

# 高级光纤传感技术

江 毅 编著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 高级光纤传感技术

江毅 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统介绍和论述了有关光纤传感技术的专门知识,包括强度调制型、相位调制型、波长调制型、偏振调制型以及分布式光纤传感技术。为了使本书更加系统,还加入了光纤和光电子器件的相关知识。

本书可供从事光纤传感、光纤通信、测试与计量、仪器仪表、结构检测等理论和应用研究的科研人员、工程技术人员及高校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

高级光纤传感技术/江毅编著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023738-5

I. 高… II. 江… III. 光纤器件-光电传感器 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 201157 号

责任编辑:姚庆爽/责任校对:包志虹

责任印制:赵 博/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009年2月第一版 开本:B5(720×1000)

2009年2月第一次印刷 印张:20

印数:1—3 000 字数:401 000

定价:55.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<路通>)

## 前 言

光纤传感器技术是随着光纤的出现和光纤通信的发展而逐渐形成的一门新兴技术。它以光作为载体,以光纤作为传输介质,对被测参量实现传感。由于它是一种光学的传感器,在传感方式、传感原理、信号传输方法、信号探测和信号处理等方面都与传统的电学传感器完全不同,因而出现了各种各样的光纤传感器技术,在全世界范围内得到了广泛的关注和研究。它与传统的电学传感器相比,其特点主要有:灵敏度高;抗电磁干扰,也不产生电磁干扰;安全,可以用在危险和强电磁场干扰场合;集传感和传输为一体;能够实现传感器的复用和分布式测量等。正是这些独特的优点使光纤传感器弥补了传统传感器在应用中的诸多限制,极大地推动了传感技术的发展,满足了现代测量技术的需要。同时,光纤传感器在军事和国防科技中有重要的应用价值,如水听器、陀螺、加速度计、飞行器与舰船结构的健康监测等。现代先进的设备中无不使用光纤传感器技术。

光纤传感技术的发展主要分为四个大的阶段:1980年以前,主要以强度调制型光纤传感器的研究为主;从1980年后,开始大规模研究干涉型光纤传感技术;进入1990年后,随着光纤光栅的发明,光纤光栅传感器技术进入了一个研究热潮;进入2000年后,各种技术和器件已经成熟,光纤传感器开始进入了商业化的进程,各种各样的光纤传感器公司开始成立,并得以存活,光纤传感技术进入实用阶段。目前,一方面,各种新的需求牵引着光纤传感技术的发展;另一方面,各种新器件的出现也推动了这一技术的进步。

国内从80年代早期就开始了光纤传感技术的研究工作,但从应用的角度看,一直发展不理想。自2000年以来,国内的光纤传感器在应用方面取得了巨大的进步,有二十余家厂商从事光纤传感器的研究、生产和销售工作。同时,在光电子器件和配套产品方面已经形成了一套完整的体系。国内有完整的光电子器件配套企业,有近百家公司为光纤通信和光纤传感提供配套产品。国内已经能够完全自主生产所有的光纤无源器件,包括:耦合器、波分复用器、各种连接器、隔离器、偏振控制器、光开关、环形器、压电驱动器、光纤光栅、滤波器、可调谐滤波器等。能够提供主要的光纤有源器件,包括探测器、激光二极管、ASE光源、光纤激光器、LED、SLD等。

国内已经成长起来了一批从事光纤传感器的专业公司和代理公司,并在传感器的应用领域、规模和范围方面走在了世界的前列。国内自主开发了光纤光栅信号解调仪、分布式光纤温度测量仪、光纤陀螺仪等产品,广泛应用到了土木工程、电

力、化工、能源、建筑、国防等众多领域。例如,我国已经有上百座桥梁使用了光纤光栅传感器来进行健康监测、数十条地铁线路安装了分布式光纤温度测量仪、数百个电力开关柜安装了光纤光栅温度测量仪,这些都是我国研究人员和工程技术人员在这一领域取得的骄人成果。

但我们应当看到,在一些关键技术、关键器件和关键设备方面,我国还严重依赖进口,大量的核心器件和关键设备还掌握在国外公司的手里,大量的公司还是靠代理国外产品才能生存。例如,尽管我国已经研制出掺铒光纤和泵浦光源,但还主要使用国外的产品;尽管北京理工大学已经研制出可调谐光纤 Fabry-Perot 滤波器,但这一器件还是国外厂商一统天下;基于布里渊散射的分布式光纤应变测量仪还完全依靠进口。

作者长期从事光纤传感技术的研究工作,一直以来希望能将多年的研究工作进行总结,为推动国内光纤传感器技术的研究和应用尽绵薄之力。今受教育部新世纪优秀人才支持计划和国家 863 项目(2008AA616020)资助,才得以实现。无奈作者学识浅薄,很多内容作者在研究工作中并没有涉及,但为了全书的完整性,也加入了其中。第 7、8、10 章的内容主要源自作者另一拙著《光纤 Fabry-Perot 干涉仪:原理及其应用》(国防工业出版社,2009),读者可以自行参考。书中除了作者的研究成果,还大量引用和归纳了国内外同行的研究成果,特向各位同行致谢,若有参考文献未到之处,还请海涵。本人的研究生唐才杰、张佛健、连少华、杨犇、李静、徐晶晶、刘祥川、梁蓬娟、邹艳参加了本书部分章节和全部文字、图表的输入工作,在此表示感谢。

光纤传感器按照调制方式不同,大致可分为四类:强度调制型、相位调制型、波长调制型和偏振调制型,而光纤传感器另外一个显著的优点是可以传感器复用和分布式测量。因此本书主要围绕这四种传感器以及它们的复用进行论述。点传感器的复用分散在各章中,而最后一章专门论述分布式光纤传感技术。在全书前面,介绍了与传感器技术有关的光纤器件方面的知识。

希望本书能够对从事光纤传感、光纤通信、测试与计量、仪器仪表、结构检测等理论和应用研究的科研人员、工程技术人员及高校师生有所帮助。

作者

2008年8月

# 目 录

## 前言

第 1 章 光纤基础 .....	1
1.1 光纤概述 .....	1
1.1.1 光纤的基本结构 .....	1
1.1.2 光纤的分类 .....	2
1.2 光纤传输原理 .....	3
1.2.1 光在界面的反射与折射 .....	3
1.2.2 阶跃折射率光纤 .....	5
1.2.3 渐变折射率光纤 .....	7
1.2.4 单模光纤中的双折射 .....	8
1.3 光纤的衰减机理 .....	10
参考文献 .....	13
第 2 章 光纤无源器件 .....	14
2.1 连接器 .....	14
2.1.1 连接器的基本原理和结构 .....	14
2.1.2 连接器的评价指标 .....	16
2.2 光纤耦合器 .....	17
2.2.1 概述 .....	17
2.2.2 熔锥型光纤耦合器 .....	17
2.2.3 耦合器的技术指标 .....	19
2.3 波分复用器(WDM) .....	20
2.3.1 概述 .....	20
2.3.2 角色散型波分复用器 .....	20
2.3.3 干涉型波分复用器 .....	21
2.3.4 光纤耦合器型 .....	21
2.3.5 其他类型波分复用器 .....	21
2.3.6 光波分复用器的技术指标 .....	22
2.4 光隔离器 .....	23
2.4.1 光隔离器的功能及原理 .....	23
2.4.2 光隔离器的评价指标 .....	24

2.4.3	光隔离器的应用	25
2.5	光环形器	25
2.5.1	光环形器的功能及原理	25
2.5.2	光环形器的评价指标	26
2.6	衰减器	27
2.6.1	概述	27
2.6.2	光衰减器根据工作原理的分类	27
2.6.3	固定式光衰减器与可变衰减器	28
2.6.4	衰减器的评价指标	28
2.7	光开关	29
2.7.1	光开关概述	29
2.7.2	机械光开关	29
2.7.3	非机械光开关	30
2.7.4	光开关的评价指标	30
2.8	偏振控制器	31
2.8.1	偏振控制器概述	31
2.8.2	偏振控制器的基本原理	31
	参考文献	33
<b>第3章</b>	<b>光纤有源器件</b>	34
3.1	引言	34
3.2	半导体光源的基本原理	35
3.3	发光二极管	36
3.4	激光二极管 LD	38
3.5	单频半导体激光器	41
3.6	PIN 光电二极管	42
3.7	雪崩光电二极管 APD	44
	参考文献	44
<b>第4章</b>	<b>掺铒光纤有源器件</b>	45
4.1	掺铒光纤	45
4.1.1	掺铒光纤	45
4.1.2	掺铒光纤的放大特性	46
4.1.3	掺铒光纤的泵浦方式	47
4.2	放大自发辐射光源(ASE)	48
4.2.1	基本结构	48
4.2.2	提高掺铒超荧光光纤光源输出特性	49

4.3 掺铒光纤放大器	54
4.4 光纤激光器	56
4.4.1 光纤激光器的基本工作原理	56
4.4.2 典型的光纤激光器结构	57
4.4.3 单波长光纤激光器	58
4.4.4 可调谐掺铒光纤激光器	62
参考文献	64
<b>第5章 强度调制光纤传感器</b>	<b>65</b>
5.1 引言	65
5.2 非功能型光纤传感器	67
5.2.1 反射式强度调制	67
5.2.2 透射式强度调制	68
5.2.3 消逝场耦合型强度调制	71
5.2.4 物理效应型强度调制	73
5.3 功能型光强调制	75
5.3.1 微弯损耗型强度调制	75
5.3.2 变折射率型强度调制	76
5.3.3 刻纹光纤型强度调制	77
5.3.4 光吸收系数型强度调制	78
5.4 强度传感器的参考测量方法	78
5.4.1 分光束参考测量法	79
5.4.2 时域参考测量法	80
5.4.3 双波长参考测量法	81
5.5 光纤甲烷气体传感器	87
5.5.1 消逝场泄漏型光纤甲烷气体传感器	88
5.5.2 光谱吸收型光纤甲烷气体传感器	88
5.6 光纤氢气传感器	89
5.6.1 干涉型光纤氢传感器	89
5.6.2 基于光纤光栅型光纤氢传感器	90
5.6.3 微透镜型光纤氢传感器	91
5.6.4 消逝场型光纤氢传感器	92
参考文献	93
<b>第6章 干涉型光纤传感器</b>	<b>94</b>
6.1 引言	94
6.2 光纤相位调制机理	94



6.3	光纤干涉仪	97
6.3.1	光纤迈克耳孙(Michelson)干涉仪	98
6.3.2	光纤马赫-泽德尔(Mach-Zehnder)干涉仪	99
6.3.3	光纤赛格纳克(Sagnac)干涉仪	100
6.3.4	光纤法布里-珀罗(Febry-Perot)干涉仪	100
6.4	双光束干涉仪的信号解调技术	101
6.4.1	有源零差正交解调法	102
6.4.2	无源零差正交解调法	106
6.4.3	相位载波(PGC)零差法	108
6.4.4	基于 $3\times 3$ 光纤耦合器的零差解调	112
6.4.5	外差解调法	123
6.4.6	各种解调方案的比较	126
6.5	光纤干涉技术中的一些关键技术问题	127
6.5.1	光源	127
6.5.2	光纤干涉仪中的模式与偏振问题	129
6.5.3	光纤干涉仪的稳定技术	131
	参考文献	135
<b>第7章</b>	<b>光纤多光束干涉仪</b>	<b>137</b>
7.1	F-P干涉仪	137
7.2	光纤F-P干涉仪	139
7.3	本征型光纤多光束干涉F-P传感器	142
7.4	外腔式光纤F-P谐振腔	145
7.5	光纤F-P标准具	148
7.6	可调谐光纤F-P滤波器	151
7.6.1	背景	151
7.6.2	设计方案	153
7.6.3	可调谐光纤F-P滤波器的性能	153
7.7	光纤F-P谐振腔传感器	155
	参考文献	160
<b>第8章</b>	<b>光纤外腔Fabry-Perot干涉仪(EFPI)</b>	<b>162</b>
8.1	引言	162
8.2	EFPI传感器的原理	163
8.3	EFPI的数学模型	167
8.4	正交工作点直接测量法	168
8.5	双F-P腔正交测量法	173

8.6 双波长正交测量法 .....	175
8.7 三波长测量法 .....	178
参考文献 .....	181
<b>第9章 光纤 Sagnac 干涉仪 .....</b>	<b>183</b>
9.1 引言 .....	183
9.2 Sagnac 效应 .....	183
9.3 互易性与最小结构光纤环形干涉仪 .....	185
9.4 光纤陀螺的相位偏置问题 .....	187
9.5 开环结构和闭环结构的光纤陀螺 .....	188
9.5.1 开环光纤陀螺的基本结构 .....	189
9.5.2 闭环光纤陀螺的基本结构 .....	191
9.6 实现光纤陀螺的技术问题 .....	192
9.7 小结 .....	194
参考文献 .....	195
<b>第10章 光纤白光干涉测量术 .....</b>	<b>196</b>
10.1 引言 .....	196
10.2 低相干光源 .....	196
10.2.1 气体灯光源 .....	197
10.2.2 二极管宽带光源 .....	197
10.2.3 梳状光谱光源 .....	199
10.2.4 ASE 光源 .....	199
10.3 扫描光纤白光干涉测量术 .....	200
10.4 光谱域扫描光纤白光干涉测量术 .....	204
10.4.1 应用光谱仪的信号解调技术 .....	205
10.4.2 应用 CCD 成像的 EFPI 信号解调技术 .....	206
10.4.3 基于菲佐(Fizeau)干涉仪的 EFPI 信号解调技术 .....	207
10.5 波长扫描白光干涉测量术 .....	210
10.5.1 波长扫描白光干涉仪结构 .....	210
10.5.2 傅里叶变换白光干涉术 .....	211
参考文献 .....	218
<b>第11章 偏振调制型光纤传感器及光学电流互感器 .....</b>	<b>220</b>
11.1 光偏振调制原理及光学电流互感器 .....	220
11.1.1 偏振调制原理 .....	220
11.1.2 光学电流互感器的分类 .....	221
11.2 光学电流互感器与传统电流互感器的比较 .....	221

11.3	混合式光学电流互感器	222
11.3.1	Rogowski 线圈	223
11.3.2	无源光电混合式 OCT	224
11.3.3	有源光电混合式 OCT	226
11.4	全光纤式 OCT	226
11.4.1	原理	226
11.4.2	光纤中的双折射对测量的影响	227
11.4.3	对传感光纤的改进	228
11.4.4	对测量方案的改进	229
11.4.5	结论	230
11.5	玻璃块式 OCT	230
11.5.1	引言	230
11.5.2	玻璃 OCT 的方案	231
11.5.3	正方形传感头	232
11.5.4	三角形传感头	233
11.6	光学电流互感器的发展与评述	234
	参考文献	238
<b>第 12 章</b>	<b>光纤光栅传感器</b>	<b>239</b>
12.1	引言	239
12.2	光纤光栅的制作	239
12.2.1	侧面抛光型光纤布拉格光栅	240
12.2.2	Hill 光栅	241
12.2.3	Meltz 光栅	242
12.2.4	单脉冲光栅	242
12.2.5	光纤拉制时写入的光栅	243
12.2.6	相位掩模光栅	244
12.2.7	逐点写入的光纤光栅(模式变换器)	244
12.2.8	带通光纤光栅	245
12.2.9	长光纤光栅的制作(超窄线滤波器)	246
12.2.10	重叠多个光纤光栅(梳妆滤波器)	246
12.2.11	光纤啁啾光栅制作技术	247
12.3	光纤光栅的光敏性	248
12.3.1	引言	248
12.3.2	掺锗光纤的 UV 吸收谱	248
12.3.3	掺锗光纤的紫外光激折射率变化	250

---

12.3.4 提高光纤光敏性的方法	252
12.4 光纤光栅的性能	252
12.4.1 模式耦合方程	252
12.4.2 两个模式间的耦合	255
12.4.3 一个前向模耦合到同阶的反向传输模	255
12.4.4 光纤光栅的特性分析	257
12.5 光纤光栅的传感性能	263
12.6 光纤光栅信号解调技术	264
12.6.1 线性滤波比例探测法	264
12.6.2 匹配光纤光栅探测法	266
12.6.3 光纤 M-Z 干涉探测法	267
12.6.4 扫描光纤 F-P 干涉探测法	268
12.7 光纤光栅传感器的复用技术	269
12.7.1 光纤光栅复用的原理	269
12.7.2 扫描光纤 F-P 滤波器法	270
12.7.3 复用光纤光栅激光传感器阵列	270
12.7.4 匹配光纤光栅波分复用阵列	271
12.7.5 基于线阵列 CCD 探测的波分复用技术	271
12.7.6 基于锁模激光的频分复用技术	272
12.7.7 时分复用与波分复用技术	272
12.7.8 空分复用、时分复用和波分复用光纤光栅传感器网络	273
12.8 温度交叉敏感问题	274
参考文献	276
<b>第 13 章 分布式光纤传感器</b>	<b>278</b>
13.1 引言	278
13.2 光时域反射计(OTDR)	278
13.3 基于瑞利散射的分布式光纤裂缝传感器	280
13.3.1 引言	280
13.3.2 分布式光纤裂缝传感器原理	280
13.3.3 固定曲率半径平面波导的弯曲损耗分析	281
13.3.4 任意弯曲多模光纤的弯曲损耗分析	283
13.3.5 模拟与实验	285
13.3.6 工程应用的难点	291
13.3.7 小结	292
13.4 基于拉曼散射的分布式光纤温度传感器	292

13.4.1	引言	292
13.4.2	自发拉曼散射	293
13.4.3	测量系统	295
13.4.4	参数的设计与器件的选择	295
13.4.5	传感系统主要参数	298
13.5	基于布里渊散射的分布式光纤应变/温度传感器	300
13.5.1	传感原理	300
13.5.2	信号探测方案	302
13.5.3	小结	304
	参考文献	305

# 第1章 光纤基础

## 1.1 光纤概述

光纤 (optic fiber) 就是光导纤维的简称, 它是截面为圆形的介质光波导。1966年, 英籍华人高锟 (Kao) 和 Hockham 实验证明利用玻璃可以制作光导纤维。但当时的玻璃衰减达  $1000\text{dB/km}$ , 无法用于传输, 后经过美国贝尔实验室主席 Ross、英国电信研究所 (BTRL, BPO) 和美国康宁玻璃公司 (CORNING) 的 Maurer 等合作, 于 1970 年首先研制成功衰减为  $20\text{dB/km}$  的光纤, 取得重大突破, 之后各国纷纷开展光纤通信研究, 基于光纤的通信、传感等技术得到了迅速的发展。目前工作在  $1.55\mu\text{m}$  波长的石英光纤损耗只有  $0.2\text{dB/km}$ , 接近理论极限。本章主要基于光纤传感器的应用角度, 介绍相关的光纤技术基础知识。

### 1.1.1 光纤的基本结构

光纤是圆柱形介质波导, 它包括纤芯和包层两层, 光在纤芯中传播, 纤芯之外是折射率略低的包层。如图 1.1 为光纤导光的基本原理, 纤芯的折射率略大于包层 ( $n_1 > n_2$ ), 光在以一定角度从光纤端面入射时, 在芯包界面的入射角大于全反射角的光会被全反射, 从而被束缚在纤芯中向前传播, 在芯包界面入射角小于全反射角的光由于在每次反射时有部分光折射入包层, 从而损失部分能量到包层中, 导致无法传输。

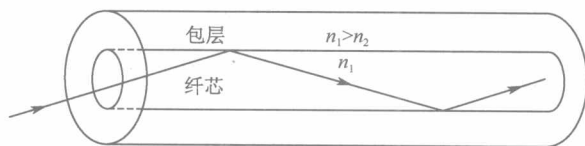


图 1.1 光纤导光基本原理

在实际应用中, 为保证光纤的机械强度、隔绝外界影响, 在拉制光纤过程中同时在表面均匀涂上热固化硅树脂或紫外固化丙烯酸酯, 之后再套上尼龙、聚乙烯或聚酯等塑料。

### 1.1.2 光纤的分类

光纤的分类方式有很多种，主要按材料、传输模式、折射率分布分类。

#### 1. 按制作光纤的材料分类

(1) 石英光纤：目前用量最大的光纤，由高纯度石英（ $\text{SiO}_2$ ）制作，有良好的化学稳定性和机械强度，价格低廉，损耗低，脉冲展宽小，适于长距离、大容量光纤通信系统，也是光纤传感器中最常使用的光纤。

(2) 多组分玻璃光纤：由特殊光学玻璃制成。传输损耗较大，白光下平均损耗在 0.7dB/km 以上。这种光纤主要用于传光束、传像束、扭像器及纤维面板等。

(3) 塑料光纤：由高分子聚合物制成，主要有轻便、价廉、柔软等优点，但因其损耗相对于石英光纤要高得多，无法用于长距离传输，限制了其应用，目前主要用于短途链路，如在室内连接光纤接头到计算机。

(4) 液芯光纤：将石英管拉成毛细管并充入液体材料，如四氯乙烯。液芯光纤可以作为一些特殊的传感器。

#### 2. 按光纤折射率分布分类

(1) 阶跃折射率（step index, SI）光纤：纤芯和包层折射率都是均匀的，折射率在纤芯和包层界面处发生突变。

(2) 渐变折射率光纤（gradient index, GI）光纤：纤芯折射率是渐变的，折射率在中心最大，沿半径方向逐渐减小，包层折射率均匀分布。

此外，在各种特殊用途中还有许多特殊光纤，例如，用于外太空的抗辐射光纤，激光手术或激光治疗中用的、能传输大功率激光束的传能光纤，用于光纤放大器、光纤激光器的掺稀土元素的有源光纤。

#### 3. 按传输模式分类

光在光纤中以模的形式传播，模式是指传输线横截面和纵截面的电磁场结构图形，即电磁波的分布情况。每个模在光纤轴附近以不同的传播常数和群速度传播，拥有独立的横向模场分布和偏振态。当光纤纤芯直径很小时，光纤内对给定工作波长只能传播一个模式，这样的光纤称为单模光纤（single mode fiber, SMF）。纤芯直径较大的光纤可传输多个模式，称为多模光纤（multi mode fiber, MMF）。国际电报电话咨询委员会（CCITT）建议单模光纤与多模光纤的外径（包层直径）均为  $125\mu\text{m}$ ，多模光纤芯径  $50\mu\text{m}$  或  $62.5\mu\text{m}$ ，单模光纤芯径  $8\sim 10\mu\text{m}$ 。对于多模光纤，传输模式不同在光纤中的群速度不同，因而在传输过

程中会引起光脉冲的展宽，远距离传输后产生脉冲交叠，从而限制了光纤传输的速率。利用渐变折射率光纤可以减小模式色散，由于折射率沿半径方向减小，光的传播速度沿半径增加，离轴远的光需要传播较远的距离，但也有较快的传播速度，从而补偿了不同模式之间传播速度的不同。图 1.2 分别是这几种光纤的几何形状和折射率分布。

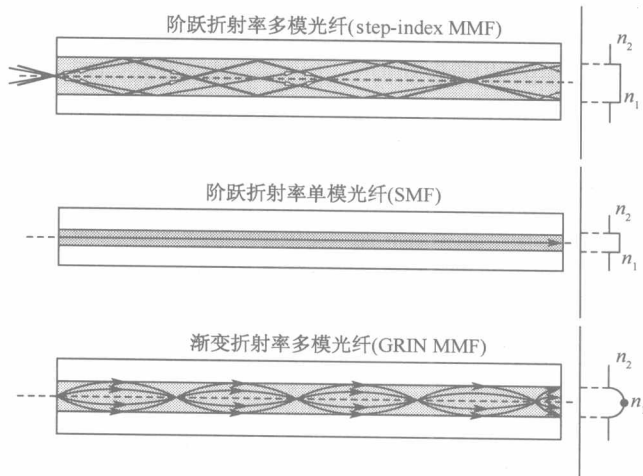


图 1.2 典型光纤的几何形状和折射率分布

## 1.2 光纤传输原理

### 1.2.1 光在界面的反射与折射

光在介质分界面的反射满足反射定律，折射满足斯涅尔定律。光在同一均匀介质中是直线传播的，但在两种不同的介质的交界处会发生反射和折射现象，如图 1.3 所示。

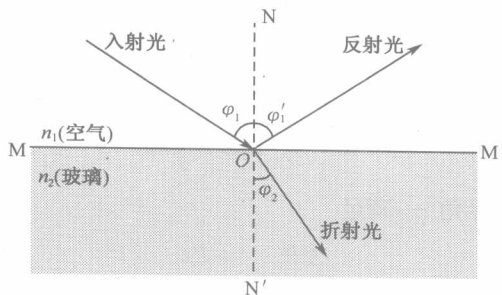


图 1.3 光的反射和折射



设  $MM'$  为空气与玻璃的界面,  $NN'$  为过入射点  $O$  垂直于界面的法线, 空气折射率  $n_1$  小于玻璃折射率  $n_2$ 。当入射光入射到界面的交接处  $O$  点时, 发生一部分光反射回空气中, 另一部分光折射到玻璃中。因此有

$$\text{反射定律 } \angle\varphi'_1 = \angle\varphi_1$$

斯涅尔定律

$$\frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.1)$$

假设光在空气和玻璃中的速度分别为  $v_1$  和  $v_2$ , 则根据波动理论可知

$$\frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

因此, 可推导出

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

由此, 对折射率较小的物质称为光疏介质, 反之为光密介质。若  $n_1$  为空气,  $n_1 = 1, v_1 = c$ , 则介质中的光速为

$$v_2 = \frac{c}{n}$$

从折射率大的介质到折射率小的介质时, 根据折射理论, 折射角大于入射角, 并随入射角增大而增大, 当入射角增大到临界角  $\varphi_0$  时, 折射角  $\angle\varphi_2 = 90^\circ$ , 如图 1.4 所示, 这时光以  $\varphi_0$  角全反射回去, 从能量角度看, 折射光能量越来越小, 反射光能量逐渐增大, 直到折射光消失。

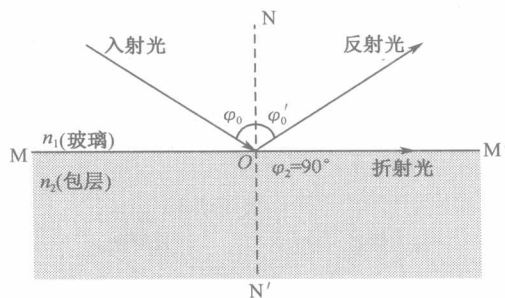


图 1.4 光的全反射

这种情况下, 临界角  $\varphi_0$  满足

$$\frac{\sin\varphi_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.2)$$

这就是全反射定律, 对于石英光纤, 纤芯折射率  $n_1 = 1.46$ , 包层折射率  $n_2 = 1.44$ , 则临界角  $\varphi_0 = 89.45^\circ$ 。