

国家自然科学基金重点项目 ( 61032005 ) 资助

 光电信息科学与工程类专业规划教材

# 微波光子学

## 原理与应用

蒲涛 闻传花 项鹏 方涛 编著 李玉权 审校



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

国家自然科学基金重点项目(61032005)资助  
光电信息科学与工程类专业规划教材

# 微波光子学原理与应用

蒲涛 闻传花 项鹏 方涛 编著  
李玉权 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书较为全面地介绍了微波光子学的产生背景、技术基础、基本方法和应用领域,重点介绍了在微波毫米波信号的光学产生及处理、射频任意波形产生、高速光编/解码、射频信号光传输(RoF)系统、微波阵列天线及太赫兹技术等相关技术领域的微波光子学最新研究进展。

本书可作为高等院校电子科学与技术、信息与通信工程、光学工程等学科的硕士研究生、博士研究生作为教材或参考书,也是从事光纤通信、光电技术和微波工程等相关行业的工程技术人员了解微波光子学的基本原理与应用领域的入门指南和学习指导书,对从事微波光子学研究的同行也有借鉴作用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

微波光子学原理与应用 / 蒲涛等编著. —北京:电子工业出版社, 2015.3

光电信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-25391-1

I. ①微… II. ①蒲… III. ①微波理论与光电子学—高等学校—教材 IV. ①TN201

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第009704号



策划编辑:冯小贝

责任编辑:李秦华

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:21 字数:565千字

版 次:2015年3月第1版

印 次:2015年3月第1次印刷

定 价:59.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

# 前 言

微波光子学产生于 20 世纪末期,近年获得快速发展并开始走向实用。20 世纪末,人类进入信息社会,海量信息的处理与传输成为引领科学技术进步的引擎。为适应超高速传输与处理的需求,作为信息载体的电磁波的频率越来越高,毫米波、亚毫米波的开发与利用已成必然趋势。按照传统的方法,微波毫米波信号由电子器件产生和处理。无论是真空器件还是半导体器件,产生超高速振荡都无法回避一个基本的物理过程,即电子需要一定的时间渡越特定的空间。正是这一过程形成了借助电子器件产生超高速信号的基本限制,即所谓“速率瓶颈”。为克服电子器件的“速率瓶颈”问题,除了研发新材料、新技术以开发新型器件以外,人们又另辟蹊径,利用光子学方法产生和处理微波毫米波信号。于是在 20 世纪末一个新的交叉学科——微波光子学应运而生。

为跟踪学科的发展,作者于 2003 年开始为解放军理工大学的博士研究生开设了“微波光子学原理”课程,并编写了相应的校内教材。此后又陆续承担了多项国家自然科学基金、“863”、“973”、江苏省自然科学基金、国防预研基金等有关微波光子学的研究课题,取得了一些得到学术界公认的研究成果。考虑到国内尚未见系统介绍微波光子学原理及其应用的著作问世,笔者根据所编写的校内教材和近年所取得的学术成果写成了本书,旨在为相关学科的研究生及科技工作者提供一本参考书。希望本书的出版对国内的同行有所裨益。

本书的第 1 章概略介绍微波光子学的技术背景,目的是使读者对微波光子学的产生及其研究内容有一个大致的了解。第 2 章是光子技术基础,简略介绍光波导、激光器、光检测器的工作原理及其特性。第 3 章介绍一些新型光子器件,这些器件是产生、处理微波毫米波信号的物质基础。第 4 章讲述微波毫米波信号的光学产生与处理方法,这是微波光子学的基本内容。本章中有关光电振荡器的内容主要取材于笔者及其团队的研究成果。第 5 章介绍射频任意波形的光学产生方法,射频任意波形的产生及处理在微波测量、信号实时监测方面有重要的应用价值,深受国内外学术界的关注。第 6 章介绍基于光纤光栅的高速光编/解码与光码分多址(OCDMA)通信技术,本章主要反映作者及其团队的研究成果,笔者在这一领域的研究成果及其在光网络防截获中的应用受到了高度重视。第 7 章介绍光载射频(RoF)系统,RoF 系统是微波光子学的重要应用领域,其最初的实际应用就是多路电视信号的光纤传输与分配,未来 RoF 技术将成为高速接入的支撑技术。第 8 章讲述相控阵天线相位控制网络的光学实现方法与技术,利用光延时实现微波信号的相位控制,从而实现对天线的波束控制具有很多优势,是微波光子学的重要应用领域。第 9 章讲述太赫兹波的产生与应用,太赫兹波的潜在应用范围很广,尤其是因其在安全领域的可能应用而备受关注。

本书的第 1、2 章由李玉权执笔,第 4 章、第 6 章、第 8 章和第 9 章由蒲涛执笔,第 3 章由方涛执笔,第 5 章由项鹏执笔,第 7 章由闻传花执笔,博士研究生刘颖、孙幅丹、熊景添、陈大雷、魏志虎参与了部分章节的撰写。作者的学生帮助绘制了本书的部分图表,他们是博士生刘双和陈寅芳,硕士生任珂、朱华涛和肖进良,对他们所付出的辛勤劳动,作者谨致深切的谢意。

微波光子学涉及微波理论与技术、光子学、电子学与器件等多学科领域的基础理论和专业知识。本书的作者尽管有多年从事电磁理论、微波技术、光通信等领域的教学科研工作经历，近年又参与微波光子学领域的教学与科研工作，取得了一些成果，但毕竟是一孔之见，书中出现不妥乃至错误之处在所难免，望读者不吝赐教。

作者

2015年2月于南京

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱  
电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

# 目 录

第 1 章 绪论	1	2.6 半导体激光器(LD)	31
1.1 微波光子学发展的技术背景	1	2.6.1 半导体激光器的工作机理	31
1.2 光子学技术的发展历程及最新进展	2	2.6.2 半导体激光器的工作特性	34
1.2.1 光纤技术	2	2.7 半导体光检测器	36
1.2.2 激光及光放大技术	4	2.7.1 光检测原理	36
1.2.3 光调制技术	4	2.7.2 pin 光电二极管和雪崩光电二极管(APD)	38
1.2.4 光检测技术	5	2.7.3 响应度和量子效率	39
1.2.5 光通信技术	5	2.7.4 光检测器的响应时间	39
1.3 微波毫米波技术的新进展	7	2.7.5 光检测器的噪声	41
1.4 微波光子学的进展及应用	8	第 3 章 新型光子器件技术	43
1.4.1 微波毫米波的光学产生方法	8	3.1 高频直接调制半导体激光器	43
1.4.2 微波毫米波信号的光域处理	8	3.1.1 张弛振荡频率	43
1.4.3 系统应用	9	3.1.2 交调失真	45
第 2 章 光子技术基础	10	3.1.3 共振调制	46
2.1 平面及条形光波导传输原理	10	3.2 超短脉冲激光器	47
2.1.1 薄膜波导	10	3.2.1 锁模光纤激光器	47
2.1.2 对称薄膜波导	12	3.2.2 锁模半导体激光器	49
2.2 条形光波导及带状波导	12	3.2.3 增益开关半导体激光器	50
2.3 光纤中的传播模式	15	3.2.4 电光调制器组合光源	52
2.3.1 光纤中的电磁场方程	15	3.2.5 超连续(SC)谱脉冲光源	54
2.3.2 传播模式	16	3.3 窄线宽光纤激光器	54
2.4 光纤的色散特性	19	3.3.1 DBR 光纤激光器	55
2.4.1 群速度色散	19	3.3.2 DFB 光纤激光器	55
2.4.2 偏振模色散	22	3.4 电光调制器	56
2.5 光纤的非线性特性	23	3.4.1 MZM 的主要参数	56
2.5.1 光纤的非线性折射率	23	3.4.2 MZM 的调制曲线	57
2.5.2 自相位调制(SPM)	23	3.4.3 MZM 的输出信号	58
2.5.3 交叉相位调制(XPM)	24	3.4.4 MZM 输出信号的频谱分析	59
2.5.4 光孤子传输	25	3.4.5 MZM 的偏置点选择	60
2.5.5 四波混频	26	3.5 高速光检测器	61
2.5.6 受激拉曼散射(SRS)	27	3.5.1 超宽带型光电检测器	61
2.5.7 受激布里渊散射(SBS)	30	3.5.2 高饱和电流型光二极管	63

3.5.3	平衡光检测器	64	4.5.5	微波光子滤波器实现方法	
3.5.4	高速光检测器小结	66	小结		141
3.6	光纤光栅	66	4.6	基于布里渊效应的微波毫米信号	
3.6.1	光纤光栅的基本概念	66	光学产生及滤波方法		141
3.6.2	FBG 的分类	67	4.6.1	多波长布里渊光纤激光器	142
3.6.3	光纤光栅的制作方法	69	4.6.2	基于多波长布里渊光纤环形激光	
3.6.4	光纤光栅的应用	70	器的微波信号产生方法与实现		143
3.7	非线性光纤光学器件	70	4.6.3	基于布里渊选择放大技术的	
参考文献		71	微波信号产生方法		149
<b>第 4 章</b>	<b>微波毫米波信号的光学产生及</b>		4.6.4	基于布里渊散射的光载波	
	<b>处理</b>	74	抑制滤波		151
4.1	基于光学拍频的微波毫米波信号		参考文献		155
	产生方法	74	<b>第 5 章</b>	<b>基于光子学原理的射频任意波形</b>	
4.1.1	外调制产生光生毫米波	75		<b>产生技术</b>	158
4.1.2	锁相激光器外差法	80	5.1	概述	158
4.1.3	基于双波长激光器的光生毫米		5.1.1	基于傅里叶变换光脉冲整形	
	波产生技术	83	的光学任意波形产生		158
4.2	基于超连续光谱的微波信号		5.1.2	基于光脉冲频谱整形与频率-时间	
	产生方法	84	映射的光学射频波形产生		160
4.3	基于光电混合振荡器(OEO)的毫米		5.1.3	基于直接空-时域脉冲整形的	
	波信号产生方法	89	光学射频波形产生		163
4.3.1	光电振荡器的研究现状	90	5.1.4	基于微波光子滤波器的光学	
4.3.2	光电振荡器的关键技术	93	射频波形产生		164
4.3.3	光电振荡器的应用	107	5.1.5	基于时域脉冲整形的光学射频	
4.4	微波光子滤波器的原理	109	任意波形产生技术		164
4.4.1	不同抽头系数的微波光子		5.2	典型的 OAWG 实现方法	166
滤波器		111	5.2.1	基于傅里叶变换光脉冲整形的	
4.4.2	不同光源类型的微波光子		任意波形产生		166
滤波器		112	5.2.2	基于光脉冲频谱整形与频率-	
4.4.3	微波光子滤波器的性能指标	117	时间映射的任意波形产生		175
4.5	微波光子滤波器的实现方法	122	5.2.3	基于直接空间-时域光脉冲整形的	
4.5.1	有负系数的微波光子滤波器的		任意波形产生技术		183
实现方法		123	5.2.4	基于微波光子滤波器的射频	
4.5.2	单光源微波光子滤波器的		任意波形产生技术		187
实现方法		125	5.2.5	基于时域光脉冲频谱整形的	
4.5.3	多光源微波光子滤波器的		射频波形产生技术		189
实现方法		128	5.3	OAWG 的发展趋势	192
4.5.4	克服相位噪声限制的方法	136	5.3.1	动态可重构的 OAWG	192



5.3.2 集成化的 OAWG .....	198	7.4.2 使用上行的光上转换和下行的再 调制 OOK 的双向 RoF 链路···	260
参考文献 .....	202	7.4.3 基于布里渊散射的全光变频 的 RoF 系统 .....	263
<b>第 6 章 高速光编/解码技术及其应用</b> ..	204	7.4.4 基于光注入条件下 DFB 激光器 产生单边带调制信号 .....	268
6.1 OCDMA 通信及光编/解码概述 ..	204	<b>7.5 RoF 系统的应用</b> .....	270
6.2 OCDMA 技术的原理及特点 .....	204	7.5.1 RoF 在卫星通信中的应用 .....	270
6.3 OCDMA 技术的发展历程 及分类 .....	205	7.5.2 RoF 在移动通信中的应用 .....	271
6.4 OCDMA 的关键技术 .....	209	7.5.3 宽带无线接入 .....	272
6.4.1 码字构造技术 .....	209	7.5.4 智能交通通信和控制 .....	274
6.4.2 光编/解码技术 .....	210	7.5.5 军事应用 .....	275
6.4.3 OCDMA 系统技术 .....	215	<b>7.6 RoF 系统的发展趋势</b> .....	276
6.4.4 基于 SSFBG 的真实相移 (TPS) 编/解码器 .....	216	7.6.1 低成本激光器 .....	277
6.4.5 基于 SSFBG 的等效相移 (EPS) 编/解码器 .....	218	7.6.2 系统中的光纤 .....	277
6.5 高速保密 OCDMA 通信系统 .....	224	7.6.3 调制收发器 .....	280
6.5.1 单用户 2.5 Gb/s 60km 传输 实验 .....	224	参考文献 .....	280
6.5.2 双用户 2.5Gb/s 100km 传输 实验 .....	227	<b>第 8 章 微波阵列天线的光学控制技术</b> ..	282
参考文献 .....	231	8.1 相控阵天线原理 .....	282
<b>第 7 章 射频信号光传输系统</b> .....	235	8.2 真时延对相控阵雷达性能 的提高 .....	284
7.1 RoF 概述 .....	235	8.3 光控相控阵天线 .....	285
7.1.1 RoF 的优势及问题 .....	235	8.3.1 光控相控阵天线国外研究 现状 .....	286
7.1.2 用于 RoF 系统的新技术 .....	236	8.3.2 光控相控阵雷达技术的应用 前景 .....	288
7.2 RoF 的系统构成 .....	237	8.3.3 光控相控阵雷达的关键技术 ..	288
7.2.1 用于无线通信网的 RoF 系统 构成 .....	237	<b>8.4 光真时延迟线的实现方法</b> .....	289
7.2.2 RoF 系统的结构 .....	239	8.4.1 基于时延切换的 OTTD 及波束 形成技术 .....	290
7.3 射频信号在光纤中的传输损伤 ..	240	8.4.2 基于空间光调制器和偏振分束 器的波束控制结构 .....	291
7.3.1 RoF 系统的主要性能指标 .....	240	8.4.3 基于色散器件的波束形成 实现方案 .....	293
7.3.2 RoF 系统中色散对传输信号 的影响 .....	249	8.4.4 基于超结构光纤光栅的时延 实现方法 .....	295
7.3.3 光纤色散对 OFDM 信号传输 性能的影响 .....	256	<b>8.5 光子射频移相器的实现方法</b> .....	297
7.4 RoF 系统的典型实现 .....	257	8.5.1 基于外差混频技术的光子 射频移相器 .....	297
7.4.1 应用光 PSK 调制的 60 GHz RoF 下行链路系统 .....	257		

8.5.2 基于矢量和技术的光子射 频移相器.....	298
参考文献.....	300
<b>第9章 太赫兹技术.....</b>	<b>302</b>
9.1 太赫兹辐射的产生方法.....	302
9.1.1 基于超快激光技术的太赫兹 辐射源.....	303
9.1.2 基于光学差频和光学参量方法 的太赫兹辐射源.....	306
9.2 太赫兹信号的检测技术.....	309
9.2.1 相干探测.....	309

9.2.2 非相干探测.....	311
9.3 太赫兹功能器件.....	312
9.3.1 固态集成电路太赫兹放大器.....	312
9.3.2 光子晶体太赫兹器件.....	313
9.3.3 表面等离子体太赫兹器件.....	316
9.4 太赫兹通信技术.....	318
9.4.1 基于光学方法的太赫兹无线 通信系统.....	319
9.4.2 光载太赫兹波传输系统.....	322
9.5 太赫兹技术的潜在应用领域.....	324
参考文献.....	325

# 第1章 绪 论

## 1.1 微波光子学发展的技术背景

微波光子学是传统的微波毫米波技术与光子学相结合的产物。自 20 世纪 60 年代初激光技术问世，人们便开始探索将激光技术与射频技术相结合，以解决通信与信息科学中的关键问题。激光技术在信息科学中最成功的应用领域便是光纤通信。光纤通信向超高速传送网络发展，除光纤和光电子器件之外，超高速微波器件是支撑整个系统的关键因素。同时，随着对微波频段高端的不断开发利用，传统微波技术遇到了一些难以克服的困难，借助于光子技术有可能使这些难题迎刃而解。两个方面的推动导致了一个新兴交叉学科——微波光子学在 20 世纪 90 年代以后得到了快速发展。

20 世纪 50 年代微波技术在雷达、通信领域的应用是电子学领域最为重要的成果之一，尤其是以卫星通信为代表的天基信息技术更是被视为微波领域的尖端成果。随着微波技术应用领域的不断拓展，微波频段的频谱资源显得日益紧缺，因而不断开发新的频段，拓宽可用频段就成为微波学科最前沿的研究课题。解决微波频段频谱资源紧缺这一难题有两个可能的途径，一是开发毫米波乃至亚毫米波频段；二是开发光频频段。光纤通信是开发光频段最成功的例子，目前除用户接入网以外光纤已经完全取代铜缆，成为固网的主要传输手段。而且，“光进铜退”，接入网的光纤化已成必然趋势。光交换、光存储、光计算等关键技术是目前光信息技术领域的前沿研究课题。开发毫米波乃至亚毫米波（太赫兹）频段也取得了重要进展。但是这一频段尤其是亚毫米波段处在光频与传统的微波频段之间，具有一系列特点，毫米波尤其是亚毫米波的产生、传输、处理受电子器件的速率瓶颈影响，遇到了很大的困难。这一频段的电磁波会受到大气的吸收，传输损耗极为严重，因而毫米波、亚毫米波的传输问题也是目前的研究热点。采用光子学的理论与技术解决微波毫米波领域利用传统的电子学方法难以解决的问题，是 20 世纪 90 年代以后提出的新的途径。为解决其中的基本理论问题与关键技术问题，从而形成了一个新的交叉学科，即微波光子学。

这个新的交叉学科主要包括：微波毫米波信号的光学产生方法；微波毫米波信号的光域处理方法；光载微波毫米波信号的传输问题；太赫兹信号的产生、传输、处理原理及实现技术以及相关的现实及潜在应用领域等。

其实，对于微波光子学的基本原理研究早在微波技术产生的初期即已开始，但是限于光子技术发展水平，一些关键技术问题难以解决，长期未受到重视。20 世纪 70 年代，半导体激光器和低损耗光纤的研制成功是光子技术成熟并走向大规模应用的起点。新型半导体激光器及高速光检测器技术、高速光调制技术、光放大技术的成熟则为微波光子学的发展提供了必要的技术基础。

## 1.2 光子学技术的发展历程及最新进展

20 世纪中期,微波通信技术特别是卫星通信技术的成功,使信息传输进入高速、宽带时代,标志人类社会正逐步跨入信息社会阶段。微波频段相对于传统的中波和短波频段可以为人们提供宽得多的频谱资源,但是人们对宽频带的追求是没有止境的,射频波段有限的频谱资源无法满足信息社会的需要。很自然,人们将目光投向光频段,可见光和近红外波段的电磁波频率比传统的微波频段要高出 4~5 个数量级,其频谱资源几乎是用之不竭的。利用光波作为信息的载体,实现信息的大容量、远距离传输和高速、实时处理是科学家和工程师们追求的目标。为了实现这一诱人的目标,就必须解决高速光信号的产生、检测和低损耗传输等关键问题。这些问题在 20 世纪 60 年代至 70 年代,随着低损耗光纤和半导体激光器的问世迎刃而解。

### 1.2.1 光纤技术

利用对光透明的玻璃材料做成波导,引导光波在期望的方向上传输这一思想可以追溯到 20 世纪初。遗憾的是,利用已有的最好的玻璃材料制作的光波导或光导纤维(光纤),其损耗也不低于 1000 dB/km。显然,这样的光导纤维不能作为远距离传输介质。1966 年华裔科学家高锟在他的著名论文中解决了石英光纤损耗的理论问题,指出石英玻璃的损耗主要来源于材料中的杂质。只要将石英中的杂质含量降低到一定程度,便可将损耗降低到 20 dB/km 以下。如何才能得到这种高纯度的石英玻璃呢?

1970 年美国康宁公司研制成功第一根低损耗光纤,损耗约为 20 dB/km。此后,制作工艺不断改善,光纤损耗进一步下降。目前,石英光纤在 1550 nm 窗口的损耗已经低于 0.2 dB/km。最基本的光纤制作方法是首先制成光纤预制棒,然后由拉丝机拉制成光纤。最常用的预制棒制作工艺称为化学气相沉积法(CVD),又称气相氧化法(VPO)。其基础材料为纯石英,再掺进少量的杂质(例如  $\text{GeO}_2$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  等)以产生所需要的细微折射率变化。纯石英掺锗,其折射率会略有增加,可用于制作纤芯;掺硼,则折射率略有下降,可用于制作包层。而纯石英则由  $\text{SiCl}_4$  和  $\text{O}_2$  反应生成,即



由美国康宁公司于 1972 年开发的 OVD(Outside Vapor-phase Deposition)方法是世界上第一种成功制造光纤预制棒的方法,如图 1-1 所示。 $\text{SiCl}_4$  和掺杂气体从左边进气口进入, $\text{O}_2$  则从右边进入,在反应室生成的石英玻璃粉尘经喷口喷出,沉积在石英芯棒上,芯棒匀速旋转并左右平移即可沉积形成需要的预制棒。由于这种工艺采取在目标石英棒的外部沉积形成预制棒,所以称为外部气相沉积法。

以石英作为基础材料的光纤,因其损耗低,而且低损耗窗口在近红外波段(800~1600 nm),与之相适应的发光器件、光检测器件易于获得,所以自问世以来一直是最主要的信息传输介质。

采用塑料作为纤芯和包层材料制作的光纤,称为塑料光纤,也称为聚合物光纤(POF),也有广泛的用途。塑料光纤的优点是柔软性好、制作成本低;其主要缺点是损耗大,塑料光纤的典型损耗值则可达到每千米数百分贝(dB/km)。近年来,光接入网技术快速发展,光纤到

家(FTH)成为未来的主要接入方式。对于 FTH, 由于传输距离短, 损耗不是主要问题, 因而塑料光纤的低成本性就特别具有竞争力。

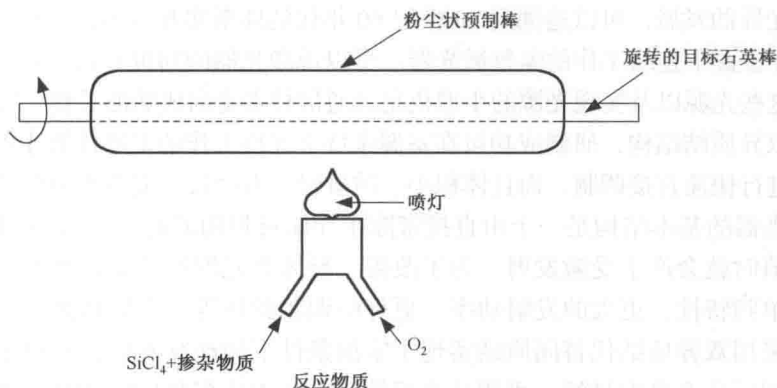


图 1-1 采用 OVD 工艺制作光纤预制棒的示意图

以氟化物为基础材料的光纤具有极低的传输损耗, 实验室制作的这种类型的光纤的最低损耗可达  $10^{-3}$  dB/km 量级, 对于长距离无中继传输具有无可比拟的优势。但是这类光纤的低损耗窗口在长波长段(数千纳米至数十千纳米), 研制与之相应的发光器件和光检测器件遇到困难, 因而其应用受到限制。

光子晶体光纤是近年研制成功的新型光纤。所谓光子晶体实际上就是一种具有类似于晶体晶格的周期结构新型材料。这种周期结构导致所谓光子带隙, 光子带隙是指在某些能量范围内的光子不能在光子晶体中传播。这与半导体中的电子带隙是可以类比的, 因而被业界称为“光半导体”或“未来的半导体”。光子晶体光纤则是一种二维光子晶体, 即在二维光子晶体的长度方向制造连续的缺陷, 实现对光的横向局域性, 使之在缺陷内沿纵向传播。早期的光子晶体光纤都是由石英制作的, 即在石英光纤中按特定的规律分布着若干空气隙, 中心的空气隙破坏了周期性, 形成缺陷, 其横截面结构如图 1-2 所示。由于周期参数及缺陷可以灵活设计, 因而可以按需要设计各种用途的光子晶体光纤。通过适当的设计, 可使光子晶体光纤具有奇异的色散特性、高非线性。可以用于长途传输系统中的色散补偿, 可以在多种需要高非线性的环境下应用。利用光子晶体可以制作多种光纤器件。近年来的研究表明, 利用光子晶体制作各种传感器, 有可能实现光纤传感器的飞跃式发展。

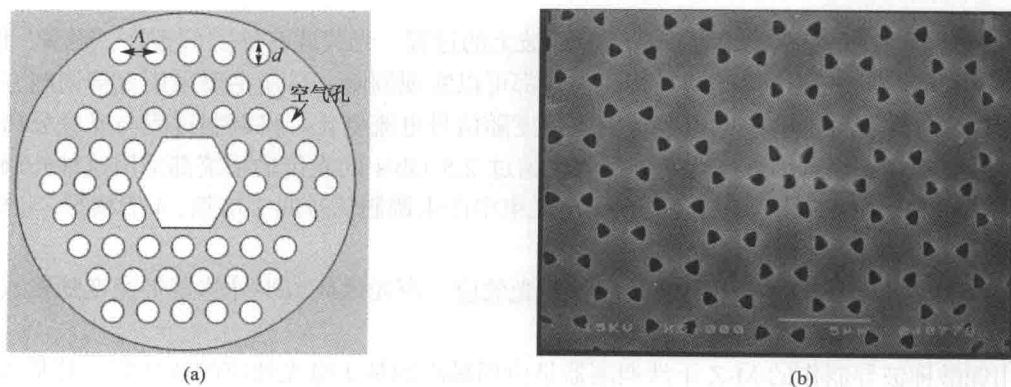


图 1-2 (a)带隙导光型光子晶体光纤的横截面结构示意图; (b)世界上第一根带隙导光型光子晶体光纤的显微照片

### 1.2.2 激光及光放大技术

第一代激光器的发展,可以追溯到20世纪60年代的休斯实验室的脉冲红宝石激光器以及贝尔实验室的在室温下连续工作的氦氖激光器。可以说激光器的问世开启了光通信时代之门。如何高速调制这些光源以及实现光源的小型化是光通信技术走向成熟的关键。1970年,贝尔实验室采用所谓双异质结结构,研制成功可在室温条件下连续工作的半导体激光器。这种器件可以通过结电流进行快速直接调制,而且体积小、质量轻、寿命长,成为光通信的首选光源。

半导体激光器的基本结构是一个由直接带隙半导体材料构成的pn结,这种结构在正向偏置电流超过阈值时就会产生受激发射。为了改善半导体激光器的性能,例如获得更低的阈值电流、更好的单频特性、更大的发射功率、更好的调制特性等,半导体激光器的结构经历了多方的改进。采用双异质结代替同质结实现了室温条件下的连续发射;采用多量子阱结构将阈值电流降低到了几个毫安量级;采用分布反馈(DFB)或分布布拉格(DBR)结构实现动态单模振荡,将发射线宽降低到兆赫兹(MHz)量级甚至更窄。

光纤激光器的问世是继半导体激光器以后激光技术所取得的又一重要进展。光纤激光器与半导体激光器相比,发射谱线更窄,可达千赫兹(kHz)量级;发射功率更大,可达数百毫瓦(mW)。这种激光器在通信、激光雷达、甚至激光武器领域的潜在应用价值备受关注。

光放大器可以将光信号直接放大,而不必经过光-电-光的转换,这对于光信号的长途传输具有重要意义。最直接的光放大器就是利用正向偏置半导体pn结的受激发射放大机理制作的半导体光放大器(SOA)。半导体光放大器的主要优点是其工作频带易于与信号光源匹配,而且增益较高;主要缺点是噪声系数较高,而且不易获得宽带放大。20世纪80年代末由英国南安普敦大学最先研制成功的掺铒光纤放大器(EDFA)是光放大技术的一个里程碑。这种放大器是在石英光纤中掺入稀土元素铒离子作为激活介质实现对信号光的受激辐射放大,其工作频带正好与石英光纤的最低损耗窗口(1550 nm)吻合,而且噪声低、增益高,为高速长距离传输系统提供了最合适的直接放大手段。由于EDFA的优异性能,使得很多光信号处理手段有可能实现。以EDFA为基础的掺铒光纤激光器也是应用最广的光纤激光器。在石英光纤中掺入其他稀土元素,可以获得需要的其他工作频带。例如掺入镨离子,实现的光纤放大器(PDFA)可以有效地放大石英光纤另一低损耗窗口(1310 nm)的光信号。

### 1.2.3 光调制技术

所谓光调制就是将信息信号加载到光载波上的过程。光载波有幅度(光强)、频率、相位、偏振态等特征参数,通过改变这些特征参数都可以实现调制。早期主要采用直接调制方式,通过改变半导体光源的注入电流实现发光强度随信号电流变化。将调制过程与光源分离,即外调制是实现高速调制的最佳方案。目前,超过2.5 Gb/s的光传输系统都采用这种外调制技术。由调制过程中的非线性效应,会在输出光束中产生调制信号的2倍频、4倍频等,经检测,可以实现毫米波的产生。

外调制是通过一些物质的电光效应、磁光效应、声光效应或半导体禁带宽度随输入光变化的效应实现的。

用铌酸锂波导制作的M-Z干涉调制器是应用最广的基于电光效应的调制器,其基本结构和性能将在3.4节详细讨论。

电吸收(EA)调制器因其易于与半导体集成,得到了广泛应用。这种调制器的工作机理是半导体材料中的 Franz-Keldysh 效应,即在外加电场作用下半导体材料的禁带宽度变窄,当调制电压加在由这种材料构成的 pn 结上时,入射光子的能量将被价带中的电子吸收,而未加调制电压时其禁带足够宽,入射光子的能量不能激励价带中的电子,光束可以无损耗地通过。采用多量子阱结构可以有效地提高调制器的效率。

#### 1.2.4 光检测技术

光检测实际上就是光调制的逆过程,即将信息信号从光载波上解调下来。半导体光电二极管是使用最广泛的光检测器件。信号光照射在半导体二极管的光敏面上,进入二极管内部的光子如果其能量大于半导体的禁带宽度,则其能量将被价带中的电子吸收并跃迁到价带中,形成电子-空穴对。如果 pn 结反向偏置,则在外电路中形成光生电流,光生电流的大小与入射光功率成比例,可以表示为

$$i_p = RP_{in} \quad (1.2-2)$$

式中,  $i_p$  是光生电流,  $P_{in}$  是入射光功率,  $R$  称为光电二极管的响应度,是光检测器最重要的参数之一,它反映了检测器将光信号转换为电信号的能力或效率。光检测器的另一个重要参数是其响应时间或响应带宽,它主要决定于 pn 结的结电容和电子穿越结区的渡越时间。最常用的光检测器是 pin 型光电二极管,这种结构的光电二极管兼有高效率、高带宽的优点。目前, pin 型光检测器的 3 dB 带宽已达 100 GHz,完全可以满足一般应用。如果需要高灵敏度,可以采用 APD,即雪崩光电二极管。这种器件具有内部增益,可以获得极高的检测灵敏度,特别适合于检测微弱光信号。APD 的附加噪声系数较大,另外需要加较高的反向偏压,这为使用带来不便。所以除非特别需要,一般不使用 APD 型光检测器。在许多微波光子学的应用中使用金属-半导体-金属光检测器。这种器件的主要优势是用于光控微波单片集成电路(MMIC),它可与场效应管(FET)实现集成,有报告指出,其带宽可达 78 GHz。采用行波技术和使入射光束与结平面平行的结构可以提高器件的最高可用频率,据报道,这种结构的光检测器频率响应可达 110 GHz。

#### 1.2.5 光通信技术

自 1970 年低损耗光纤、半导体激光器问世以后,光通信技术得到了飞速发展,尤其是光纤通信发展更为迅速。光纤通信的发展历程可以归结为:传输速率从中低速到超高速;从点对点传输的传输手段到智能化的光网络;工作方式从单一的强度调制/直接检测(IM/DD)到包括光孤子通信和相干通信在内的多种方式;从大气光通信开始,到以光纤通信占主导,再发展到高速空间光通信;使用频段从近红外到包括远红外、紫外在内的各个频段。

在 20 世纪 70 年代,光纤通信作为一种全新的通信方式问世时,其传输速率在数十兆比特每秒(Mb/s)量级。采用电域时分复用(TDM)技术,到了 20 世纪 90 年代末,单波长系统的传输速率已达 10 Gb/s,近年 40 Gb/s 的系统已经商用化。受电子器件的速率限制,采用电域 TDM 技术获得更高的传输速率已相当困难。为了充分利用光纤的可用带宽[可达数十太赫兹(THz)],光域复用技术在超高速传输系统中扮演了极为重要的角色。主要的光域复用技术包括波分复用(WDM)、光时分复用(OTDM)、光码分复用(OCDM)。WDM 是在同一根光纤上

同时传输波长不同的多个光载波的复用技术，可以认为是光域的并行传输技术；OTDM 则是将来自不同支路的光信号安排在不同的时隙中传输的光域串行传输技术；OCDM 则是将不同支路的光信号按一组正交(或准正交)的码序列中不同的码字进行编码以后馈入同一根光纤，在接收端采用相关解码的光域扩频通信技术。WDM 技术自问世以来一直是主要的光域复用技术，目前已经可以在同一根光纤中同时传输数以百计的光载波，传输容量已经超过 10 Tb/s。

最初，光纤通信用于电话网中的局间中继，尔后主要用于长途干线传输。在网络节点处仍采用电交换手段，由于电子器件的速率限制，交换节点成为高速通信网的瓶颈。如果在通信网中能够实现从源节点到目的节点信息的全光透明传输，即传输与交换都在光域完成，则将彻底克服电子器件的速率瓶颈，这就是全光通信追求的目标。由于光信号的缓存、逻辑及频率变换等技术尚未达到商用化水平，全光通信还难以实现。但是基于光放大、光分插复用、光交叉连接的光传送网已经成为固定通信网的主体。在光传送层之上，引进控制层，实现光网络资源的实时、动态的按需配置，这就是 21 世纪初提出的自动交换光网络(ASON)的基本思想。目前，ASON 技术已在骨干网中得到应用。下一代网络(NGN)是基于 IP 的网络已无悬念，所以光网络向基于光分组交换的光因特网演进也是必然趋势。

传统的光通信系统都采用强度调制/直接检测(IM/DD)方式。这种方式简单、可靠，但是只利用了光载波的幅度信息，而其频率、相位、偏振态等特征参量都未利用。与 IM/DD 方式相对应的是相干通信，相干光通信系统在发送端采用 ASK、FSK 或 PSK 等调制方式，而在接收端则采用外差或零差检测。相干光通信对光源发射频率的稳定性要求近乎苛刻，调制、检测比 IM/DD 系统要复杂得多，但是由于有混频增益，其检测灵敏度要高得多。相干光通信系统的检测灵敏度可以接近光通信系统灵敏度的量子极限，达到每比特 20 光子。而 IM/DD 系统则因热噪声等因素的影响，灵敏度在每比特 1000 光子左右。也就是说，相干光系统比 IM/DD 系统的灵敏度要高将近 20 dB。对相干光通信技术的研究始于 20 世纪 70 年代末，几乎是与光纤通信同步的，但由于其技术复杂，而且掺铒光纤放大器(EDFA)的问世基本上解决了 IM/DD 系统灵敏度低的问题，所以在光纤通信网中 IM/DD 技术仍居主导地位。尽管如此，在一些特殊的需要检测极弱光信号的应用中，相干光通信的高灵敏度仍然是关注的焦点，例如在一些光检测仪表中。在卫星光通信系统中，由于发送端与接收端之间的距离很远(可达数千甚至数万千米)，自由空间传输损耗极大，中间又不可能加光放大器，相干检测系统有可能成为首选方案。光孤子通信是一种非线性通信技术。光纤的非线性效应在一定条件下可以与色散效应达到平衡，使得光脉冲在传播过程中保持形状不变，也就是形成所谓光孤子。光孤子通信系统可以克服光纤色散所导致的传输过程中光脉冲的展宽，从而从根本上克服色散对光纤通信容量的限制。

始于大气传输的光通信研究遇到了大气信道的不稳定性、遮挡、光束发散等诸多不利因素。在低损耗光纤问世以后，光纤通信迅即成为主流技术。近年来，由于无线电频谱资源的匮乏、应急通信、高带宽接入、军事通信领域的需求，无线光通信重新受到重视。卫星通信在全球通信网尤其是军事通信中扮演着极为重要的角色。传统的卫星通信工作在微波频段，目前可用的频谱资源已极为匮乏，而且微波波束相对较宽，容易被截获、被干扰。如果采用激光束作为卫星通信的信息载体，则这些问题便迎刃而解。卫星光通信可以极大地提高通信容量，以满足未来军事信息系统海量信息传输、处理的要求；光束窄，很难被敌方截获，也不易受到恶意的电磁干扰；光学天线尺寸小、质量轻，可以有效地提高卫星的有效载荷。正



是由于这些特点,卫星光通信技术受到了美国、欧洲、日本等发达国家军方的高度重视,相继投入巨资进行前期研究和实验研究,目前已有多个实验系统在轨运行。地面光通信系统因其架设简单、易于开通等特点,在应急通信、不宜铺设光缆的区域等应用场合受到青睐。利用无线光通信作为短距离、大容量的接入手段也备受关注。传统光通信,无论是光纤通信还是无线光通信都工作在近红外频段。这是因为石英光纤在近红外频段有低损耗窗口,其最低损耗窗口在 1550 nm 附近,同时在此窗口大气对光束的吸收相对较低,近红外频段的发光器件及检测器件都很成熟。近年人们开始关注紫外光通信。在 200~400 nm 频段,太阳强烈的紫外辐射被大气层吸收,因而背景光噪声较弱,同时近地大气对紫外线强烈散射,使得可以在非视距范围接收紫外信号。由于这一特性,利用波长 200 nm 的紫外线作为信息载体实现近距离的通信受到关注。紫外通信保密性能好、抗干扰能力强、通过散射机理可非视距接收,因而受到军方的重视。美军已有的紫外通信设备可以实现数千米的视距与非视距通信。

### 1.3 微波毫米波技术的新进展

广义的微波频段是指电磁频谱中 300 MHz~300 GHz 的射频波段。有时又将 300 MHz~3 GHz 称为分米波频段,3~30 GHz 称为厘米波频段,30~300 GHz 称为毫米波频段,高于 300 GHz 则称为亚毫米波段或太赫兹频段。

第二次世界大战期间,由于雷达的应用,微波技术获得了快速发展。受器件的限制,早期的雷达工作在微波频段的低端,即分米波和厘米波频段。早期的微波产生及放大器件都是真空器件,磁控管、速调管、行波管、返波管是最常用的微波管,前两种器件工作带宽较窄,后两种是宽带器件。真空器件的主要优点是发射功率大、增益高,在一些大功率微波系统中,行波管至今还是不可或缺的器件;其缺点是体积大、无法与其他器件集成,早期的真空器件也只能工作在微波频段的低端。20 世纪 70 年代以后发展起来的电子回旋脉塞(回旋管)是一种新型的微波毫米波源,这种器件可以产生高功率的毫米波乃至亚毫米波振荡。但是这种器件体积庞大、成本高,很难在通信与信息系统中应用。

近年来在提高真空器件的工作频率,器件小型化、模块化方面取得了显著进展。这要归功于近年计算电磁学的成果,导致微波器件的计算机辅助设计技术取得长足进展;纳米技术的进步,为研制新型阴极材料、器件小型化提供了新途径。目前小型化的真空器件工作频率已突破 300 GHz,功率达到数十毫瓦(mW)。近期报道的一些太赫兹应用系统实验样机,都采用真空振荡源。

半导体器件及集成电路的问世,是电子信息技术的里程碑。早期的半导体器件受材料和工艺的限制,很难在微波频段工作。用于微波波段的双极晶体管和场效应管将半导体器件的振荡和放大频率提高到了毫米波波段。进一步提高半导体器件的工作频率主要受限于电子渡越 pn 结的时间、结电容及电路分布电容。近年来,纳米加工工艺使得微电子器件的尺寸及功耗更小。基于“能带工程”构成的新型半导体材料,其禁带宽度可以按需要控制,这为制造高端电子器件奠定了基础。基于这些新技术,已经研制成功并工作在太赫兹频段低端,即数百吉赫兹(GHz)频段的电子器件。

电子器件,无论是真空器件还是固体器件,都在探索新的机理、新的材料和新的工艺,以实现可工作在太赫兹频段低端的器件,从而形成了“太赫兹电子学”这一崭新的分支学科。