



光电子技术 基础实验

GUANGDIANZI JISHU
JICHU SHIYAN

周 骏 主编



-33
5



化学工业出版社

TN2-33
Z775



郑州大学*040107477894*

光电子技术 基础实验

GUANGDIANZI JISHU
JICHU SHIYAN

周 骏 主编



化学工业出版社

· 北京 ·



TN2-33
Z775

图书在版编目 (CIP) 数据

光电子技术基础实验/周骏主编. —北京: 化学工业出版社, 2012.3

ISBN 978-7-122-13336-6

I. 光… II. 周… III. 光电子技术-实验 IV. TN2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 015666 号

责任编辑: 宋 辉

文字编辑: 云 雷

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 10 $\frac{1}{4}$ 字数 243 千字 2012 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究



前 言

在 20 世纪,现代光学与电子学的结合产生和建立了光电子学,并取得辉煌成就,在信息、能源、材料、航天、生命、环境等军事和民用科技领域获得广泛应用。近年来,以光电子学为基础发展起来的光电子技术成为标志性高新技术,光电子产业成为光电信息领域的主导产业,国内外建立了多个大规模光电子企业和光谷园区,光电子技术的强劲发展对相应人才的需求猛增。正是在这样的背景下,各大学的许多专业,例如应用物理学、光信息科学与技术、电子与通信工程、电子信息工程和计算机应用等,纷纷开设了光电子技术方面的专业课程,以培养具有光电信息专业知识的人才,培养我国光电信息技术和产业的后备力量。

为满足社会对于既具有光电子学基本理论知识、又掌握相关实用技术的人才的需求,也为了帮助相关专业的学生将所学专业基础知识与今后从事实际工作所需的基本技能有效地衔接,编者结合自身教授光纤通信和光电子技术的理论课程与实验课程的经验编写了本书。光电子技术是一门横跨多个学科门类和工程领域的综合性高新技术,涉及内容非常广泛。本书是在总结光纤通信技术与集成光学器件微纳加工的实验知识的基础上,结合当前实验室设备条件编写的一本实验指导用书。

本书涉及光电子技术实验的有关内容,主要分为光纤光学实验和导波光学实验两大部分。第一部分从光纤光学的基础知识出发,介绍了光纤通信等系统应用中需要掌握的主要技术环节,目的是使学生掌握光纤的基本特性、光纤器件的基本特性及其应用技术,熟悉现代光纤信息处理的基本方法,培养学生正确应用光纤器件与设备解决实际问题的能力。这部分共设二十二个专题实验,涵盖光纤切割与熔接、光纤与光源的耦合和光纤特性测量与分析、常用有源和无源光器件的性能参数测量、光收发模块、光纤波分复用技术、掺铒光纤放大、光纤光栅传感以及无线光通信等方面的基础实验。第二部分从介质光波导的基础知识出发,介绍了制备介质光波导器件需要掌握的基本技术环节,目的是训练学生掌握现代加工和测试的实验平台,熟悉微光学器件的模拟设计、加工和测试的基本方法,培养学生从事光学工程研究和开发的实验技能。这部分共设置十一个专题实验,包括硅基衬底处理工艺和微细光刻技术与工艺,金属膜层真空蒸镀法制备、聚合物薄膜平板波导和条形波导的制备工艺及其特性测量的实验内容。

本书由周骏教授主编,参加编写工作的有诸跃进、徐丙振、张玲芬、姚红兵、高永锋、黄水平、颜飞彪、蒋文晓和张飞雁等。江苏大学机械工程学院光信息科学与技术系的陈明阳、许孝芳、佟艳群和祝远锋,宁波大学理学院物理系光学专业的研究生任海东、王振永、阳明仰、林豪、颜承恩、张琪、束磊和陈金平等也为本书的编写提供了种种帮助。本书经过江苏大学光信息科学与技术系和宁波大学物理系师生的多次试用和修改。对有关老师和同学的帮助一并表示感谢。

本书的编写工作得到宁波大学教务处、宁波大学研究生院和江苏大学教务处的支持，得到中央与地方共建高等学校专项“光电子科学与技术实验室”建设项目、浙江省“非线性科学与技术”重中之重学科项目和宁波市“应用物理”重点专业建设项目的支持，也得到上海交通大学曹庄琪教授的支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，殷切希望广大读者批评指正。

编者

绪论	1
第一部分 光纤光学实验	
实验一 光纤的基本特性演示	7
【实验原理】 光纤结构与光传播原理	7
1. 光纤的结构	7
2. 光纤的种类与光传播模式	8
【实验内容】 光纤光场传播实验操作	9
1. 观察光纤(波导)内的光场传播	9
2. 观察光纤基模场的远场分布	9
3. 观察光纤输出的近场和远场图案	10
实验二 光纤切割与熔接实验	11
【实验原理】 光纤切割与熔接实验原理	11
1. 光纤切割	11
2. 光纤熔接	12
【实验内容】 光纤切割与熔接实验操作	12
1. 光纤切割	12
2. 光纤端面检查	12
3. 光纤熔接	13
实验三 光纤与光源的耦合实验	18
【实验原理】 光纤与光源耦合实验原理	18
【实验内容】 光纤与光源耦合实验操作	19
1. 直接耦合	19
2. 透镜耦合	19
实验四 光纤数值孔径的测量	21
【实验原理】 光纤数值孔径实验原理	21
1. 光纤数值孔径	21
2. 光纤数值孔径的计算	21
【实验内容】 测量光纤数值孔径	22
实验五 光纤传输损耗特性及测量实验	24
【实验原理】 光纤传输损耗测量实验原理	24

1. 光纤产生损耗的原因	24
2. 光纤传输损耗的含义和表示方法	25
3. 光纤传输损耗的测量方法	26
【实验内容】 光纤的传输损耗测量的实验操作	26
1. 用截断法测量光纤的传输损耗	26
2. 考察光纤的弯曲损耗	27
实验六 光纤偏振状态的控制	28
【实验原理】 光纤偏振控制原理	28
【实验内容】 光纤偏振控制	29
1. 实验装置	29
2. 实验步骤	29
附件 光纤偏振控制器的使用	31
1. MPC-1-1 三环型机械式光纤偏振控制器	31
2. F-POL-IL 挤压型光纤偏振控制器	32
实验七 光纤偏振特性的测量	33
【实验原理】 光纤偏振特性测量原理	33
1. 光纤的传输模式和偏振特性	33
2. 光纤偏振特性的测量	34
【实验内容】 测量光纤偏振特性	34
1. 实验装置	34
2. 实验步骤	35
实验八 光纤连接器的性能参数测量	36
【实验原理】 光纤连接器的工作原理与性能指标	36
1. 光纤连接器简介	36
2. 光纤连接器的对接	37
3. 光纤连接器的主要性能和指标	38
【实验内容】 光纤连接器性能测试	38
实验九 光纤分束器的性能参数测量	39
【实验原理】 光纤分束器工作原理及特性参数	39
1. 光纤分束器及其用途	39
2. 光纤分束器主要特性参数	39
【实验内容】 光纤分束器性能测试	40
实验十 光纤耦合器的性能参数测量	41
【实验原理】 光纤耦合器的工作原理和性能指标	41
1. 光纤耦合器介绍	41
2. 光纤耦合器的制作	41
3. 光纤耦合器的主要性能和指标	42
【实验内容】 光纤耦合器的性能测试	43

实验十一 可调光衰减器的性能参数测量	44
【实验原理】 光衰减器的工作原理	44
1. 光衰减器简介	44
2. 固定光衰减器	44
3. 可调光衰减器	45
【实验内容】 可调光衰减器性能测试	46
实验十二 光隔离器的性能参数测量	47
【实验原理】 光隔离器的工作原理及性能指标	47
1. 光隔离器及其分类介绍	47
2. 光隔离器原理	48
3. 光隔离器的主要性能和指标	49
【实验内容】 光隔离器性能测试	49
实验十三 光纤光开关的性能参数测量	50
【实验原理】 光开关的工作原理及性能指标	50
1. 光开关简介	50
2. 光开关的种类	50
3. 光开关的特性参数	52
【实验内容】 光开关性能测试	53
实验十四 光发射/接收机的性能指标测量	54
【实验原理】 光发射/接收机的工作原理与性能指标	54
1. 光发射机工作原理	54
2. 光发射机的性能指标	55
3. 光接收机工作原理	55
4. 光接收机的性能指标	55
【实验内容】 光发射/接收机性能测试	56
1. 光发射机消光比的测量	56
2. 光接收机灵敏度的测量	56
实验十五 波分复用系统原理性实验	58
【实验原理】 光波分复用技术原理	58
1. 光波分复用技术简介	58
2. 光波分复用系统原理	59
【实验内容】 光波分复用实验	60
实验十六 掺铒光纤放大器原理性实验	61
【实验原理】 光纤放大器的实验原理	61
1. 光纤放大器的种类与用途	61
2. EDFA 的基本结构和工作原理	61
3. EDFA 的分类	62
4. EDFA 的主要特性	63

【实验内容】 掺铒光纤放大器性能测试	63
实验十七 开路音频模拟信号传输实验	65
【实验原理】 无线光通信实验原理	65
1. 无线光通信系统的构成	65
2. 无线光通信系统的特点及优势	66
3. 无线光通信系统存在的问题	66
4. FSO 研究的发展趋势	67
【实验内容】 开路音频模拟信号传输实验	68
实验十八 马赫-曾德尔光纤干涉实验	69
【实验原理】 马赫-曾德尔光纤干涉仪工作原理	69
1. 马赫-曾德尔干涉原理	69
2. 马赫-曾德尔光纤干涉仪	69
【实验内容】 马赫-曾德尔光纤干涉实验	71
实验十九 温度和应力测量光纤传感实验	72
【实验原理】 光纤传感器实验原理	72
1. 传感的意义及光纤传感技术	72
2. 光纤传感器的原理及分类	72
3. 相位型光纤传感器	73
【实验内容】 温度与应力测量	75
1. 实验光路	75
2. 温度测量	75
3. 应力测量	76
实验二十 布喇格光纤光栅传感实验	78
【实验原理】 布喇格光纤光栅传感原理	78
1. 光纤光栅及其基本特性	78
2. 光纤光栅传感的基本原理	79
3. 光纤光栅传感测量系统的工作过程	81
【实验内容】 布喇格光纤光栅传感实验	81
1. 实验测量系统	81
2. 光纤光栅温度传感实验	82
3. 光纤光栅应变传感实验	83
实验二十一 锥形光纤的制作及其传感实验	84
【实验原理】 锥形光纤制作方法与传感实验原理	84
1. 实验意义	84
2. 锥形光纤制作方法	84
3. 锥形光纤 Mach-Zehnder 干涉传感原理	85
【实验内容】 锥形光纤制作与传感实验	85
1. 锥形光纤制作	85

2. 锥形光纤 Mach-Zehnder 干涉传感测量	87
实验二十二 长周期光纤光栅的制作及传感实验	89
【实验原理】 长周期光纤光栅的特性及传感原理	89
1. 长周期光纤光栅及其基本特性	89
2. 长周期光纤光栅传感的基本原理	90
【实验内容】 长周期光纤光栅的制作与传感实验	91
1. 长周期光纤光栅的制作方法步骤	91
2. 长周期光纤光栅的折射率传感实验	92

第二部分 导波光学实验

实验一 硅基衬底涂覆制作聚合物薄膜	95
【实验原理】 匀胶机的工作原理	95
【实验内容】 匀胶机的使用	95
1. 熟悉匀胶机的结构	95
2. 样品溶液的制作	96
3. 衬底片的制作	96
4. 衬底片的清洗和烘干	96
5. 匀胶	96
6. 烘片	96
7. 注意事项	97
实验二 二氧化硅薄膜的热氧化生长实验	98
【实验原理】 二氧化硅薄膜的性质及热氧化生长原理	98
1. 二氧化硅薄膜的性质	98
2. 二氧化硅薄膜的热氧化生长原理	98
【实验内容】 二氧化硅薄膜热氧化的生长	99
1. 熟悉热氧化装置的组成	99
2. 热氧化装置的使用方法	100
3. 衬底硅片的制作	101
4. 二氧化硅薄膜样品的制备	101
5. 注意事项	101
实验三 光纤频谱仪测量薄膜厚度	102
【实验原理】 OSM-400UV/VIS 光谱仪简介	102
【实验内容】 薄膜厚度测试	103
1. 系统连接	103
2. 软件安装	103
3. 运行薄膜厚度测量软件和设定软件参数	103
4. 测量标定	104
5. 薄膜厚度计算	105

实验四 平板波导制备与膜层参数测量	106
【实验原理】 介质平板波导理论与棱镜耦合原理	106
1. 介质平板波导理论	106
2. 棱镜耦合原理	107
【实验内容】 平板波导的制备与参数测量	108
1. 热氧化法制备二氧化硅薄膜	108
2. 旋涂法制备聚合物波导层	108
3. 导波层厚度与折射率的测量	108
实验五 平板波导传输损耗的测量	110
【实验原理】 波导传输损耗测量的原理	110
1. 介质波导传输损耗的机理	110
2. 测量原理	110
3. 传输损耗的计算	111
【实验内容】 测量波导传输损耗	111
实验六 微细光刻技术与工艺实验	112
【实验原理】 光刻技术原理	112
【实验内容】 紫外光刻机的使用	113
1. 熟悉 URE-2000/17 型紫外光刻机的结构	113
2. 光刻机的操作步骤	114
3. 光刻工艺流程	115
实验七 聚合物条形波导制备实验	117
【实验原理】 条形介质波导结构与等离子体刻蚀原理	117
1. 条形介质波导结构	117
2. 等离子体刻蚀原理	117
【实验内容】 聚合物条形波导的制备	119
1. 热氧化法制备二氧化硅薄膜	119
2. 旋涂法制备聚合物波导层	119
3. 条形波导图形光刻	119
4. 条形波导的制备	119
5. 条形波导制备整套流程示意图	120
6. 条形波导制备质量的检查	121
实验八 真空蒸镀法制备金属膜层	123
【实验原理】 真空镀膜技术原理	123
【实验内容】 真空镀膜台的使用	124
1. 熟悉 DM220 型真空镀膜台的结构	124
2. 高真空镀膜台的操作步骤	125
3. 镀膜工艺流程	126
实验九 离子交换法制备玻璃条形波导	128

【实验原理】 离子交换技术	128
【实验内容】 玻璃波导的制备	128
1. 玻璃片的制作	128
2. 玻璃片的清洗和烘干	128
3. 坩埚的清洗和烘干	129
4. 硝酸钠和硝酸银熔融液样品的配置	129
5. 熔融液样品预热	129
6. 离子交换	129
7. 蒸镀金属膜层	130
8. 光刻条形波导图形	130
9. 湿法刻蚀铬金属膜层	130
10. 干法刻蚀条形波导	131
11. 波导样品清洗	131
实验十 条形波导的模式特性测量	132
【实验原理】 马卡提里方法与波导模场分布	132
【实验内容】 条形波导模式特性的测试	133
1. 测量装置	133
2. 操作步骤	134
3. 导模特性分析	135
实验十一 条形波导传输损耗的测量	137
【实验原理】 条形波导传输损耗的测量方法	137
1. 截断法	137
2. 光纤扫描法和数字成像法	138
【实验内容】 条形波导传输损耗的测量	138
1. 测量装置	138
2. 测量步骤	139
3. 光纤扫描法的测量数据处理	139
4. 数字成像法的测量数据处理	139
实验十二 有机化合物的拉曼光谱检测	142
【实验原理】 光散射现象与拉曼散射原理	142
【实验内容】 拉曼光谱测试	143
1. 拉曼光谱测试实验光路	143
2. BWS415i 型拉曼光谱仪	144
3. 酒精溶液的拉曼光谱测量	144
附录 1 常用物理常数、单位及换算关系	147
附录 2 实验室安全常识	150
参考文献	152



瑞典皇家科学院 2009 年 10 月 6 日宣布, 将 2009 年诺贝尔物理学奖授予英国华裔科学家高锟 (Charles K. Kao) 以及美国科学家威拉德·博伊尔 (Willard S. Boyle) 和乔治·史密斯 (George E. Smith)。高锟博士获奖是由于研究光纤中的光传输和在光通信领域的应用方面取得的开创性成就, 两位美国科学家获奖是因为发明半导体成像器件, 即 CCD (电荷耦合器)。这也是近年来做出重大技术发明成果的工程科学家获得诺贝尔物理学奖的事例。早在 1966 年 7 月, 高锟博士在英国电子工程学会年报发表光纤应用的开创性和奠基性论文“光频率的介质纤维表面波导” [K. C. Kao & G. A. Hockham, “Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies”, Proc. IEE 113 (7): 1151~1158, 1966], 提出用石英玻璃纤维进行长距离和大容量信息传输的通信原理, 并指出当损耗下降到 20dB/km 时, 光纤通信即可成功。因此, 高锟博士被称为“光纤之父”。

在高锟预言的激发和推动下, 很多公司投入光纤通信系统的研究。1970 年, 美国康宁公司的 R. D. Maurer 等人首次拉出了世界上第一根损耗低于 20dB/km 的光纤, 为光信号的长距离传输奠定了现实基础。同年, 美国贝尔实验室、日本电气公司 (NEC) 和苏联先后研制成功室温下连续工作的双异质结 GaAs-GaAlAs 半导体激光器, 为光纤通信系统提供了一种实用化的光源。光纤技术和半导体激光器技术的突破解决了光通信的两个技术关键, 即可以高速调制的相干光源和低损耗的光传输介质。从此, 人类进入了光通信时代。

随着光纤通信技术的发展, 光纤制造工艺不断改进, 到 1986 年, 在 1.55 μm 波长下的光纤损耗达 0.154dB/km, 接近了光纤最低损耗的理论极限。目前, 工业制造的光纤在 1.3 μm 波长下损耗在 0.3~0.4dB/km, 在 1.55 μm 波长已经低于 0.2dB/km。与此同时, 由于大带宽光纤的使用, 光源寿命的延长, 光电转化器件性能的提高等, 长距离光纤通信技术终于走向实用。1976 年, 美国在亚特兰大进行了世界上第一个实用光纤通信系统的现场试验。1980 年, 美国标准化 FT-3 光纤通信系统投入商业应用。

20 世纪 80 年代, 光纤通信技术在发达国家得到了大力推广, 光纤通信系统也经历多次更新换代。在这个时期, 由于发现 1.31 μm 波长处正好是光纤的一个低损耗窗口, 而且单模光纤的总色散为零, 可以应用于长距离传输, 因此所用的传输光纤逐渐由多模光纤过渡到单模光纤, 所用的通信传输窗口逐渐由原来的 0.85 μm 短波段改用 1.31 μm 的长波段。特别是 1985 年英国南安普顿大学首先研制成功掺铒光纤放大器 (EDFA), 不需将光信号转换为电信号, 实现对光信号的直接放大, 使光通信的中继距离大为增加, 对于长途光缆干线系统具有重要意义, 也是当前光纤通信中应用最广的光放大器。随后, 由美、日、英、法发起的第一条横跨大西洋的 TAT-8 海底光缆通信系统于 1988 年建成。第一条横跨太平洋的 TPC-3/HAW-4 海底光缆通信系统于 1989 年建成。由于掺铒光纤放大器工作在处于光纤通信最低损耗窗口的 1.55 μm 波段, 随着 1.55 μm 波段半导体激光器技术的成熟, 到 80 年代末期, 通信传输波长又从 1.31 μm 转向 1.55 μm 。1990 年, 中继距离超过 100km, 速率为 2.4Gbps 的 1.55 μm 长波长单模光纤传输系统被实际应用。

到 20 世纪 90 年代, 社会的进步与发展对通信的需求日益增长, 光纤传输系统向大容



量、长距离的方向发展已经是必然趋势。1993年,通信容量扩大50倍、传输速率达到2.5Gbps的系统投入应用,1995年,传输速率又发展到10Gbps。由于掺铒光纤放大器的开发成功及其产业化,大大促进了光复用技术及光网络的发展,通信容量和中继距离继续成倍增长。1996年,贝尔实验室开发出波分复用(WDM)技术并取得突破,1997年,美国MCI公司开通了商用WDM线路,光纤通信系统的速率从单波长的2.5Gbps和10Gbps爆炸性地发展到多波长的1Tbps传输。现在采用密集波分复用(DWDM)技术的实验室光系统速率已达10Tbps,中继距离1000km以上,基于光纤技术的通信网络已成为最主要的信息传输系统,无论是在陆地还是在海底,都已形成了拥有巨大传输容量的光纤链路。

光纤通信四十多年来的发展,使人类的通信方式发生了本质性变革,是通信发展史上的革命性进步,对于人类社会由工业化社会向信息化社会的转变,具有不可估量的推动作用。随着新材料的出现、新技术的进步和新器件的制备,作为现代通信网三大支柱的光纤通信、卫星通信和无线电通信的主体,超高速和超长距离光纤通信系统与光网络正以惊人的速度发展,这是因为光纤通信本身具有突出的优势。其主要优点有:①光纤可利用的带宽约为50000GHz,频带宽,可以满足未来巨大通信容量的需要;②损耗低,中继距离长,可以极大地降低光缆通信的成本、提高可靠性和稳定性;③光纤是绝缘体材料,抗电磁干扰,而且通信保密性好;④光纤线径细、重量轻、柔性好,其芯径约为0.1mm,只有单管同轴电缆的百分之一,实际工程应用广泛,如石油、矿山和航空航天领域等;⑤光纤材料主要是石英(二氧化硅),原材料资源丰富,用光纤取代电缆,则可节约大量的金属材料。此外,光纤还具有耐腐蚀力强、抗核辐射、能源消耗小等优点。正是以上这些优点,使光纤通信成为现代信息社会最坚实的基础,并向我们展现了无限美好的未来。

近年来,我国通过大规模敷设光纤通信线路,已建成“八纵八横”主干光纤网,长途传输网的光纤化比重超过90%,覆盖全国85%以上的县市。光纤通信已成为中国通信的主要手段,并建立了一定规模的光纤通信产业,近百家光纤光缆、设备制造、材料生产企业生产各种光纤光缆、半导体光电子器件和光纤通信系统,已经形成了光纤光缆产品品种齐全,材料和设备制造配套的制造体系,迫切需要大批光纤通信的技术人才。作为本教材面向的读者,今后可能从事与光纤通信有关的理论和技术研究、产品开发和推广方面的工作,有必要学习和掌握光纤光学和光纤通信的知识和技能,进一步推动我国的光纤通信事业的现代化,这也是我们编写本书第一部分内容的初衷。

另一方面,在光纤通信系统与光网络中,除光纤作为主要的光传输介质外,光器件的互连、网络的优化、路由等是光通信领域中的重要技术,相应的光有源器件和光无源器件等是不可或缺的关键器件。光电子技术正是在光学技术和微电子技术基础上发展起来的主要研究和开发制备光通信、光传感和光信息处理等所需的光电子器件的高新技术。在过去的几十年中,光电子器件及其制备技术得到了长足发展,如半导体激光器制造技术、光电子显示、发光和存储技术、光电探测与成像技术、光波导以及光调制器件制备技术等。由于光电子技术涉及领域广,应用于光通信系统的光电子器件种类繁多,我们主要讨论光波导的理论基础及其相关技术。实际上,介质光波导是光纤通信系统中最基本的光无源器件,根据截面形状的不同分为平板波导和条形波导等,光纤就是具有圆形截面的波导,它们是各种光波导器件的基础。在本书的第二部分,根据我们的经验,以有机聚合物光波导的制备及其特性测量为例,比较详细地介绍了重要的光电子器件的微纳加工制备技术之一——紫外光刻技术(UV Photolithography),也对与光波导的特性测量有关的原理做了比较全面的叙述。目的是使相



关专业的学生不仅获得充分的理论背景知识，更使学生通过实验切实掌握光电子器件的微纳加工制备工艺和技能。

此外，书中也安排了光纤传感、光纤光栅传感、马赫-曾德尔（M-Z）光纤干涉、光纤频谱仪膜厚测量、真空蒸镀法制备金属膜层、离子交换法制备玻璃条形波导和拉曼光谱检测实验等，是相关实验内容的延伸。



第一部分

光纤光学实验