

Polarization-maintaining Fiber Coupler
Manufacture Theory and Technology

保偏光纤耦合器 制造理论与技术

郑煜 吴宇列 王金娥 段吉安/著



科学出版社

保偏光纤耦合器制造 理论与技术

郑 煜 吴宇列 王金娥 段吉安 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

目前军事领域和民用领域对高性能、低成本保偏光纤耦合器的需求越来越多,本书针对其制作中存在的速度慢、产量低、成品率低、器件性能一致性差和产品成本高的缺点,介绍保偏光纤耦合器制造过程中自动化保偏光纤精密对轴技术、保偏光纤耦合器耦合机理、高性能保偏光纤耦合器制造设备、熔融拉锥工艺参数与耦合器性能相关规律,提出了一种利用与光纤方位角关系更敏感的特征量——五点特征值来实现匹配型保偏光纤自动定轴的方法,并进行了实验验证;基于热-结构-电磁多物理场耦合有限元方法,分析得到了保偏光纤耦合器的传输特性和耦合系数在熔锥区的变化规律;构建了保偏光纤耦合器熔融拉锥系统,该系统结构紧凑、使用方便、成本低,能够实现自动化的保偏光纤耦合器制作;以保偏光纤耦合器的光学性能与制造过程工艺参数的相关规律为研究核心,进行大量的熔融拉锥实验,得到了最佳工艺参数,实现了耦合器的高性能制作;同时对光纤耦合器的停止准则进行了分析与讨论,研制了基于预设拉锥长度和预设分光比两种停止准则的小型熔融拉锥机。

本书可供从事光纤通信和光纤传感研究的科研院所、设计部门、工程施工单位和生产企业的技术人员参考,也适合高等院校通信工程、机械工程等专业的师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

保偏光纤耦合器制造理论与技术/郑煜等著. —北京:科学出版社, 2018.1
ISBN 978-7-03-056364-4

I. ①保… II. ①郑… III. ①光纤耦合器 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 011956 号

责任编辑:赵敬伟/责任校对:邹慧卿
责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2018年1月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年1月第一次印刷 印张:10 1/4 插页:2

字数:200 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

光纤器件始于 1977 年, 伴随光纤通信技术的发展而迅速发展起来, 以光波为载体、光纤为媒介, 感知和传输外界被测量信号。其主要优点有灵敏度高、电绝缘性能好、抗电磁干扰、可挠性强、可实现不带电的全光型探头; 频带宽、动态范围大; 可用于高温、高压、强电磁干扰、腐蚀等恶劣环境。保偏光纤是一种对线偏振光具有较强的偏振保持能力的光纤, 且与普通单模光纤具有良好的相容性, 在光纤通信和光纤传感系统中得到了越来越广泛的应用。保偏光纤耦合器是应用保偏光纤制作的光耦合器, 它是实现偏振耦合、分光以及复用的关键器件。它的最大特点在于能稳定地传输两个正交的线偏振光, 并能保持各自的偏振态不变, 从而成为各种民用或军用干涉型传感器和相干通信的关键器件, 是构成高精度高性能光纤陀螺和水听器的基础元件之一。

全书共 7 章。其中, 第 1 章介绍保偏光纤耦合器制造导论, 第 2 章讲述保偏光纤偏振主轴定位理论与技术, 第 3 章和第 4 章介绍保偏光纤耦合器的耦合与传输理论, 第 5 章介绍保偏光纤熔融拉锥系统, 第 6 章讲述保偏光纤耦合器制造工艺实验和技术, 第 7 章介绍以预设耦合比和预设拉锥长度为停止准则的光纤熔融拉锥实验和制造工艺。

参与本书撰写的作者, 相互间进行了充分的联络与沟通, 每人分别执笔自己最擅长的内容。第 1 章由郑煜和段吉安撰写, 第 2 章由郑煜和王金娥撰写, 第 3 章和第 4 章由郑煜、王金娥和吴宇列撰写, 第 5 章和第 6 章由郑煜、吴宇列和王金娥撰写, 第 7 章由郑煜和段吉安撰写。

本书若能对保偏光纤耦合器的制造与发展起到些许作用, 作者将感到无比的高兴。在此对于参与本书所列各项成果的研究生表示谢意, 并对为本书出版付出巨大努力的科学出版社的各位编辑表示由衷的感谢。

由于作者水平所限, 书中不足之处在所难免, 敬请读者指正。

郑煜

2017 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 保偏光纤耦合器制造导论	1
1.1 保偏光纤及保偏光纤耦合器简介	2
1.1.1 光纤耦合器及其应用	2
1.1.2 保偏光纤基本原理与性能参数	5
1.1.3 保偏光纤耦合器原理与性能参数	9
1.2 保偏光纤耦合器制造方法	11
1.2.1 蚀刻法	12
1.2.2 研磨法	12
1.2.3 熔融拉锥法	13
1.3 保偏光纤偏振轴探测与对准方法	13
1.3.1 纵向观测法	13
1.3.2 横向观测法	16
1.4 保偏光纤耦合器的熔融拉锥	18
1.4.1 熔融拉锥制造光纤耦合器原理	18
1.4.2 熔融拉锥制造设备	18
参考文献	20
第 2 章 保偏光纤自动化对轴技术	23
2.1 保偏光纤偏振轴探测实验	23
2.1.1 实验原理	23
2.1.2 实验过程	26
2.1.3 保偏光纤偏振轴对光强分布的影响	27
2.2 五点特征值法	28
2.2.1 五点特征值法对轴仿真原理	28
2.2.2 仿真模型	30
2.2.3 结果分析与讨论	32
2.3 保偏光纤自动对轴系统研究	37
2.3.1 自动对轴系统组成及工作原理	37
2.3.2 自动对轴系统设计的关键技术及难点分析	38
2.3.3 自动对轴系统的控制	38

2.3.4 自动对轴系统精度分析	40
2.4 本章小结	41
参考文献	42
第 3 章 光纤模式耦合理论	43
3.1 单模光纤耦合器的模式耦合	43
3.2 两根光纤的耦合分析	46
3.2.1 两根平行光纤耦合	46
3.2.2 两根弯曲光纤耦合	48
3.2.3 熔锥光纤耦合	49
3.3 熔锥光纤耦合器耦合分析	49
3.3.1 熔锥光纤耦合器耦合分析方法概述	49
3.3.2 熔锥光纤耦合器耦合过程	52
3.3.3 熔锥型光纤耦合器耦合模型分析	58
3.4 保偏光纤耦合器耦合分析	62
3.4.1 保偏光纤耦合器的耦合模方程	62
3.4.2 保偏光纤耦合器的耦合系数	63
3.4.3 保偏光纤耦合器的横向耦合过程	67
3.4.4 保偏光纤耦合器的分光比	69
3.4.5 保偏光纤耦合器的消光比	70
3.5 本章小结	71
参考文献	72
第 4 章 保偏光纤耦合器光波传输理论	75
4.1 传输特性分析理论基础	75
4.1.1 热-结构-光耦合原理	75
4.1.2 光纤传输数值分析原理	76
4.2 单根保偏光纤熔锥区传输特性	77
4.2.1 熔锥区热应力	77
4.2.2 熔锥区传输特性	80
4.3 保偏光纤耦合器传输特性	83
4.3.1 耦合器传输特性	84
4.3.2 耦合器传输特性的影响因素	86
4.4 保偏光纤耦合器传输损耗	93
4.4.1 应力区形状对附加损耗的影响	94
4.4.2 应力区折射率与包层折射率差对附加损耗的影响	96
4.4.3 偏振主轴角度差对附加损耗的影响	97

4.5 本章小结	99
参考文献	99
第 5 章 保偏光纤耦合器熔融拉锥制造系统	101
5.1 系统设计与构建	101
5.1.1 系统设计	101
5.1.2 系统关键技术	102
5.1.3 系统构建	102
5.2 制造工艺与性能测试系统	106
5.2.1 保偏光纤耦合器制造工艺流程	106
5.2.2 性能测试系统构建	107
5.3 本章小结	109
参考文献	109
第 6 章 保偏光纤耦合器的制造工艺及测试	111
6.1 保偏光纤耦合器熔融拉锥的制造工艺流程	111
6.1.1 光纤类型的选择	112
6.1.2 光纤涂覆层的剥离	112
6.1.3 熔融拉锥及分光比调节	112
6.1.4 管壳封装	113
6.2 熔融拉锥工艺参数分析	114
6.2.1 拉锥速度	114
6.2.2 温度分布	115
6.2.3 预热时间	116
6.3 工艺参数与耦合器性能参数的相关规律实验	117
6.3.1 实验方案设计与数据处理	117
6.3.2 实验结果分析	119
6.3.3 工艺参数优化	120
6.4 工艺参数与耦合器性能曲线的相关规律	120
6.4.1 单模光纤耦合器性能曲线分析	120
6.4.2 保偏光纤耦合器性能曲线分析	121
6.4.3 工艺参数优化	127
6.5 保偏耦合器性能测试	127
6.6 本章小结	128
参考文献	128

第 7 章 光纤耦合器熔融拉锥长度与耦合比的映射关系	130
7.1 熔融拉锥实验工艺参数与分析方法	130
7.1.1 熔融拉锥实验工艺参数	130
7.1.2 熔融拉锥实验数据分析	131
7.2 光纤器件熔融拉锥的实验结果与分析	132
7.2.1 光纤耦合器熔融拉锥实验中附加损耗的分析	132
7.2.2 光纤熔融拉锥时预设耦合比对耦合性能的影响	134
7.2.3 光纤熔融拉锥时预设拉锥长度对实际耦合性能的影响	137
7.3 光纤耦合器件熔锥区显微形貌观察	140
7.4 双停止准则的小型熔融拉锥机	143
7.4.1 光纤器件熔融拉锥设备结构分析	143
7.4.2 光纤器件新型熔融拉锥设备停机控制的实现	144
7.4.3 新型光纤器件熔融拉锥设备的运动系统	147
7.4.4 基于双停止准则的小型熔融拉锥机样机	153
7.5 本章小结	154
参考文献	154

彩图

第1章 保偏光纤耦合器制造导论

光纤器件是光信息技术的研究热点。自 20 世纪 80 年代以来, 光信息技术以其频带极宽、信息容量巨大、传输损耗低、抗电磁干扰等显著优点带来了通信业革命性的大发展^[1-3]。目前光纤通信正朝着密集波分复用 (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) 与光放大器 (Optical Amplifier, OA) 相结合的高性能、大容量、灵活的全光网络 (All Optical Network, AON) 发展^[4-6]。AON 采用波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 技术提高网络的传输容量, 以波长路由分配 (Routing and Assignment of Wavelength, RAW) 为基础, 在光节点采用光/分插复用 (Optical Add-Drop Multiplexing, OADM) 和光交叉连接 (Optical Cross-Connect, OXC) 技术来提高吞吐量, 从而使得光网络具有高度灵活性和生存性。实现 AON 的主要关键器件有阵列波导光栅 (Arrayed Waveguide Grating, AWG)、光开关、光耦合器、可调激光光源、可调光滤波器、光放大器、光探测器等^[4,5]。

光纤器件的另一个重要应用领域是传感, 始于 1977 年, 是伴随光纤通信技术的发展而迅速发展起来的^[7-9], 以光波为载体、光纤为媒介, 感知和传输外界被测量信号。其主要优点有灵敏度高、电绝缘性能好、抗电磁干扰、可挠性强、可实现不带电的全光型探头; 频带宽、动态范围大; 可用于高温、高压、强电磁干扰、腐蚀等恶劣环境。光纤传感器可分为两大类, 即功能型传感器和非功能型传感器。功能型传感器的光纤一方面作为传播光的媒介, 另一方面感知被测对象, 被测对象会引起传播光的光强、相位、偏振态、频率、波长等光特性发生变化, 从而得到调制, 调制后的信号携带了被测信息。非功能型传感器的光纤仅当作传播光的媒介, 待测对象的调制是由其他光纤转换元件实现的。光纤传感技术的发展得益于光纤通信技术的发展, 目前正朝着阵列复用传感和分布式传感发展, 以实现长距离、大范围的连续、长期、阵列复用传感。

保偏光纤是一种对线偏振光具有较强的偏振保持能力的光纤, 且与普通单模光纤具有良好的相容性, 在光纤通信和光纤传感系统中得到了越来越广泛的应用^[9]。保偏光纤耦合器是应用保偏光纤制作的光耦合器, 它是实现偏振耦合、分光以及复用的关键器件。它的最大特点在于能稳定地传输两个正交的线偏振光, 并能保持各自的偏振态不变, 从而成为各种民用或军用干涉型传感器和相干通信的关键器件, 是构成高精度高性能光纤陀螺和水听器的基础元件之一^[7-9]。

光纤器件是光纤通信系统和光纤传感系统的重要组成部分, 其重要性日益突出。据美国 Electronic Cast 公司市场调研指出^[1,3,4], 2000 年, 全球光电子产品接

近 2000 亿美元, 其中光纤通信市场约 400 亿美元; 2002 年, 世界光电子产业市场总额超过 2500 亿美元, 2010 年为 5000 亿美元, 平均年增长率 9%; 2015 年, 全球光电子产业总额为 9320 亿美元, 年增长率超过 11%, 呈逐步上升的趋势。光纤器件作为光技术的载体, 其发展尤为迅速。光纤耦合器是光纤通信系统中使用量最多的光无源器件之一, 随着光纤到户 (FTTH) 越来越近, 全球光纤通信系统对光纤耦合器的需求量日益增大。全球光纤耦合器的销售额, 2001 年为 6.02 亿美元, 而到 2005 年达到 12 亿美元, 2010 年达到 28 亿美元。其中, 2001 年北美的耦合器用量为 2.2975 亿美元, 占全球的 38%; 2010 年增至 10.6 亿美元。欧洲排名第二, 2001 年用量为 1.6497 亿美元, 占 27%, 2010 年达 7.93 亿美元。在欧洲国家中, 光纤耦合器用量前几位的分别是德国、英国、法国和意大利。Electronic Cast 公司总裁 M. Stephen 还指出, 对大容量传输系统 (如光纤放大器、DWDM、OADM) 的需求还在加快增长, 全球光纤耦合器的消费将受到这种需求的推动。各种形式的耦合器有助于构成多种应用所需的光模块, 例如, 长途海底网络、用户环网络、广电有线电视网络 (Community Antenna Television, CATV)、测试仪器和传感器等方面所用的光模块。

我国光电子技术的发展与世界基本同步, 1986 年, 经中央批准的 863 计划中将光电子器件及集成技术列为信息领域的三大主题之一^[3,4]。据中国光学光电子行业协会的数据统计, 2006 年, 全国光电产值将超过 1100 亿元人民币。目前, 我国光电子产业约占全球市场的 5%, 2010 年, 我国光电子产业接近 500 亿美元, 占世界市场 10% 左右的份额, 但技术和产业水平与大国的地位还很不相称, 被称为“组装大国”, 而不是“制造大国”。因此, 努力创新与发展新的光纤器件制造装备、工艺和新的器件是我国光纤通信产业和光纤传感产业发展的重点。

1.1 保偏光纤及保偏光纤耦合器简介

保偏光纤是具有偏振态保持能力的光纤, 它传输线偏振光, 广泛用于航天、航空、航海、工业制造技术及通信等领域^[7,9]。保偏光纤是光纤陀螺等相位型光纤传感器的传感介质, 保持光纤信号偏振光定轴传输是偏振光相干的基本条件, 在以光学相干检测为基础的干涉型光纤传感器中, 使用保偏光纤能够保证线偏振光偏振方向保持不变, 提高相干信噪比, 以实现物理量的高精度测量。

1.1.1 光纤耦合器及其应用

光纤耦合器按分类标准有多种分类方式, 如图 1.1 所示。现在, 光纤耦合器已经发展成为一种多用处、多功能的光纤器件产品。从功能考虑, 光纤耦合器有光功率适配器和光波长分配耦合器两种类型; 根据端口形式划分, 它可以分为 X 型

耦合器 (2×2)、Y 型耦合器 (1×2)、星型耦合器 ($N \times N$, $N > 2$) 以及树型耦合器 ($1 \times N$, $N > 2$) 等; 根据工作带宽考虑类型划分, 光纤耦合器又分为单工作窗口的宽带耦合器和单工作窗口的窄带耦合器以及双工作窗口的宽带耦合器; 根据光纤传输光模式的差异又可以将光纤耦合器分为单模和多模两种类型的耦合器。

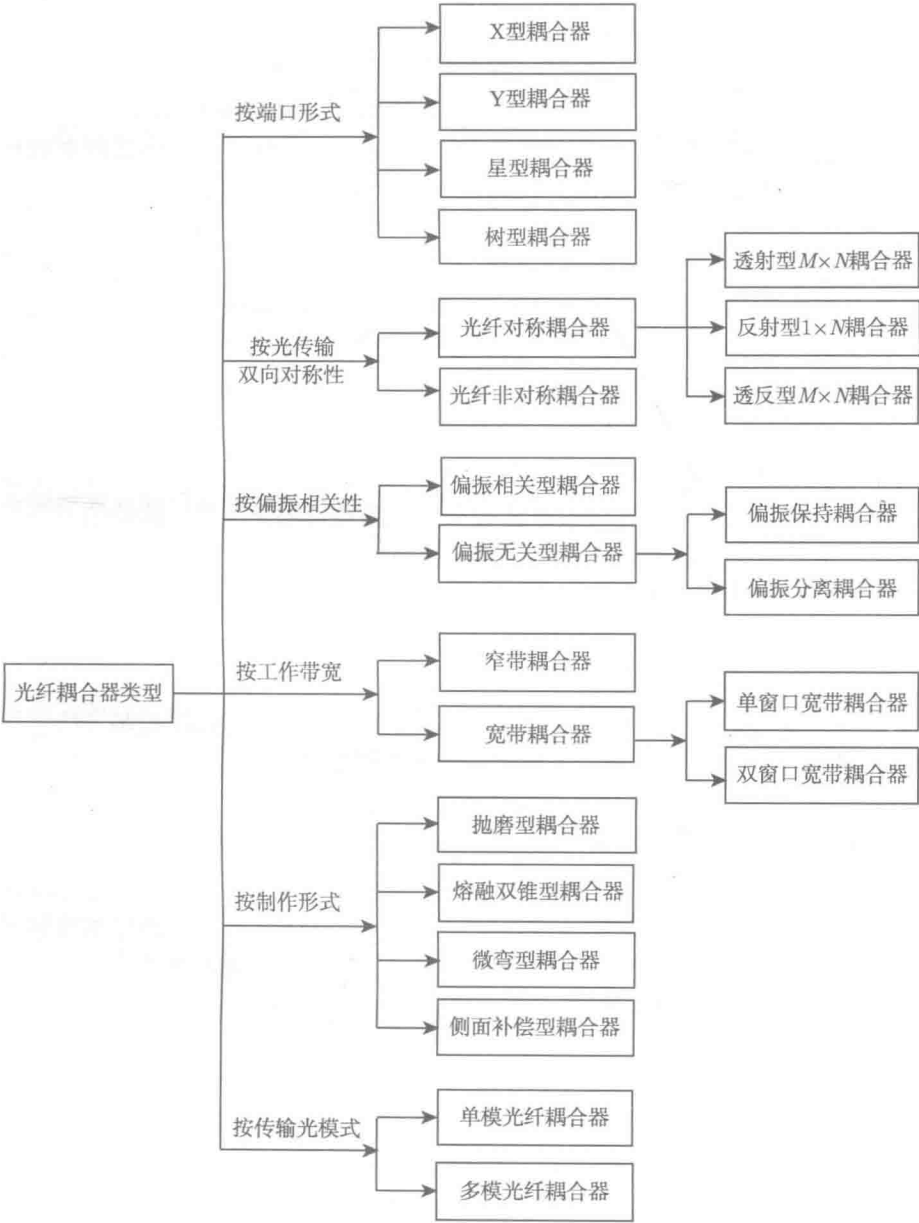


图 1.1 光纤耦合器的类型

光纤耦合器的主要应用有以下几个方面。

1. 全光耦合器

新型电子信息网的主要特征是“宽带化”，同时，这也是光纤通信系统的发展趋势。由于光纤通信大环境的飞速发展，对光纤器件的工作带宽的要求也越来越高，原先对器件技术的要求也逐渐过渡为对宽带技术的要求，尤其是光纤耦合器。全光耦合器在全波光纤的城域网建设中被广泛的运用，它的带宽覆盖了光纤通信中的 O、E、S、C、L 波段。未来全波光纤将被应用到骨干网络中，因此全光耦合器在通信领域将发挥更加重要的作用。在现在应用比较广泛的拉曼光纤放大器中，超宽带的抽头耦合器将会被用到，其中，熔锥型的全光耦合器是最理想的选择^[10,11]。

2. 群组滤波器

光纤耦合器作为光波分复用器的关键组成器件，是光纤耦合器在光纤通信领域最为重要的一项应用。光波分（解）复用器是密集型波分复用系统的核心器件。这里，复用的概念是将两路光信号（分别都含有多个波长的光信号）合成一路光信号，光信号的波长间隔减半；而解复用的概念则正好相反，是将一路包含多个波长的光信号分成两路分别包含奇数路波长和偶数路波长的光信号，波长的间隔数成倍增加。为了能够实现波分的作用并且避免由于复杂的奇数与过高的成本带来的不便，一种群组滤波器被发现。由于运用熔融拉锥制造工艺制作的全光纤非平衡干涉仪型的群组滤波器实现技术较简单，所以一直被广泛运用。

全光纤马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI) 是由两个耦合比为 50% 的熔锥型光纤耦合器串联而成的。熔融拉锥技术的传统控制方法使得拉锥长度有一定的长度限制，所以不能制作出密集型的波分复用器。因为制作密集波分复用器的时候波长间隔会变小，所以必须增加耦合周期数，这就需要很长的拉锥长度。而且，这样不仅会增加光纤器件的损耗，还会造成较大的偏振依赖性。 N 个波长需要 $N - 1$ 个全光纤干涉仪排列。群组滤波器的优点是减轻了原先光波分复用器件解复用需要的波长间隔造成的器件的负担，能够很大程度地提高通信系统的容量，所以它是一种前景宽阔的新型复用/解复用器件，随着光纤耦合器的广泛应用，群组滤波器在构建光纤网络系统中起到了越来越重要的作用^[11]。

3. 泵浦合波器

光放大器是光纤通信传输系统发展中的一项主要技术，其中光放大器中的掺铒放大器成为 20 世纪 90 年代中期通信系统发展的关键技术，但掺铒放大器在控制噪声、增益带宽和非线性方面有较大缺陷，最近的一系列技术已经弥补了这些缺陷。拉曼放大器比掺铒放大器（通过利用非线性限制）具有更高的泵浦功率。采用

了波长复用和泵浦偏振复用相结合的方案研制的分布式拉曼放大器具有更好的性能,而泵浦合波器是实现此项技术的关键器件。泵浦合波器具有良好的合波功能,可以不通过使用增益平坦滤波器来获得较为平坦的增益谱形。它能够满足器件在可靠性和高功率方面的要求。

光放大器中的两种关键技术分别为偏振泵浦合波器和波长泵浦合波器,它们都是最为常用的高功率合波技术。早期的偏振泵浦合波器采用的是微光技术,这种产品带来了较高的插入损耗,并具有高功率性能较低的缺点。而新型的全光纤偏振泵浦合波器则克服了这些缺点,带来了和泵浦合波器一样高的功率性能,插入损耗值小于 0.25 dB,可以精确控制泵浦中心波长与器件相匹配;而波长泵浦合波器则是由窄带耦合器制作的,由于熔融拉锥技术的发展,窄带耦合器的波长间距减小至 2 nm,中心波长精确度很高,这种新的窄带耦合器极大地提高了放大器的泵浦功率,且可使用的波长范围较宽。将以上两种关键的泵浦合波器有效结合,可以设计出低损耗、高功率的合波器,从而满足放大器的要求^[12]。

4. 非线性开关

非线性开关的工作机制为一束光信号从光纤耦合器一个通道进入,模式能量的不同导致光纤耦合器两个纤芯的相移也不同,因此光纤耦合器出现了因非线性效应引起的不对称。随着一些特殊耦合器的研究,全光开关的性能有了很大的提高,包括有源耦合器和光栅辅助耦合器^[13,14]。

5. 光传感

光纤耦合器在通信与传感的快速发展中起到了很大的作用。例如,可以使通信网络实现实时监听功能,也可以直接用作光传感元件。实现实时监听功能的原理是:光纤耦合器将带有通信信号的光纤中的光信号分为两路,一路接收到监听装备上,而另一路继续按原来的传播途径传输,从而实现了対光路进行故障判断以及实时监听,并且不影响原光路的正常运作^[8,11,15]。

由上可知,光纤耦合器在光通信系统中的各个部分都起着至关重要的作用,光纤耦合器的应用创新推动了光纤通信的飞速发展。

1.1.2 保偏光纤基本原理与性能参数

1. 保偏光纤基本原理

保偏光纤(Polarization Maintaining Fiber, PMF)是一种具有偏振态保持能力的光纤。普通单模光纤在制造过程中的缺陷(如圆度,不均匀,残余应力等),使得模场的两个正交分量在传输过程中的同步状态被破坏,从而产生随机的模间耦合,导致光场偏振态的不稳定以及信号的畸变,这对相干光通信系统和光纤传感系统

产生了非常严重的影响。而保偏光纤通过在光纤中人为制造的几何各向异性,使得模场中的两个线偏振基模的传播常数发生较大差异,减少了传播过程中的模间耦合,从而实现了保偏性能及高精度的信号传输要求。特别是在各种高精度的相干光检测和光纤传感器中,保偏光纤的使用不仅可以提高信号的检测灵敏度和精度,还可以有效地抑制外界环境变化引起的噪声干扰^[16-19]。

理想的标准单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) 具有良好的几何圆对称性,因而传输的主模式是一对偏振态相互正交的模 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y , 这两个模式是简并的,可以合成一个线偏振模。但在实际光纤中,由于各种几何参数 (如纤芯和包层的椭圆度、内应力、光纤的弯曲、扭转、包装等造成的折射率分布的畸变) 的不理想,从而产生传播常数差的现象。也即光纤本身缺陷的存在使得这种二重简并模被破坏,从而其传输特性略有差别,或者说它们的等效折射率不同,引起了光纤的模式双折射。双折射导致光信号在单模光纤的传输过程中偏振态的不稳定,这种不稳定对相干光系统产生了严重的影响,还会导致偏振模色散。为克服双折射的影响,可以人为地加大两个偏振态传输特性的差异,并使其中的一个处于截止状态,从而实现严格意义上的单模传输,这就是所谓的保偏光纤^[16]。

如果光纤纤芯是理想的而且是均匀的圆形,也就是说不管在光纤哪个方向激励,它们的波长在整个横界面上都相同,传播速度也一样。对于保偏光纤,由于其应力分布不均匀,光纤横界面上的折射率分布也不均匀。保偏光纤存在一个沿轴向的折射率最大,偏振模传播速度最小的轴,称为慢轴;而与慢轴垂直的方向沿轴向的折射率最小,偏振模传播速度最大的轴,称为快轴。一般设光波沿 Z 轴传播, X 轴为慢轴,其传播常数为 β_X , Y 轴为快轴,传播常数为 β_Y 。传播常数差 $\Delta\beta = \beta_X - \beta_Y$, $\Delta\beta$ 越大,两偏振方向的光波耦合就越困难,光纤的保偏能力就越强。

自 20 世纪 70 年代, Ramaswamy 和 Kaminow 等首次提出偏振保持光纤的概念和相应的制造方法^[20]后,各国都开始竞相研究和开发高性能的保偏光纤。20 世纪 80 年代是保偏光纤研究发展的高峰时期,先后出现了多种类型。对于保偏光纤,从产生的机理来看,双折射主要分为三类。一是形状双折射:电介质材料几何形状的各向异性,导致材料的介电常数和磁导率的各向异性,引起材料折射率的各向异性;二是应力双折射:主要指来自材料内部的热应力和材料外部的机械应力,材料在受到应力后引起材料折射率的变化即光弹效应而产生双折射;三是外界电磁场引起的双折射:横向电场在光纤中引起的克尔效应会产生线双折射,纵向磁场在光纤中引起的法拉第效应会产生圆双折射。国内外开发的保偏光纤应力区和纤芯有很多不同结构。目前商用的保偏光纤主要是前两类,其具体分类见表 1.1,结构见图 1.2。

表 1.1 保偏光纤的分类

	单偏振光纤 (SP)	几何形状效应 (GE)	应力效应 (SE)
高双折射型 (HB)	双偏振光纤 (TP)	边槽型 (Side Pit)	蝴蝶结型 (Bow-Tie)
		边隧道型 (Side Tunnel)	扁平包层型 (Flat Cladding)
		边槽型、边隧道型	熊猫型 (PANDA)
		椭圆纤芯型 (Elliptical Core)	蝴蝶结型、熊猫型、扁平包层型
低双折射型 (LB)		哑铃纤芯型 (Dumbbell Core)	椭圆包层型 (Elliptical Cladding)
		四区纤芯型 (Fore Section Core)	椭圆套层型 (Elliptical Jacket)
		旋转型 (Spun)	扭转型 (Twist)

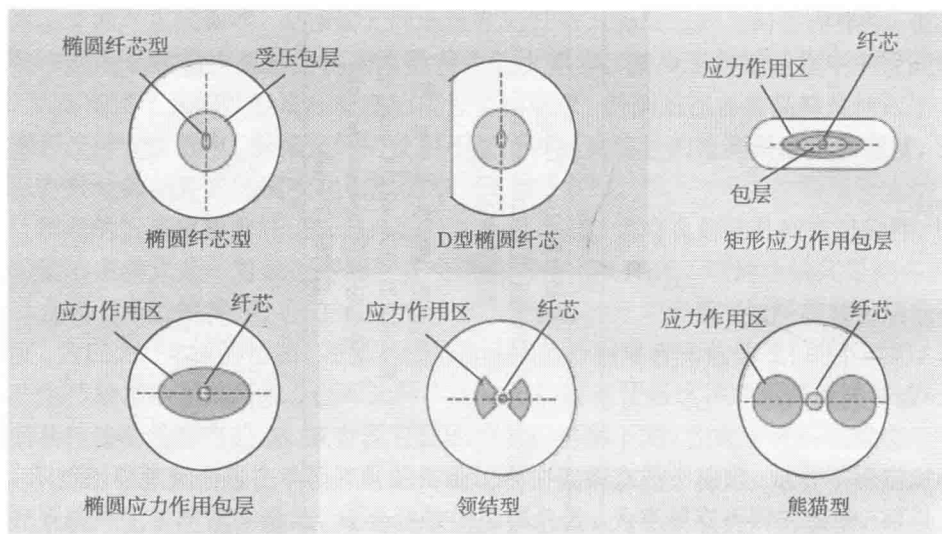


图 1.2 常用保偏光纤结构

图 1.2 中第一种为最简单的椭圆纤芯光纤^[21], 是利用椭圆纤芯得到几何双折射的, 其主要缺点是双折射值常不够大。图 1.2 中第二种为 D 型光纤, 其特点是芯靠近边界的一侧, 从而易于制成各种光纤器件, 此外由于几何外形上的不对称, 易于确定偏振方向, 使用方便。后四种保偏光纤分别为矩形包层型^[22]、椭圆包层型^[21]、领结型^[23]以及熊猫型^[24](简称熊猫光纤), 以应力双折射为主(几何双折射仅起到次要作用的高双折射光纤结构), 其中应力力区的线膨胀系数明显高于周围区域, 在光纤制造工艺的冷却阶段造成很大的 X 和 Y 方向的应力差, 这一应力差通过光弹效应转化为折射率差, 造成双折射。

目前国外已经研究出一系列高性能保偏光纤^[24], 国内从 20 世纪 80 年代也开始从事保偏光纤的研究, 但是技术比较落后, 至今保偏产品仍然很难满足中高精度光纤陀螺等对保偏光纤高性能的要求。

在国内外开发的各种保偏光纤中, 熊猫光纤是一种应力型保偏光纤, 采用钻孔插棒法在光纤中引入不均匀应力以获得高的双折射, 使两正交线偏振基模的相位常数 β_X 和 β_Y 有很大的差别, 两模式间的耦合变弱, 从而使光纤具有很强的偏振特性。熊猫光纤具有制造工艺相对简单、偏振保持特性优良、损耗低等优点, 得到了广泛的开发和应用。20 世纪 90 年代, 国内研制出了应力区和包层折射率几乎一致 ($\Delta n < 0.1\%$) 的匹配型熊猫光纤, 可用于制造小尺寸的保偏光纤耦合器, 其典型技术指标见表 1.2。书中所做的研究都是以熊猫光纤为对象进行的。

表 1.2 国内外商用保偏光纤典型技术指标

技术参数	具体指标					
工作波长/nm	630	850	980	1310	1400~1499	1550
截止波长/nm	≤ 620	730~800	800~950	1100~1290	1280~1380	1290~1540
模场直径/μm	4.0±1.0	4.5±1.0	6.0±1.0	9.5±1.0	9.8±1.0	10.5±1.0
数值孔径	0.14~0.18					
衰减/(dB/km)	≤ 8	≤ 3	≤ 3	≤ 1	≤ 1	≤ 0.5
拍长/mm	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 2	≤ 2	≤ 3	≤ 3
偏振串音/(dB/100m)	≤ -30	≤ -30	≤ -30	≤ -30	≤ -35	≤ -35
温度偏振稳定性	能够承受 -40~85 ℃ 的温度变化, 偏振串音的变化量 ≤1.0dB/100m					

2. 保偏光纤性能参数

表征保偏光纤特性的参数主要有归一化模式双折射 B 或拍长 L_p , 模耦合参数 h 或消光比 (Extinction Ratio, ER) 或串扰 (Crosstalk, CT)。

归一化模式双折射 B 是描述双折射现象最重要的参数, 它是两个相互正交线偏振模的等效折射率之差。 $B = n_x - n_y = \Delta\beta/k_0 = (\beta_X - \beta_Y)/k_0$, 其中 β 为模传播参数, $\Delta\beta$ 是沿保偏光纤慢轴 (β_X 最大) 和快轴 (β_Y 最小) 偏振的两线偏振波的传播常数差, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 。

拍长 $L_p = 2\pi/\Delta\beta = \lambda/B$, 可见拍长 L_p 与归一化模式双折射 B 是相互关联的, L_p 表示偏振态变化一个周期所需要的长度, L_p 越短, 双折射越强。

模耦合参数 h 或消光比 ER 或串扰 CT, 任何保偏光纤实际上都是由内外因素造成的微扰而形成双折射效应, 这种微扰双折射的轴与光纤的模双折射轴不一致, 偏振模发生耦合而降低光纤的偏振保持能力。在保偏光纤中, 模之间的能量转换以模耦合参数 h 或消光比 ER 或串扰 CT 来表示。

$$ER = -CT = -10 \lg \frac{P_2}{P_1} = -10 \lg [\tan(hL)]$$

(1.1)

式中, P_2 是光纤中人为激励的模式功率; P_1 是由微扰造成的耦合模的功率; CT 表示整段光纤的模耦合特性; h 为单位长度光纤的模耦合特性; ER 表示光纤保偏能力的另一个参数, 其意义与 CT 相同。

1.1.3 保偏光纤耦合器原理与性能参数

1. 保偏光纤耦合器原理

保偏光纤耦合器能将在一根保偏光纤中传输的线偏振光分成两路, 在两根保偏光纤中传输, 并保持偏振态不变, 即保持仍沿主轴传输, 且具有高的消光比。当两束线偏振光分别沿保偏光纤耦合器输入端口的偏振轴注入时, 经过耦合器可