做信道。例如,人耳所能听到的声音频带范围大约是 $20\sim 20000\text{Hz}$,但为了能听懂对方的语言,大约只需传递 $300\sim 3400\text{Hz}$ 这一频带的信号就足够了。也就是说,一个语音信道至少要有 3000Hz 的频带,普通电话就是这样设计的,因此电话可以听懂但不悦耳,也就是不够逼真。为了相当逼真地传送语音和音乐,则需要占 $6\sim 15\text{kHz}$ 的频带,这就是广播所要求的频带。为了传送电视图像,则需要更宽的频带。对于我国的电视制式,一路黑白的或彩色的电视加上伴音要占据 8MHz 的频带。

为了避免相互干扰,一个地区内或一条线路上各个信道所占的频带必须错开,因此在一定频段内所容纳的信道是有限的。即使采用数字通信,线路的信息容量仍然取决于线路的频带宽度。

根据目前的技术,一条通信线路(即一套发射机、接收机和传输媒介)一般只有不超过百分之几的相对带宽(频带宽度与中心频率之比),所以为了把许多路电视、电话或电报同时在一条线路上传送,就必须使信道的中心频率比所要传递的信息的总带宽高几十倍乃至百倍、千倍。因此,采用微波波段通信其信息容量就可以很大,现代多路通信系统包括卫星通信系统几乎无例外地工作在微波波段。自从 1966 年英籍华人高锟等提出,1970 年美国康宁玻璃公司研制出第一条光导纤维(损耗为 20dB/km 。波长约为 $0.8\mu\text{m}$),以及 70 年

代初实现了半导体激光器的室温连续运转以来,光纤通信有了极大的发展,十几年来已经从实验室研究变为具有巨大社会效益的产业。因为光纤通信应用的频率比微波频率更高,所以它具有极宽的频带。波长 $1.45\sim 1.65\mu\text{m}$ 是石英光纤的低损耗区,其间带宽为 $2.5\times 10^3\text{GHz}$ 是微波厘米波段频带宽度 27GHz (工作波长 $10\sim 1\text{cm}$) 的近百倍,它所能容纳的信息量就大得多。理论计算表明,一根光导纤维就可能传输高达 20000Gb/s 以上的数据率,相当于在 1min 内把人类有史以来的全部文字知识传送完毕。在未来信息社会中,光通信将发挥极为重要的作用。

3. 微波的热效应和微波能的应用

高频感应加热和介质加热早已应用在许多工业部门。在微波波段,材料的介质损耗增大,特别是含水分的材料对微波能的吸收非常有效,从而使微波成为很好的加热手段。微波加热具有效率高、透热深度大、加热迅速等一系列优点,因此,微波加热和微波烘干正日益广泛地应用于粮食、茶叶、卷烟、木材、纸张、皮革、蚕丝、纺织、食品等工农业生产部门中。微波理疗也日益广泛地被利用。

微波代替原来所用的煤、煤气或蒸汽进行加热或烘烤可以节约能源,提高产品质量,改善劳动条件,便于实现生产过程的自动化。此外,家庭烹饪用微波炉也已在越来越多的国家普及。

微波在未来能源的探索 and 开发中也起着重要的作用。例如,在受控热核聚变研究中利用毫米波电子回旋共振效应加热等离子体,在空间太阳能发电站的设计中用微波作为将能量送回地面的手段。

4. 光集成和光传感的广泛应用

在光通信中除信号传输以外,另一个重要方面是对信号的各种处理(开关、调制等)。由于光波导的尺寸非常细小,在 60 年代末就提出了“集成光学”的概念。在很小的空间范围内,将具有各种功能的导波光学器件集成在一起,再进而和有源器件、电子电路集成,称为集成光电子器件。这里“集成”主要是指各种功能的集成,而不是集成电路那样强调集成度(单位面积内的元件数)。

环境因素的变化对光波导中光的传输特性(光强、相位、偏振方向及波长)会产生较大的影响,这就可以用来对环境因素进行传感。由于光导波器件具有体积小、电绝缘、高灵敏、抗干扰以及能传感合一等优点,深受人们的重视。目前已制成应力、应变、位移、速度、液位、流量、温度、电压、电流、电场、磁场、 γ 射线以及化学成分等数十个物理量的光波导(主要是光纤)传感装置。由于信息的获取在现代社会中日益增长的重要性,这方面的研究、开发工作也是光导波技术应用的热点之一。