



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

特种光纤光栅特性及在光纤激光技术中的应用研究

作者姓名: 王虎山

指导教师: 王屹山 研究员

中国科学院西安光学精密机械研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 光学

培养单位: 中国科学院西安光学精密机械研究所

2019年6月

**Research on characteristic of special fiber gratings and the
application in fiber laser technology**

**A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Optics**

By

Wang Hushan

Supervisor: Professor Wang Yishan

**Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences**

June 2019

中国科学院大学
研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学
学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分內容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

科研道德声明

秉承研究所严谨的学风与优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。论文中所引用的内容都已给予了明确的注释和致谢。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：_____ 日期：_____

知识产权声明

本人完全了解中科院西安光学精密机械研究所有关保护知识产权的规定，即：研究生在所攻读学位期间论文工作的知识产权单位系中科院西安光学精密机械研究所。本人保证离所后，发表基于研究生工作的论文或使用本论文工作成果时必须征得产权单位的同意，同意后发表的学术论文署名单位仍然为中科院西安光学精密机械研究所。产权单位有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；产权单位可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：_____

导师签名：_____

日期：_____

日期：_____

摘 要

光纤光栅作为一种光学无源器件,可实现多种功能并具有广泛的应用。随着光纤激光、光纤传感以及光纤通信等领域的迅速发展,对于光纤光栅有着更高的要求,如特殊的结构及功能、更大的参数范围、更高的性能、更多的光纤种类以及极端环境的适应性等。作为相关应用领域的关键、核心器件,特种光纤光栅具有重要的科研价值和迫切的研究需求。

围绕特种光纤光栅研究方向,本论文重点开展了 45 度倾斜光纤光栅、大角度倾斜光纤光栅及耐高温增益光纤光栅的研制、特性以及应用研究。主要研究内容和创新点如下:

1. 开展特种光纤光栅制作技术的研究,基于相位掩模法搭建了掩模板扫描光纤光栅刻写系统,研制了 45 度倾斜光纤光栅、大角度倾斜光纤光栅、Ia 型耐高温光纤光栅、相对小周期长周期光纤光栅、少量模长周期光纤光栅等多种特种光纤光栅。另外,设计出一种新型的双光束干涉扫描刻写系统,实现了多种特殊波段光纤光栅的制作。

2. 理论分析了 45 度倾斜光纤光栅的偏振原理及特性。基于 45 度倾斜光纤光栅的偏振特性,研制了全光纤偏振干涉滤波器,自由光谱范围为 0.164 nm,可实现梳状滤波。首次开展基于这种新型滤波器的全光纤多波长激光技术研究,获得了具有良好平坦度和均匀性的多波长激光光谱,在 3 dB 范围内的波长数高达 82 个,信噪比为 33 dB。另外,研究了双波长光纤激光的产生机理,利用具有 33 dB 消光比的 45 度倾斜光纤光栅实现了单偏振双波长光纤激光器,双波长激光的中心波长为 1033 nm 和 1053 nm,3 dB 带宽为 10 nm,偏振度高达 27 dB。

3. 理论研究了大角度倾斜光纤光栅的模式耦合特性,分析了其双峰光谱特性并在实验中进行了验证。首次提出利用大角度倾斜光纤光栅的模式耦合特性实现全光纤可饱和吸收体。实验中,通过在大角度倾斜光纤光栅表面沉积四氧化三铁纳米材料可实现光纤中光与可饱和吸收材料的相互作用,形成性能优良的可饱和吸收体器件。基于该器件获得了稳定的锁模光纤激光输出,信噪比高达 67 dB。

4. 在掺铥光纤及掺铒光纤上分别制作可承受高温的 Ia 型光纤光栅,在 500℃

下仍具有大于 99% 的高反射率。这种制作在增益光纤中的耐高温光纤光栅有助于实现超短腔、单纵模光纤激光。实验中，通过在掺镱光纤上直接写入一对耐高温光纤光栅，实现了 1 μm 波段耐高温分布式布拉格反射光纤激光器。该激光器腔长仅为 10 mm，光谱线宽为 16 pm，在 450 $^{\circ}\text{C}$ 温度下工作稳定，信噪比大于 50 dB，对于工作在高温苛刻环境下的高精度、长距离光纤光栅传感系统具有重要意义。

关键词：45 度倾斜光纤光栅，大角度倾斜光纤光栅，耐高温光纤光栅，光纤光栅制作，光纤光栅应用，光纤激光器

Abstract

Fiber gratings, as a kind of optical passive component, have multiple functions and a wide range of applications. With the rapid development of optical fiber laser, fiber sensor and fiber communication, there have been higher requirements for the fiber gratings in terms of special structure and function, extended data range, higher performance, more fiber types and extreme environment adaptability. As key devices for the relative applications, new fiber gratings are of great scientific significance and urgent demand.

Focusing on this research area, in this thesis, the fabrication, property and application of the 45 degree tilted fiber grating, excessively tilted fiber grating and high temperature resistant fiber grating are systematically studied. The main results and innovations of this thesis are as follows:

1. Fabrication technology of special fiber gratings is explored, a mask-scanning fabrication system is built, and various special fiber gratings are written including 45 degree tilted fiber gratings, excessively tilted fiber gratings, type Ia high temperature resistant fiber gratings, small-period long period fiber gratings, long period fiber gratings written in few-mode fiber, etc. Besides, a dual-beam-interference-scanning fabrication system is designed and fabrication of special wavebands fiber gratings is realized accordingly.

2. The polarization principle and property of 45 degree tilted fiber gratings is studied in theory. Based on the property, an all fiber polarization interference comb-like filter with free spectral range of 0.164 nm is developed. For the first time, all-fiber multiwavelength laser based on the new filter is introduced with flat and uniform multiwavelength spectrum. The laser has 82 peaks within 3 dB bandwidth and signal-to-noise ratio (SNR) of 33 dB. Besides, the mechanism of dual-wavelength fiber laser is studied. By employing a 45 degree tilted fiber grating with polarization extinction ratio of 33 dB, a single-polarization all-fiber dual-wavelength mode-locked

laser is realized. The dual-wavelength laser centered at 1033 nm and 1053 nm with 3 dB bandwidth of 10 nm has 27 dB degree of polarization.

3. The mode coupling property of excessively tilted fiber gratings is theoretically researched, the series-dual-wavelength spectrum is analysed and experimentally verified. The excessively tilted fiber gratings are originally introduced into saturable absorber based on the coupling property. In the experiment, the transmitted light can interact with nanoparticles by ferroferric-oxide nanoparticles deposited excessively tilted fiber grating, a saturable absorber with excellent performance is made and applied in a mode locked fiber laser. The laser can operate at stable mode-locking state with SNR of 67 dB.

4. Fiber gratings with high temperature resistance are fabricated in Yb-doped fibers and Er-doped fibers respectively. At 500°C, the grating still has a high reflectivity of over 99%. These high temperature resistant fiber gratings written in gain fibers can contribute to fiber lasers with ultra-short cavity and single longitudinal mode. Based on a pair of high temperature resistant Yb-doped fiber gratings, a distributed Bragg reflector (DBR) laser at 1 μm waveband is obtained in the experiment. The laser with linewidth of 16 pm has a total cavity length of 10 mm and can operate well at 450°C with over 50 dB SNR. This laser is of great significance for the high-precision long-distance fiber sensing working in high temperature environment.

Key Words: 45 degree tilted fiber grating, Excessively tilted fiber grating, High temperature resistant fiber grating, Fabrication of fiber grating, Application of fiber grating, Fiber laser

目 录

第 1 章 引言.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 光纤光栅概述.....	1
1.1.2 特种光纤光栅的发展方向.....	4
1.2 研究进展.....	6
1.2.1 45 度倾斜光纤光栅研究进展.....	7
1.2.2 大角度倾斜光纤光栅研究进展.....	13
1.2.3 耐高温光纤光栅研究进展.....	17
1.3 研究意义及研究内容.....	19
第 2 章 光纤光栅耦合模理论.....	21
2.1 光纤光栅的基本耦合模理论.....	21
2.2 光纤布拉格光栅耦合模理论.....	24
2.3 倾斜光纤光栅耦合模理论.....	25
2.4 倾斜光纤光栅全矢量复耦合模理论.....	27
2.5 小结.....	30
第 3 章 特种光纤光栅制作.....	31
3.1 光纤光栅制作系统.....	31
3.1.1 光纤载氢系统.....	31
3.1.2 光纤光栅刻写装置.....	32
3.1.3 退火处理.....	37
3.2 倾斜光纤光栅制作技术.....	37
3.2.1 45 度倾斜光纤光栅制作技术.....	37
3.2.2 大角度倾斜光纤光栅制作技术.....	41
3.3 双光束干涉扫描刻写技术.....	42
3.3.1 双光束干涉扫描刻写系统.....	42
3.3.2 特殊波段光纤光栅制作.....	43
3.4 小结.....	45
第 4 章 45 度倾斜光纤光栅在多波长光纤激光的应用研究.....	47

4.1	45 度倾斜光纤光栅的原理及特性	47
4.1.1	45 度倾斜光纤光栅的起偏原理	47
4.1.2	45 度倾斜光纤光栅偏振相关损耗	48
4.2	全光纤偏振干涉滤波器及多波长光纤激光器	49
4.2.1	基于 45 度倾斜光纤光栅的全光纤偏振干涉滤波器	49
4.2.2	基于全光纤偏振干涉滤波器的多波长光纤激光器装置及原理	52
4.2.3	多波长光纤激光器测量结果	54
4.3	基于 45 度倾斜光纤光栅的单偏振双波长锁模光纤激光器	60
4.3.1	双波长激光器原理及装置	60
4.3.2	激光器输出特性	62
4.4	小结	65
第 5 章 大角度倾斜光纤光栅特性及在锁模光纤激光的应用研究		67
5.1	大角度度倾斜光纤光栅特性研究	67
5.1.1	光纤包层模式的有效折射率计算	67
5.1.2	大角度倾斜光纤光栅模式特性理论计算	68
5.1.3	大角度倾斜光纤光栅特性实验研究	71
5.2	大角度度倾斜光纤光栅在锁模光纤激光器中的应用研究	74
5.2.1	可饱和吸收体简述	74
5.2.2	基于大角度倾斜光纤光栅的可饱和吸收体	75
5.2.3	基于大角度倾斜光纤光栅可饱和吸收体的锁模光纤激光器	78
5.3	小结	82
第 6 章 Ia 型耐高温光纤光栅及在 DBR 激光的应用研究		83
6.1	Ia 型耐高温光纤光栅	83
6.1.1	Ia 型耐高温光纤光栅基本原理	83
6.1.2	Ia 型耐高温光纤光栅制作	83
6.1.3	Ia 型掺镱光纤光栅高温测试	86
6.2	基于耐高温光纤光栅的 DBR 光纤激光器研究	87
6.2.1	耐高温 DBR 光纤激光器研制	87
6.2.2	耐高温 DBR 光纤激光器高温测试	89
6.3	小结	90
第 7 章 总结与展望		91
7.1	论文总结	91

7.2 展望.....	92
参考文献.....	95
附录 中英文对照表.....	109
致 谢.....	111
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	113

第 1 章 引言

1.1 研究背景

1.1.1 光纤光栅概述

光纤光栅是一种具有周期性折射率调制的光纤无源器件。自 1978 年加拿大通信研究中心的 K.O. Hill 等人利用驻波法首次实现了光纤光栅[1]，光纤光栅已经历了 40 余年的发展，从最初的光纤布拉格光栅扩展至啁啾光纤光栅、长周期光纤光栅、相移光纤光栅、倾斜光纤光栅等多种类光纤光栅。光纤光栅除了光纤固有的优点，如全光纤结构、体积小、插损小、易于集成、极化不敏感、抗干扰、耐腐蚀等，还具有滤波、色散补偿、温度/应力/折射率响应、光反射等作用，被广泛应用于光纤通信、光纤激光及光纤传感系统中，光纤光栅技术极大促进了光纤光学领域的发展。

在光纤通信领域中，光纤布拉格光栅存在传输方向相反的模式耦合，可作为波长选择器。另外，光纤布拉格光栅的带宽小且具有较高边模抑制比，可应用于上/下路波分复用器或解复用器，在波分复用系统中也有着重要应用[2]。啁啾光纤光栅在光纤轴向具有渐变的光栅周期，不同波长的光在啁啾光纤光栅不同位置被反射，可实现色散补偿作用，减少色散对通信的影响。长周期光纤光栅相比于光纤布拉格光栅具有更宽的阻带，且为透射型没有回波影响，可以通过级联实现多种滤波特性，因此常被用于增益平坦器中以减少高比特率通信系统的传输误码。此外，长周期光纤光栅可实现前向纤芯基模和包层模之间的耦合，台湾大学 W.T. Chen 等人利用这种特性实现了具有较长工作距离的单模光纤耦合器[3, 4]。

在光纤传感领域，随着温度、应力、位移、应变、折射率等外界环境的变化，光纤光栅周期或纤芯有效折射率会发生改变，进而导致光纤光栅谐振波长的漂移。因此，光纤光栅可作为性能优异的传感器，通过测量光纤光栅谐振波长的改变获得环境参量的变化。另外，光纤光栅传感器相比传统的电子或机械传感器，具有灵敏度高、动态范围大、抗电磁干扰、体积小、智能结构集成度高、可靠性高、成本低等诸多优点。经过科研人员数十年的努力，光纤光栅传感器目前已广泛应用于桥梁、铁路、飞行器、矿井、油田、深海探测、水利等领域。电子科技大学饶云江等人利用 1310 nm 光纤布拉格光栅实现了灵敏度为 1.15 pm/ $\mu\epsilon$ 的应变传感，

利用 1550 nm 光纤布拉格光栅实现了灵敏度为 $13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 的温度传感[5]。华南师范大学蒙红云等人利用光纤布拉格光栅同时测量了折射率及温度的变化，如图 1.1 所示，折射率灵敏度达到了 $87 \text{ dB}/\text{RIU}$ ，温度灵敏度达到 $9.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ [6]。复旦大学利用 Hi-Bi 高双折射光纤布拉格光栅实现了温度和气压的传感[7]。长周期光纤光栅振波长和强度对外界环境的变化非常敏感，可以进一步提升光纤传感灵敏度并减少反射光对测量系统的影响。英国阿斯顿大学的张琳团队研究表明长周期光纤光栅可以实现弯曲传感，对于弯曲的响应为线性且灵敏度为传统波长漂移探测方法的四倍[8]。台湾大学 L.A. Wang 等人基于光弹效应实现了长周期光纤光栅对于扭曲的直接测量[9]。英国阿斯顿大学舒学文等人刻写了具有数毫米周期的长周期光纤光栅，其不同衍射级次的包层模具有不同的温度响应，可以实现多个参数的同时测量[10]。英国阿斯顿大学陈险峰等人采用紫外光在 D 型光纤上制作了长周期光纤光栅，有着较高浓度灵敏度，达到了 $0.53 \text{ nm}/\%$ ，对于光纤传感在生物化学领域的应用起到一定推动作用[11]。另外，小角度倾斜光纤光栅由于其密集的包层模特性，可应用在表面等离子体生物传感[12]、折射率传感[13]、以及加速度计[14]等。

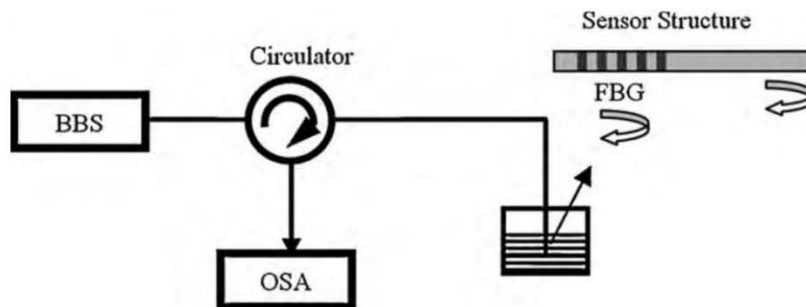


图 1.1 光纤布拉格光栅在光纤传感中的应用[6]

Figure 1.1 Application in fiber sensor of fiber Bragg gratings [6]

在光纤激光领域，光纤布拉格光栅常被作为腔镜应用在线型腔光纤激光器中。在应用光纤光栅之前，这种法布里珀罗腔激光器主要是利用二向色镜构成谐振腔，增益光纤的两端需经过抛光且紧贴二向色镜，调整困难且损耗较大。另一种方法是在抛光的光纤端面进行镀膜，然而介质膜对于光纤端面要求极高且在高功率泵浦光下易损坏。采用一对光纤光栅形成光纤激光谐振腔消除了传统腔镜与光纤之间的耦合损耗，实现了激光器的全光纤结构，极大提高了光纤激光器的可靠性且不存在谐振腔的调整问题，此外，还可以窄化发射线宽、获得单纵模激光输出，

并提高激光器的信噪比、输出功率以及光束质量。另外，色散管理对实现超短脉冲激光的稳定和可靠运行具有重要意义，而在光纤激光器尤其是 $1\ \mu\text{m}$ 波段超短脉冲光纤激光技术中，普通光纤均处于正色散区域，难以实现全光纤负色散补偿和管理。传统的色散管理器件主要包括：衍射光栅对[15]，如图 1.2 (a) 所示，其原理为光脉冲入射到两个相互平行光栅对的一个光栅上时，脉冲中不同频率分量发生衍射的角度不同，脉冲到达第二个光栅时，各频率分量受到不同的时间延迟，因此可以实现色散管理。这种色散器件空间占有率大，破坏了全光纤结构，并会引入损耗大、结构复杂、难以调节等问题；光子晶体光纤[16]，如图 1.2 (b) 所示，由于光子晶体光纤的包层的空气孔结构，其纤芯和包层的折射率差增大，波导色散为反常色散，从而可以进行色散补偿。光子晶体光纤的空芯结构易导致光反馈，对锁模稳定性造成影响，光子晶体光纤和普通光纤熔接困难熔接损耗较高。而啁啾光纤光栅，如图 1.2 (c) 所示，具有全光纤结构，色散控制精准，非常适用于激光器腔内色散管理，对于超短脉冲产生具有重要意义。另外，2018 年的诺贝尔物理学奖授予了 Arthur Ashkin、Gérard Mourou 和 Donna Strickland。其中，Gérard Mourou 和 Donna Strickland 因发明产生超短超强激光脉冲的啁啾脉冲放大技术而获奖。啁啾脉冲放大技术革命性地推动了激光强度的进展，使人们所能得到的激光强度在不到 10 年的时间里，提高了 6-7 个数量级，且随着激光强度的不断提高，科学家们利用啁啾脉冲放大技术，能够在实验室实现瞬态的超强电场、超强磁场、超高加速梯度、超高等离子体密度、超高压强等一系列极端物理现象，开创并促进了强场物理、原子分子物理、加速器物理、核物理、天体物理、粒子物理等学科与激光的交叉和发展。对于啁啾脉冲放大技术，其关键首先是将种子脉冲展宽以降低激光峰值功率，随后进行放大以及再压缩，在这个脉冲放大及压缩的过程中啁啾光纤光栅作为色散管理器件发挥着至关重要的作用。2007 年，德国耶拿大学的 A. Tünnermann 等人将啁啾光纤光栅应用在线型腔光纤激光器中提供色散，获得了 22 ps 的激光脉冲[17]。2010 年，中国科学院西安光学精密机械研究所王屹山等人利用一对啁啾光纤光栅管理激光器腔内色散，如图 1.3 所示，获得了 1.27 ns、15 nJ 的高能量激光输出[18]。2013 年，中国科学院上海光学精密机械研究所及瑞尔森大学在利用啁啾光纤光栅实现 $2.4\ \text{ps}^2$ 及 $-2.0\ \text{ps}^2$ 两种腔内净色散，分别获得了 1.1 ns、1.5 nJ 和 2.7 ps、0.13 nJ 的激光输出[19]。2013 年，上海交通大学詹黎等人报道了基于啁啾光纤光栅的全光纤高能量孤子

激光，啁啾光纤光栅提供了大量色散，输出脉宽 4.4 ps，单脉冲能量可以达到 4.8 nJ[20]。2014 年，加拿大拉瓦尔大学 Simon Duval 等人利用一堆啁啾光纤光栅控制色散实现了 98 fs 的超短脉冲[21]。2015 年，帝国理工学院的 R. I. Woodward 等人利用啁啾率为 0.006 nm/mm 长度为 400 mm 的啁啾光纤光栅将具有巨啁啾的纳秒脉冲压缩至 11 ps[22]。

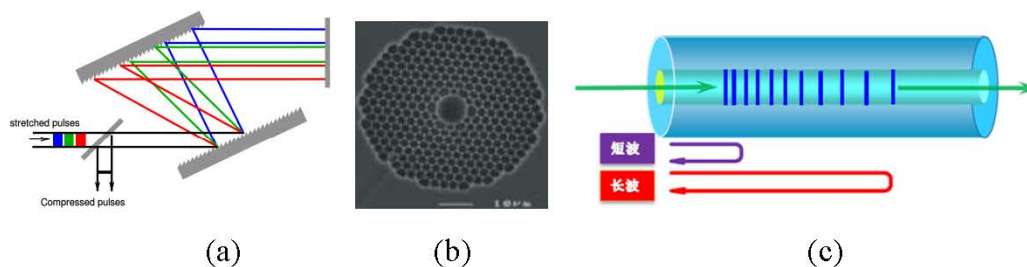


图 1.2 色散管理器件结构示意图，

(a) 光栅对, (b) 光子晶体光纤, (c) 啁啾光纤光栅

Figure 1.2 Structure of dispersion management devices,

(a) Grating pairs, (b) Photonic crystal fiber, (c) Chirped fiber grating

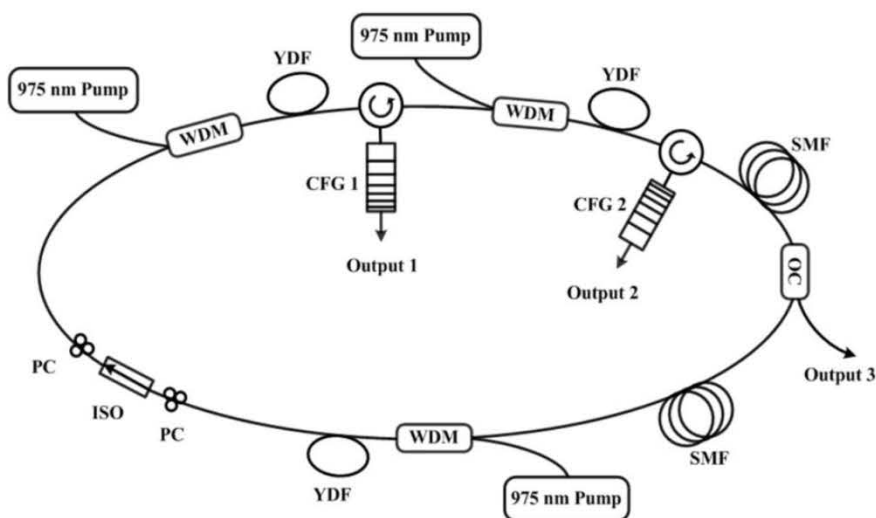


图 1.3 一种基于啁啾光纤光栅管理腔内色散的光纤激光器[15]

Figure 1.3 Fiber laser based on intracavity dispersion management by using chirped fiber grating [15]

1.1.2 特种光纤光栅的发展方向

随着应用领域的迅速发展，传统光纤光栅已不能满足相关的需求，商用光纤光栅更是种类有限功能单一，对于光纤光栅有着更高的要求：更特殊的功能性、更大的参数范围、更高的光栅性能、更多光纤种类以及特殊应用环境适应能力等。

1) 光纤激光器输出激光的偏振度会影响光纤放大系统的偏振度及传输效率, 为减少激光加工光学系统的传输损耗, 需要有效提升激光的输出偏振度。对于传感领域的光纤陀螺、电流/电压互感器等, 对于激光偏振度同样有着较高要求。目前常用的起偏器多为传统晶体型起偏器及 Y 波导起偏器, 破坏了光学系统的全光纤结构, 进而影响了系统的稳定性、集成度及性能参数。因此, 利用光纤光栅实现具有全光纤结构的起偏器有着重要意义。

2) 随着工业水平的不断提升, 对于环境温度的监测有着更高的要求。在航空航天、化工冶金、石油电力等高温苛刻环境应用中, 光纤传感系统需要可承受高温的光纤光栅传感器。而由于热衰退效应, 传统的光纤光栅在高温环境下 (大于 320°C) 会存在折射率调制的衰退甚至消失。为拓展光纤传感系统的应用领域, 可承受 300°C 以上高温的光纤光栅研制有着迫切的需求。

3) 在生物化学领域, 和电化学传感器相比光纤传感不需要荧光标定且尺寸小, 常被用于折射率传感。由于光纤的光被限制在纤芯, 不能感知外部的物质, 通常只能通过腐蚀光纤、侧面抛磨或用长周期光纤光栅等方法将光引到光纤外, 使得有光模场的倏逝场可以渗透到光纤的外部, 用以感知环境中的物质。腐蚀光纤的方法使得光纤非常脆弱, 不宜使用。长周期光纤光栅是将光纤的基模耦合到低阶的包层模, 其倏逝场的深度比较小, 只有当环境的折射率和光纤的折射率相当时, 才有比较高的灵敏度。而大多数的生化传感需要在水溶液中, 长周期光纤光栅灵敏度比较小, 一般为 $30\text{-}90\text{ nm/RIU}$ 。另外, 小角度倾斜光纤光栅具有较低的温度交叉传感影响, 但是其折射率灵敏度也一般只有 10 nm/RIU [13]。因此, 在该领域急需提升光纤光栅的折射率传感特性以提高光纤传感系统的灵敏度及分辨能力。

4) 在高能量超短脉冲光纤激光系统中, 色散控制的范围要求越来越大, 对于光纤激光种子源, 其需求的色散补偿一般只有 $0.01\text{-}10\text{ ps}^2$, 要实现如此小色散补偿, 啁啾光纤光栅的啁啾量要大于 80 nm/cm , 然而目前的光纤光栅制造工艺最大啁啾量一般只能达到 30 nm/cm , 无法在单根光纤光栅实现如此小的色散补偿。而啁啾脉冲放大系统中脉冲展宽阶段, 对于啁啾光纤光栅的参数也有着更高的要求, 例如某啁啾脉冲放大系统需求啁啾光纤光栅光谱带宽大于 12 nm , 色散系数 100 ps/nm , 反射率大于 75% , 啁啾光纤光栅同时需要较长的光纤光栅长度, 通过激光扩束直接写入光纤光栅的方案一般无法实现该类光纤光栅。

5) 高功率、高光束质量连续光纤激光光源具有光束质量好、电光效率高和体积结构紧凑等独特优势,在工业、国防等领域具有重要的应用前景。该类激光器由于输出功率很高,对于光纤光栅的功率承受能力有着极高的要求,一般需要在 20/400 双包层光纤上制作光纤光栅,且可承受 500 W 至 1000 W 量级的高功率。另外,14/250 双包层光纤由于同时具有输出光束质量好、可承受较高功率的特点,逐渐受到高功率激光器的青睐,基于 14/250 双包层光纤的光纤光栅研制也有着迫切需求。目前,这种可承受高功率的特种光纤光栅由于光纤芯径较大且在制作过程中不能有物理损伤和结构破坏,对于光源和光路控制有着较高要求,制作较为困难。国内上海光机所成功实现了该类光纤光栅的制作,但国内大部分光纤光栅机构研制的该类器件成品率较低、实际应用情况不理想。该类技术仍主要掌握在国外机构(如加拿大的 Teraxion 公司)手中。

6) 为获得数万瓦甚至数十万瓦光纤激光输出,需要将多路高功率光纤激光通过相干合成技术或光谱组束技术进行光束合成,而在合束过程中的光纤激光在具有高输出功率的同时需保持较窄的光谱线宽。但是窄线宽光纤激光在高功率放大过程中,自相位调制(SPM)、四波混频(FWM)、交叉相位调制(XPM)等非线性效应会引入频率转换造成光谱展宽。为了抑制这种展宽,实现高功率窄线宽光纤激光,对于窄线宽光纤光栅、任意谱形光纤光栅、随机光纤光栅等多种特殊光纤光栅有着重要需求。

7) 特殊波段光纤激光的重要性在近年越发显著,例如 2 μm 波段激光是眼安全的激光;1.7 μm 波段光纤激光可用作 3-5 μm 中红外激光的泵浦光源,进而应用在商业及国防领域的光学成像、遥感中。另外,对于光纤传感及光纤通信,实现不同波段的运作可以提升光学系统的数据传输能力及精度等。考虑到传统成熟光纤光栅多集中在 1-1.5 μm 波段,实现特殊波段(如 800 nm、980 nm、1.6 μm 、1.7 μm 、2 μm 等)的光纤光栅对于相关应用研究的开展具有显著推动作用。

综上所述,开展特种光纤光栅的研究对于相关应用领域的发展具有显著推动作用,已成为了具有重要意义的科学研究方向。

1.2 研究进展

特种光纤光栅及应用技术有着迫切的研究需求,因此,虽然这类光纤光栅制作较为复杂和困难,科研工作者仍投入大量科研工作和努力至特种光纤光栅的制

作、特性及应用研究中，极大推动了光纤光栅的发展。目前，特种光纤光栅包括 45 度倾斜光纤光栅、大角度倾斜光纤光栅、耐高温光纤光栅、特殊波段光纤光栅、少量模/多模光纤光栅、可承受千瓦级高功率的双包层光纤光栅、可补偿三阶色散或极小色散的特殊啁啾光纤光栅等。根据本论文的主要研究内容，重点介绍 45 度倾斜光纤光栅、大角度倾斜光纤光栅及耐高温光纤光栅的研究进展。

1.2.1 45 度倾斜光纤光栅研究进展

1990 年, Meltz 首次提出小角度倾斜光纤光栅模型[23]。倾斜光栅的光栅平面与光纤轴向具有一定的倾斜角度, 可实现前向芯模到后向或前向包层模、辐射模的耦合, 如图 1.4 所示。按照倾斜角度 θ , 倾斜光纤光栅可细分为三种不同耦合机制的倾斜光纤光栅: 当 $\theta < 23.1^\circ$ 时, 为反向包层模耦合的小角度倾斜光纤光栅; 当 $23.1^\circ < \theta < 66.9^\circ$ 时为辐射模耦合的倾斜光纤光栅; 当 $\theta > 66.9^\circ$ 时为前向包层模耦合的大角度倾斜光纤光栅。目前国内外开展倾斜光纤光栅研究的机构主要有英国阿斯顿大学、加拿大卡尔顿大学、新加坡南洋理工、电子科技大学、华中科技大学、国防科技大学、西北工业大学、中科院西安光学精密机械研究所、山东大学、上海大学、南京邮电大学、暨南大学、北京交通大学等研究机构。

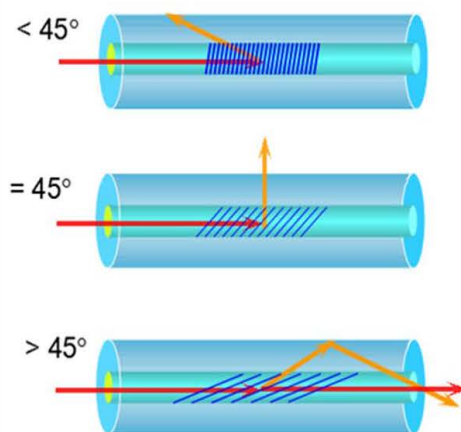


图 1.4 倾斜光纤光栅结构及传输特性示意

Figure 1.4 Illustration of structure and transmitting property of tilted fiber gratings

在倾斜光纤光栅中, 45 度倾斜光纤光栅最早在 2000 年和 2001 年被用作偏振均衡器以及偏振测量仪[24, 25]。2005 年, 英国阿斯顿大学光电子技术研究中心的周凯明、陈险峰以及张琳等人首次提出基于 45 度倾斜光纤光栅的全光纤起偏器, 并实验上在光敏光纤中得到验证[26], 图 1.5 为不同倾斜角度的光纤光栅透射特性。图 1.5 (a) 为模拟的具有相同光栅周期 (542 nm)、不同倾斜角度的

光纤光栅透射谱，其中实线为 s 偏振光，虚线为 p 偏振光，可见当倾斜角度为 45 度时，p 偏振光的传输损耗几乎为 0，而 s 偏振光则有明显的损耗。通过图 1.5 (b) 可以看到，在 45 度倾斜角度时，对于 s 光及 p 光的损耗差达到最大，展现了良好的偏振特性。另外，如图 1.6 所示，具有 50 mm 光栅长度的 45 度倾斜光纤光栅的偏振相关损耗可以达到 33 dB，带宽达到了 100 nm。2010 年，北京交通大学、加拿大麦克马斯特大学的科研工作者理论分析了 45 度倾斜光纤光栅的特性[27]。这种良好的偏振特性使得 45 度倾斜光纤光栅可作为一种理想的全光纤起偏器，拥有全光纤结构、高消光比、宽带宽、低插损以及低成本等诸多优势。

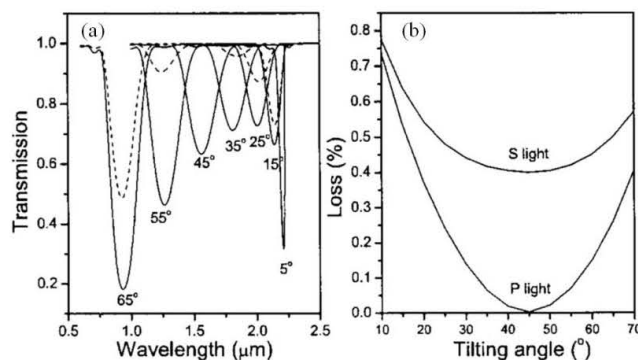


图 1.5 (a) 不同倾斜角度的光栅透射谱, (b) 光栅透射损耗随倾斜角度的变化[26]

Figure 1.5 (a) Transmission spectra of gratings with different tilted angles, (b) Transmission losses of gratings versus tilted angles [26]

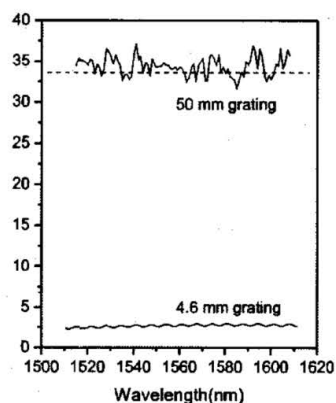


图 1.6 45 度倾斜光纤光栅偏振相关损耗特性[26]

Figure 1.6 Polarization dependent loss property of 45 degree tilted fiber grating [26]

但是由于刻写工艺限制，高消光比的 45 度倾斜光纤光栅在当时只能够在光敏光纤上制备，极大的限制了 45 度倾斜光纤光栅的应用范围。经多年的努力，英国阿斯顿大学光电子技术研究中心的闫志君等人在实验室克服 45 度倾斜光纤光

栅仅能在光敏光纤上制备的限制，实现在任意光纤上的制备高消光比 45 度倾斜光纤光栅，并且在 2010 年的报道中对 45 度倾斜光纤光栅的偏振特性及温度特性进行了系统的研究[28]。如图 1.7 所示，45 度倾斜光纤光栅的偏振相关损耗同光栅的长度有关，且呈线性关系。光纤光栅退火也会少量降低 45 度倾斜光纤光栅的偏振相关损耗。另外，45 度倾斜光纤光栅具有宽范围的偏振响应，其响应波长带宽可达数百纳米。温度对 45 度倾斜光纤光栅的影响也进行了相关测试，对于已退火的 45 度倾斜光纤光栅，当温度从 20℃ 提升至 90℃ 时，其偏振相关损耗仅仅降低了 0.5 dB，几乎不受温度影响。2012 年，该课题组又首次在保偏光纤上制备了 45 度倾斜光纤光栅，并实现全光纤线偏振起偏器。如图 1.8 (a) 和 (b) 分别所示，45 度倾斜光纤光栅可沿保偏光纤的慢轴或快轴制作，其所制作的 48 mm 长的 45 度倾斜光纤光栅在 1550 nm 处具有 46 dB 高消光比，且在 50 nm 范围消光比均大于 40 dB[29]。这些研究进一步推动了 45 度倾斜光纤光栅的应用。

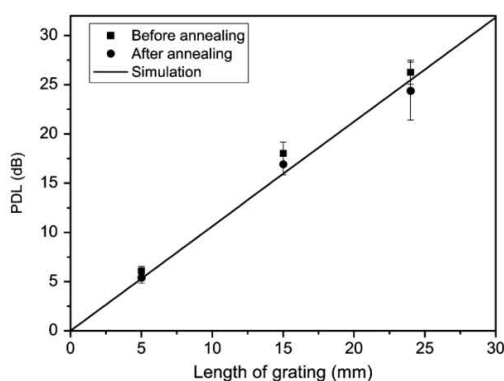


图 1.7 45 度倾斜光纤光栅偏振损耗特性[28]

Figure 1.7 Polarization dependent loss property of 45 degree tilted fiber grating [28]

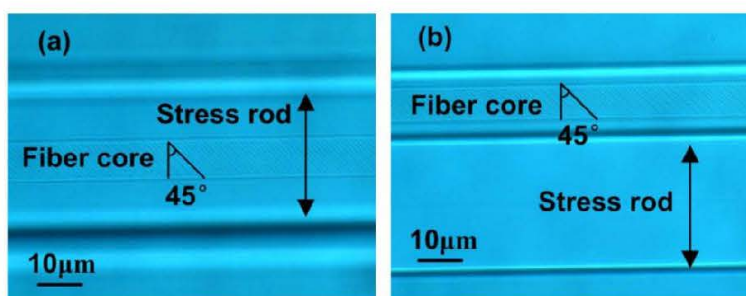


图 1.8 沿保偏光纤 (a) 慢轴 (b) 快轴制作的 45 度倾斜光纤光栅结构图[29]

Figure 1.8 Structure of 45 degree tilted fiber grating fabricated in polarization maintaining fiber along (a) slow axis and (b) fast axis [29]

由于 45 度倾斜光纤光栅优异的偏振特性，基于 45 度倾斜光纤光栅的器件及

应用研究也逐渐成为热点。在光纤激光应用方面，2009年，英国阿斯顿大学的牟成博等人利用45度倾斜光纤光栅实现了连续光纤激光的高消光比输出[30]，其结构如图1.9所示。在使用45度倾斜光纤光栅之前，激光输出的消光比只有2 dB，而通过利用45度倾斜光纤光栅，激光输出的消光比得到了极大的提升，达到35 dB。在5个小时的监测过程中，其消光比浮动只有2 dB。

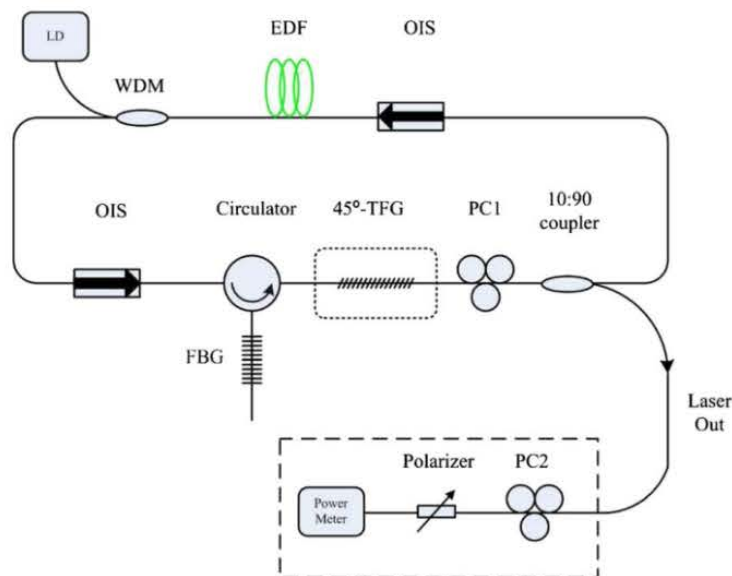


图 1.9 基于 45 度倾斜光纤光栅的高消光比激光器[30]

Figure 1.9 High polarization extinction ratio laser based on 45 degree tilted fiber grating [30]

利用45度倾斜光纤光栅还可以实现光纤激光器的非线性偏振旋转锁模(Nonlinear polarization rotation, NPR)。该类光纤激光器的典型结构如图1.10所示，具有高消光比的45度倾斜光纤光栅被放置在两个偏振控制器之间以实现激光器腔内的NPR效应，其中掺镱光纤(Yb-doped fiber, YDF)可根据工作波段更换为掺铒光纤(Er-doped fiber, EDF)或掺铥光纤(Tm-doped fiber, TDF)。通过采用45度倾斜光纤光栅代替传统的空间分离结构的起偏器，实现了光纤激光的全光纤化，提升了光纤激光器的集成度及稳定性。2010年，英国阿斯顿大学的牟成博等人首次报道了这种基于45度倾斜光纤光栅的锁模光纤激光器[31]，实现了600 fs、1 nJ的超短脉冲激光，其输出光谱在1548-1562 nm之间可调。2012年，中国科学院西安光学精密机械研究所的刘香莲以及英国阿斯顿大学的闫志君等人利用1 μm波段的45度倾斜光纤光栅实现了YDF锁模光纤激光器[32]。通过采用具有33 dB偏振相关损耗的45度倾斜光纤光栅，获得了具有26 dB高消

光比、4 ps 脉宽、9 nm 带宽的耗散孤子脉冲。2013 年，中国科学院西安光学精密机械研究所的刘香莲等人在基于 45 度倾斜光纤光栅的锁模光纤激光器中实现了束缚态脉冲输出，并指出了该束缚态脉冲的形成是由于高的泵浦强度以及有效的滤波带宽[33]。同年，英国阿斯顿大学光电子技术研究中心的张祖兴等人实现了基于 45 度倾斜光纤光栅锁模的光纤激光最短脉冲宽度，利用 45 度倾斜光纤光栅的偏振特性和色散管理，获得了小于 100 fs 的脉冲，平均输出功率为 8 mW，脉冲能量 1.68 nJ[34]。2014 年，电子科技大学李剑峰以及英国阿斯顿大学的闫志君等人，利用中心波长在 2000 nm 的 45 度倾斜光纤光栅实现了 TDF 锁模光纤激光器[35]。该报道中所采用的 45 度倾斜光纤光栅在 1850-2150 nm 范围内具有大于 12 dB 的偏振相关损耗，激光锁模在 1922.7 nm，具有 2.02 nm 带宽、2.2ps 脉宽以及 74.6 pJ 的脉冲能量。2015 年，南京邮电大学的张祖兴等人利用 45 度倾斜光纤光栅的全光纤特点减少了环形腔激光的腔长，获得了 251.3 MHz 的高重频锁模运转，其输出脉宽为 96.7 fs[36]。2017 年，上海大学牟成博等人通过使用 45 度倾斜光纤光栅及光纤布拉格光栅实现了 33 ps、带宽为 0.15 nm 的窄带锁模光纤激光器，其输出功率为 1.2 mW，信噪比为 70 dB[37]；实现了基于 45 度倾斜光纤光栅的被动调 Q 光纤激光，输出功率 17.5 mW、脉宽 466 ns、单脉冲能量 72.7 nJ[38]；利用 45 度倾斜光纤光栅和碳纳米管实现了锁模，利用较弱和较强的 45 度倾斜光纤光栅分别实现了激光中心波长 4.6 nm 及 15.26 nm 范围的调谐[39]。2018 年，该课题组又利用具有 24 dB 偏振相关损耗的 45 度倾斜光纤光栅实现了激光锁模，其转换效率达到了 8.1%，信噪比为 61.9 dB[40]。45 度倾斜光纤光栅及其应用研究推动了光纤激光尤其是锁模光纤激光器的研究发展。

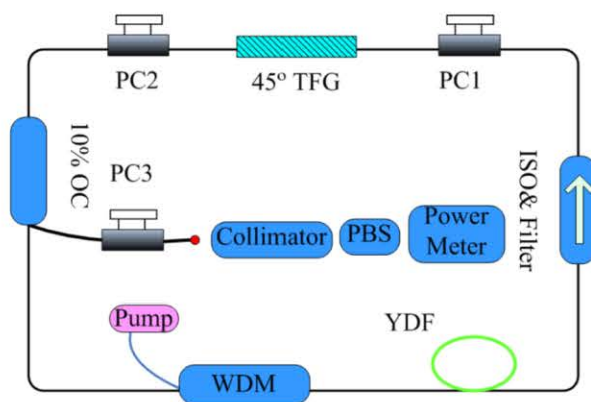


图 1.10 基于 45 度倾斜光纤光栅的 NPR 锁模光纤激光器[32]

Figure 1.10 NPR mode-locked fiber laser based on 45 degree tilted fiber grating[32]

在光纤器件应用方面，2010 年，美国空军实验室以及波音公司利用 45 度倾斜光纤光栅作为起偏器实现了高功率全光纤隔离器[41]。传统的全光纤器件的最高负载功率仅为几瓦，而一台输出功率瓦级的激光器其腔内总功率通常有十几甚至几十瓦，通常的方法是利用体光学器件代替全光纤器件，然而体光学器件会带来准直和稳定性的问题。因此，实现可承受高功率的全光纤隔离器具有重要意义。2011 年，实现了 1065 nm 基于 45 度倾斜光纤光栅的全光纤隔离器，其结构及原理如图 1.11 所示，隔离器的插损为 0.5 dB，对功率高达 8 W 的光隔离度达到 14 dB[42]。2012 年，英国阿斯顿大学的闫志君等人利用保偏光纤上制作的 45 度倾斜光纤光栅首次实现了全光纤偏振干涉滤波器[43]，保偏光纤为 20 cm 时，自由光谱范围为 26.6 nm，保偏光纤长度为 40 cm 时，自由光谱范围为 14.8 nm。2012 年，英国阿斯顿大学和中国科学院西安光学精密机械研究所的研究团队利用这种基于的 45 度倾斜光纤光栅的全光纤偏振干涉滤波器实现了孤子锁模光纤激光器，该滤波器对于输出的孤子光谱有着明显的边带滤波效果，且其输出消光比可达到 25.7 dB[44]。另外，通过对该滤波器进行温控，该锁模激光的工作波长可以在 1545-1565 nm 之间调谐。2013 年，利用 45 度倾斜光纤光栅实现了宽带可调的偏振干涉滤波器，由于保偏光纤双折射受到温度影响，通过对滤波器进行温度控制可实现其宽带范围内调谐[45]。对于 18 cm 和 40 cm 的两种腔长其温度灵敏度分别可达到 0.616 nm/°C 和 0.31 nm/°C，比传统光纤布拉格光栅的温度灵敏度高了 2 个量级，在温度传感中有着潜在应用前景。

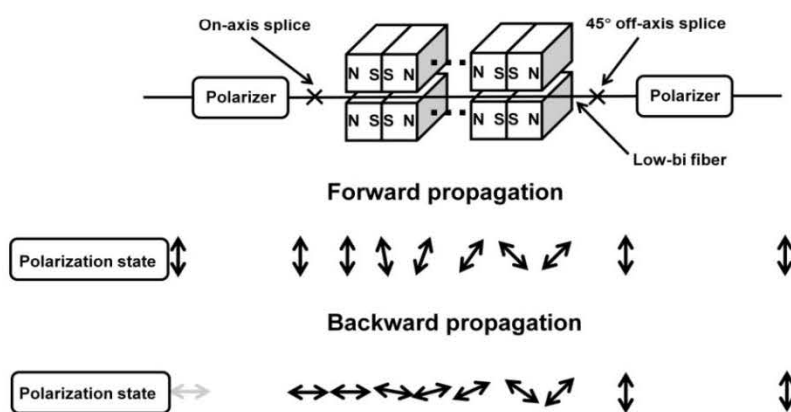


图 1.11 基于 45 度倾斜光纤光栅的全光纤高功率隔离器[43]

Figure 1.11 All fiber high power isolator based on 45 degree tilted fiber grating [43]

此外，当光通过 45 度倾斜光纤光栅时，p 偏振分量无损耗通过，而 s 偏振

分离被耦合出光纤纤芯成为辐射模，并且不同波长入射光拥有不同的辐射角。因此利用这一特点，45 度倾斜光纤光栅可以作为理想的全光纤衍射光栅。利用衍射光栅的原理，英国阿斯顿大学光电子技术研究中心周凯明等人首次利用 45 度倾斜光纤光栅实现了全光纤的光谱仪[46]。如图 1.12 所示，光从 45 度倾斜光纤光栅侧面耦合出来之后经过透镜聚焦在线性 CCD 阵列上。该光谱仪的光谱范围为 1430-1700 nm，分辨率为 0.13 nm/pixel，其分辨率取决于 CCD 阵列与光栅距离、CCD 阵列的像素尺寸以及聚焦光斑的大小，通过增加光纤光栅和探测器的距离可以进一步提升该分辨率。此外，基于 45 度倾斜光纤光栅的全光纤衍射光栅，光场分布取决于光栅长度，光场强度沿着光栅长度成指数衰减[47]。2014 年，瑞士伯尔尼应用科学大学以及英国班戈大学首次利用 800 nm 波段 45 度倾斜光纤光栅实现全光纤的频域光学相干断层扫描系统[48]。2015 年，义守大学及逢甲大学对 45 度倾斜光纤光栅的辐射特性开展了研究，并表明 45 度倾斜光纤光栅的辐射为锐利散射[49]。2017 年，华中科技大学理论分析了 45 度倾斜光纤光栅的辐射模的角色散，理论表明在 1550 nm 波段 748 nm 范围内其角色散大约为 0.053 °/nm[50]。目前，对于 45 度倾斜光纤光栅辐射模的研究相对较少，仍需进一步的探索其机理并拓展相关应用。

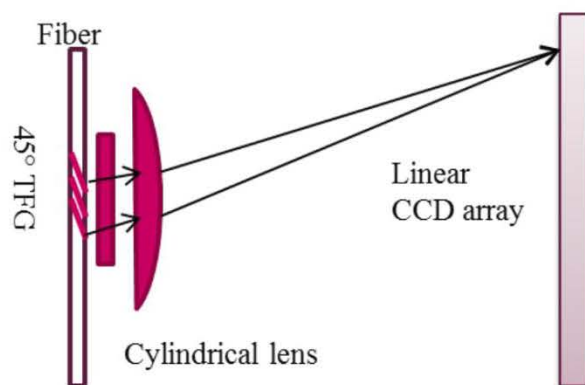


图 1.12 基于 45 度倾斜光纤光栅的光谱仪示意[46]

Figure 1.12 Spectrometer based on 45 degree tilted fiber grating [46]

1.2.2 大角度倾斜光纤光栅研究进展

大角度倾斜光纤光栅倾斜角一般大于 66.9 度，可实现前向包层模耦合，是理想的模式耦合器件，其透射谱中包含一系列偏振正交的双峰包层模。此外，相比于长周期光纤光栅，大角度倾斜光纤光栅具有较低的温度交叉灵敏度以及明

显的偏振特性。

2006年,英国阿斯顿大学的周凯明等人利用掩模板扫描方法制作了具有81.3度倾斜角的大角度倾斜光纤光栅[51],其透射光谱如图1.13所示,大角度倾斜光纤光栅可以将纤芯的基模耦合到包层模式,且由于偏振特性其透射谱具有明显的双谐振峰。图1.14表明该大角度倾斜光纤光栅具有较低的温度灵敏度,在1270 nm、1274 nm、1637 nm、1644 nm处的温度灵敏度分别为3.8 pm/°C、3.4 pm/°C、7.8 pm/°C以及7.5 pm/°C,比长周期光纤光栅的温度灵敏低了至少一个量级,也低于普通的光纤布拉格光栅(~10 pm/°C)。这种较低的温度响应主要是因为大角度倾斜光纤光栅沿光纤轴向的周期较小,对于81度倾斜光纤光栅其沿光纤轴向的周期为28 μm,远低于长周期光纤光栅的周期(典型值为300-500 μm)。同年,该课题组测试了大角度倾斜光纤光栅的应力及折射率传感特性。81度倾斜光纤光栅在1680 nm处的应力灵敏度为1.8 pm/με。另外当大角度倾斜光纤光栅周围折射率从1.3变为1.4时,在1200 nm的耦合峰波长漂移15 nm,在1700 nm的耦合峰波长漂移30 nm。对于1.33折射率,大角度倾斜光纤光栅的1700 nm耦合峰折射率灵敏度高达340 nm/RIU,比传统长周期光纤光栅的折射率灵敏度提高了约6倍,这是由于大角度倾斜光纤光栅将光纤的基模耦合到高阶的包层模,其倏逝场的比例更大,模式特性更容易受到外界环境的影响[52]。2006年,英国阿斯顿大学的陈险峰等人的研究表明大角度倾斜光纤光栅可以测量扭动的幅度和方向。在实验中,81度倾斜光纤光栅对于±60度的扭动有着14.3 W/(rad/m)的灵敏度[53]。2009年,英国阿斯顿大学又利用大角度倾斜光纤光栅实现了横向负载的传感[54]。实验表明基于大角度倾斜光纤光栅的光纤矢量传感器不仅可以测量横向负载的强度还可以分辨其方向,可以测到的最小负载为 1.6×10^{-2} g。2017年,重庆理工大学罗彬彬等人利用大角度倾斜光纤光栅实现了人类心脏衰竭生物标志物免疫传感器,可以高度分辨并快速探测氨基酸末端脑钠素前体[55]。2018年,西北工业大学姜碧强等人将大角度倾斜光纤光栅涂以氧化葡萄糖酶实现了葡萄糖浓度的精准测量[56]。这种酶可以将葡萄糖分解,从而改变光纤表面环境的折射率,从而达到测量的目的。另外,通过在大角度倾斜光纤光栅表面附着氧化石墨烯,实现了较高的表面体积比和优异的生物兼容性,可以大容量地吸附氧化葡萄糖酶。在人体的葡萄糖浓度范围内(0-8 mM)灵敏度达到了1.33 nm/mg/ml,高于传统的基于高折射率缓冲液光纤传感(0.8 nm/mg/ml)。

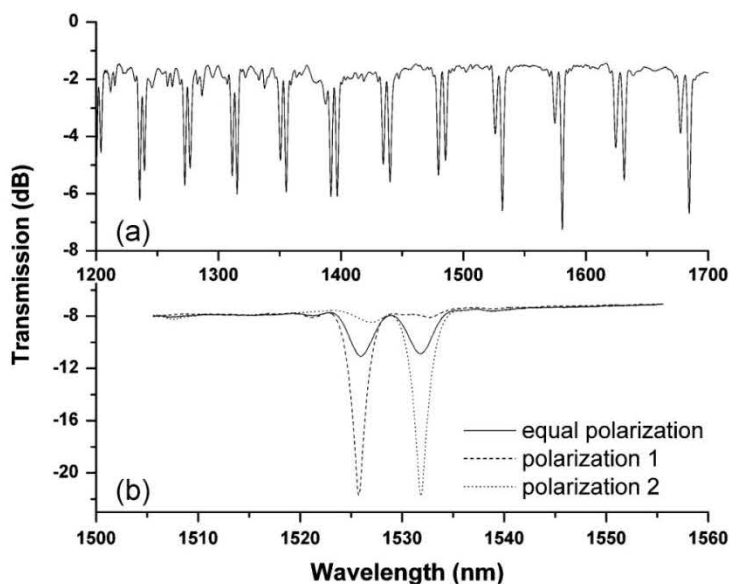


图 1.13 81 度倾斜光纤光栅的透射光谱[51]

Figure 1.13 Transmission spectra of 81 degree tilted fiber grating [51]

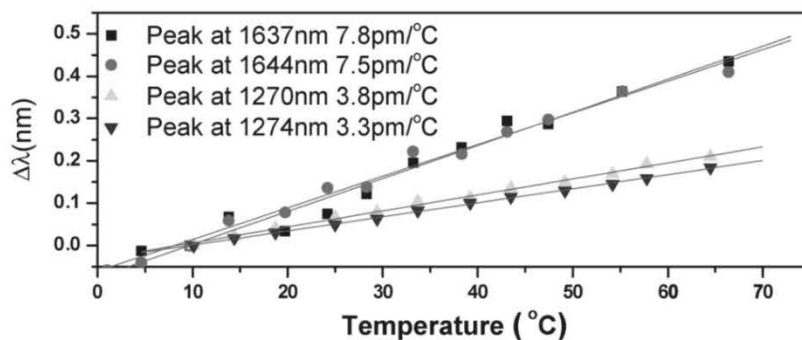


图 1.14 81 度倾斜光纤光栅的温度响应特性[51]

Figure 1.14 Wavelength shift versus temperature of 81 degree tilted fiber grating [51]

随后,为了进一步提升大角度倾斜光纤光栅的传感特性,科研工作者展开了大量的研究。2015年,英国阿斯顿大学及中科院西安光学精密机械研究所的闫志君等人在单根光纤里连续刻写了81度倾斜光纤光栅和45度倾斜光纤光栅,并利用其实现了折射率及液位传感器[57]。折射率传感器有着较低的温度交叉灵敏度(7.33 pm/°C),在1.345折射率的灵敏度为180 nm/RIU,在1.412折射率的灵敏度为926 nm/RIU。液位传感器则展现了3.06 dB/mm的线性灵敏度。同年,他们又在62.5 μm薄包层光纤中制作了大角度倾斜光纤光栅,极大地提升了大角度倾斜光纤光栅的折射率灵敏度,在1.345折射率处的灵敏度最高可达1180 nm/RIU[58]。通过对大角度光纤光栅进行特殊高折射率材料涂覆可以增强其包层

模进而提升传播光同周围介质的作用。2016年,英国阿斯顿大学的 Abdulyezir A. Badmos 等人通过对大角度倾斜光纤光栅涂覆碳纳米管材料,实现了 1.344-1.374 折射率处最高 241.79 nm/RIU 的灵敏度[59]。2016年,西北工业大学姜碧强等人研究了石墨烯对于大角度倾斜光纤光栅偏振调制特性的影响,通过将石墨烯涂在大角度倾斜光纤光栅表面实现 TE 包层模更强的吸收以及 TM 包层模更多的波长漂移,如图 1.15 所示[60]。2017年,华中科技大学研究了大角度倾斜光纤光栅耦合模式阶次对于温度和折射率灵敏度的影响[61]。研究表明,越高的包层模式对应的温度灵敏度越低,在 1550 nm 波长处,28、31、35、40 阶包层模的温度灵敏度分别为 9 pm/°C、6.8 pm/°C、5.6 pm/°C 和 4 pm/°C。通过选择有效折射率同探测介质折射率接近的包层模可以有效提升折射率灵敏度。大角度倾斜光纤光栅 28、31、35、43 阶包层模的折射率灵敏度分别为 2250 nm/RIU @1.408、864 nm/RIU @1.395、1536 nm/RIU @1.380 以及 1360 nm/RIU @1.355。2018年,重庆理工大学罗彬彬等人通过对大角度倾斜光纤光栅的包层进行腐蚀提升了其折射率灵敏度,在该报道中,利用化学腐蚀方法将光纤光栅的包层从 125 μm 减少至 15 μm ,相比于传统的大角度倾斜光纤光栅在 1.33 折射率处的灵敏度提升了 6 倍左右[62]。同年,温州大学理论研究了光纤尺寸对于大角度倾斜光纤光栅折射率灵敏度的影响,同样通过腐蚀的方法,其折射率灵敏度最高可达到 12182.9 nm/RIU[63]。



图 1.15 大角度倾斜光纤光栅和石墨烯的混合波导模型[60]

Figure 1.15 Schematic model of excessively titled fiber grating to graphene hybrid wave-guide [60]

从模式耦合角度看,大角度倾斜光纤光栅本质上是一种小周期的长周期光纤光栅,因此在周期合适的条件下长周期光栅可以产生和大角度光纤光栅类同的光谱和光学特性。华中科技大学、英国阿斯顿大学以及中国科学院西安光学精密机械研究所的研究表明,具有小周期的长周期光纤光栅展现了类似于大角度倾斜光纤光栅的透射光谱特性。在小折射率范围内(1.315-1.395),25 μm 周期的长周

期光纤光栅的灵敏度达 312.5 nm/RIU，是普通长周期光纤光栅在同样范围内的 10 倍[64]。在 1.3328-1.3544 折射率范围内，15 μm 周期的长周期光纤光栅具有 505 nm/RIU 的灵敏度[65]。

另外，大角度倾斜光纤光栅由于其独特的透射谱、偏振特性、以及模式耦合特性，在光纤激光应用方面也有着一定的应用。2009 年，英国阿斯顿大学的牟成博等人利用 77 度倾斜光纤光栅作为偏振相关滤波器实现了单波长及双波长的激光运转，信噪比高达 60 dB，边模抑制比大于 50 dB[66]。2015 年，南京邮电大学张祖兴利用大角度倾斜光纤光栅的偏振特性实现了可调谐的双波长调 Q 和锁模光纤激光器[67]。实验中采用 78 度倾斜光纤光栅，在 1200-1700 nm 范围内展现了典型的双峰透射谱。获得的调 Q 激光输出为单波长，可在 1554.9 nm 和 1561 nm 两个波长处切换。锁模激光展现了双波长特性，中心波长在 1554.8 nm 和 1560.9 nm，并分别具有 0.65 nm 和 0.43 nm 的带宽。2016 年，南京邮电大学和英国阿斯顿大学在基于大角度倾斜光纤光栅的锁模光纤激光其中观察到了正交偏振的亮孤子和暗孤子，并指出该现象是由于具有两个正交偏振态的光和双波长非线性耦合形成的[68]。目前，大角度倾斜光纤光栅主要应用在光纤传感中，在光纤激光技术中的应用仍有较大的研究空间。

1.2.3 耐高温光纤光栅研究进展

为了实现耐高温的光纤光栅，科研工作者们从光纤材料、光纤光栅形成机理、刻写光源等多个方面开展研究，实现了多种类型的可承受高温的光纤光栅，主要包括：Ia 型光纤光栅、II 型光纤光栅、再生光纤光栅以及 IIa 型光纤光栅。

2002 年，英国阿斯顿大学的 Y. Liu 等人研究了在载氢光纤上制作的光纤光栅光谱演化过程[69]。随着对载氢光纤进行不断的曝光，光纤光栅的强度先是迅速增加，在达到饱和之后光纤光栅的强度反而逐渐降低，在该谐振峰不断降低至光纤光栅接近完全擦除后会在长波方向再生一个谐振峰，且光纤光栅的强度缓慢增强。这种光纤光栅被称为 Ia 型光纤光栅，在其制作过程中光栅的谐振波长存在明显的红移（可大于 10 nm），这种光纤光栅的平均折射率变化可以达到 10^{-2} 量级，可以承受 500 $^{\circ}\text{C}$ 左右的高温。同年，英国阿斯顿大学的舒学文等人研究载氢和非载氢光纤光栅的应力和温度响应，尽管应力灵敏度接近，温度灵敏度差别较大，且 Ia 类光纤光栅具有最低的温度灵敏度[70]。2005 年，悉尼大学的 J.

Canning 等人研究了紫外光对于载氢光纤引入的双折射效应[71]。2008 年, 悉尼大学的 J. Canning 等人系统研究了 Ia 型光纤光栅, 在掺 GeO₂ 光纤中制作的 Ia 型光纤光栅可承受 500℃ 高温[72]。

IIa 型光纤光栅具有负折射率变化, 也是一种曝光过量的再生光纤光栅。这种光纤光栅的形成过程类似于 Ia 型光纤光栅, 其区别在于 IIa 型光纤光栅需要在非载氢光纤上制作, 且在其制作过程中存在的是波长蓝移。为制作 IIa 型光纤光栅一般采用纤芯较小、光敏性较高、存在轴向应力的光纤。1996 年, 英国南安普顿大学的 L. Dong 等人利用 193 nm 准分子激光器实现了负折射率光纤光栅[73]。1997 年, 英国原子能科学研究所 Isabelle Riant 等人研究了不同掺锗及不同载氢程度的光纤在 193 nm 和 240 nm 的光敏性, 并验证了 IIa 型光纤光栅产生的条件[74]。2004 年, 悉尼大学的 Nathaniel Groothoff 等人制作的 IIa 型光纤光栅可承受 800℃ 高温[75]。2009 年, 希腊电子结构与激光研究所在高非线性微结构光纤上制作了 IIa 型光纤光栅, 其耦合强度在 700℃ 时降至一半, 在 800℃ 时光栅被擦除[76]。2014 年, Om Prakash 等人利用 255 nm 的光源制作了可在 800℃ 稳定的 IIa 型光纤光栅[77]。2015 年, 暨南大学的关柏鸥等人在 3.5 μm、6.5 μm、8.5 μm 芯径的光纤上制作了可承受 800℃ 高温的 IIa 型光纤光栅, 并指出通过减少纤芯直径可以加速 IIa 型光纤光栅的形成[78]。

再生光纤光栅是对 I 型光纤光栅进行 500℃ 以上的高温退火再生形成的, 高温引起玻璃的软化并通过应力释放使得玻璃结构致密化, 形成永久性折射率变化。2002 年, M. Fokine 等人发现了这种现象, 并利用 1000℃ 的高温退火处理制作了可承受 1000℃ 的再生光纤光栅[79]。2008 年, 悉尼大学的 J. Canning 等人提出了应力松弛理论模型解释再生光纤光栅的形成机理, 并认为纤芯中受紫外光曝光区域和非曝光区域在高温下内部应力不同导致光纤内形成周期性调制[80]。利用 193 nm 激光和二次退火工艺在硼锗共掺的光纤上制作的再生光纤光栅可承受 1000℃ 高温。但这种再生光纤光栅一般反射率较低、光谱较差。2009 年, 德国耶拿光子技术研究所 Eric Lindner 等人首次在非载氢的高掺锗光敏光纤上制作了再生光纤光栅, 该光栅在 550℃ 具有良好的反射光谱特性[81]。2011 年, 悉尼大学的 J. Canning 等人将再生光纤光栅的反射率提升至 35%[82]。同年, 匹兹堡大学的 Tong Chen 等人利用 800℃ 退火在具有双孔结构的光纤上制作了再生光纤光栅[83]。2013 年, 北京交通大学和悉尼大学的 Tao Wang 等人研究了再生光纤光

栅的温度和应力特性[84]。

II型光纤光栅是通过增加刻写激光的脉冲能量至超过玻璃承受阈值,导致光纤永久性的物理结构破坏而写成的光纤光栅。物理结构的破坏使得光纤全部应力得到释放,因而这种光纤光栅可以承受 1000℃ 的高温。1992年,美国海军科学研究实验所的 C. G. Askins 等人利用 20ns 脉宽的 KrF 准分子激光首次制作了 II 型光纤光栅,反射率仅为 2%[85]。2003年,加拿大通信研究中心的 Stephen J. Mihailov 等人利用 120 fs、800 nm 激光和相位掩模板制作了光纤布拉格光栅,在 300℃ 下没有被擦除[86]。2007年,悉尼大学利用 800 nm 钛蓝宝石飞秒激光制作了一种类似于 II 型光纤光栅的光栅[87, 88]。这些研究推进了 II 型光纤光栅飞秒刻写技术。2013年,香港理工大学的 C.R. Liao 等人的评论文章中介绍了在石英光纤中制作的 II 型光纤光栅可承受 1200℃ 高温,在蓝宝石光纤中制作的 II 型光纤光栅可承受 1745℃ 高温[89]。

此外,利用这种耐高温光纤光栅作为腔镜可以实现耐高温分布式布拉格反射 (Distributed Bragg Reflector, DBR) 激光器,实现主动式传感系统,并具有更高的灵敏度、波长分辨率以及精度。2006年,英国阿斯顿大学的 Y. Lai 等人利用 II 型光纤光栅制作了 DBR 激光,并可以承受 600℃ [90]。2008年,大连理工大学在 Er/Yb 共掺的光纤上直接刻写了一对高度饱和的光纤布拉格光栅实现 DBR 激光,并可以承受 500℃ 高温[91]。2013年,匹兹堡大学的 Rongzhang Chen 等人在 15 cm 长的掺铒光纤两端熔接了一对再生光纤光栅实现了 DBR 激光器,激光输出功率可达到 1 mW 且在 750℃ 下的功率浮动只有 1.06% [92]。2015年,暨南大学的关柏鸥等人利用 IIa 型光纤光栅实现了超短腔 DBR 激光器,其腔长只有 13 mm,在 600 摄氏度的温度灵敏度为 12.03 pm/°C [93]。

1.3 研究意义及研究内容

光纤光栅可实现滤波、起偏、模式耦合、温度/应力/折射率等传感、反射、色散管理等多种功能。作为一种关键、核心器件,光纤光栅对于光纤激光、光纤通信、光纤传感等领域具有重要支撑作用。然而随着科技的迅速发展,普通的光纤光栅种类有限功能单一,已逐渐制约了相关应用领域的发展,对于特种光纤光栅的研制已有着十分迫切的需求。然而由于特种光纤光栅具有特殊的结构、光纤、参数及应用环境,其制作难度相对较大、特性较为复杂。此外,现有的特种光纤

光栅仍具有很大的应用潜力,有必要进一步研究并探索其在更多光纤激光器及光纤传感系统中的应用。因此,开展特种光纤光栅研制、特性及应用研究具有重要的科研价值。

围绕这个研究方向,本文在国内外研究基础上,深入开展了多种特种光纤光栅的研制,理论分析了其特性并拓展了相关应用。具体研究内容如下:

第一章:介绍了特种光纤光栅的研究背景、意义以及国内外研究进展。

第二章:介绍光纤光栅的耦合模理论,包括光纤布拉格光栅耦合模理论、倾斜光纤光栅耦合模理论以及倾斜光纤光栅全矢量复耦合模理论。

第三章:研究特种光纤光栅的制作方法并搭建两套光纤光栅刻写系统,研制了多种特种光纤光栅。

第四章:研究了 45 度倾斜光纤光栅的偏振机理及特性,开展了基于 45 度倾斜光纤光栅的全光纤偏振干涉滤波器、多波长光纤激光器以及单偏振双波长光纤激光器的研究。

第五章:开展大角度倾斜光纤光栅的特性研究,利用大角度倾斜光纤光栅的模式耦合特性设计一种可饱和吸收体结构并实现了锁模激光输出。

第六章:在增益光纤上实现了可以承受 500℃ 高温的光纤光栅,利用这种光纤光栅实现了耐高温超短腔光纤激光器并开展其高温特性研究。

第2章 光纤光栅耦合模理论

耦合模理论是一种直接、有效、精准的分析光纤光栅模式耦合的方法，除了可以用于分析传统光纤布拉格光栅、啁啾光纤光栅以及长周期光纤光栅的衍射效率和光谱特性之外，还可用来研究倾斜光纤光栅的特性。具体的耦合模理论可在文献[94]和[95]中查阅，更多的耦合模理论研究可参阅文献[96-99]。

2.1 光纤光栅的基本耦合模理论

根据 Erdogand 的工作[100]，在光纤光栅制作过程中，紫外光曝光引入的导模有效折射率 n_{eff} 的变化可以表示为：

$$\delta n_{\text{eff}} = \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad \dots(2.1)$$

式中， $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 是直流“dc”有效折射率变化（一个光栅周期内平均折射率变化）， v 是折射率调制条纹可见度， Λ 是光纤光栅的周期， $\phi(z)$ 为光纤光栅的啁啾。当光纤具有阶跃折射率剖面且纤芯受到均匀曝光产生折射率变化 $\delta n_{\text{co}}(Z)$ 时， $\delta n_{\text{eff}} \cong \Gamma \delta n_{\text{co}}$ ，其中 Γ 是某一模式在纤芯的限制因子。归一化频率 V 为：

$$V = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) a \sqrt{(n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2)} \quad \dots(2.2)$$

其中， a 为纤芯半径， λ 为波长， n_{co} 为光纤纤芯折射率， n_{cl} 是光纤包层折射率。

归一化有效折射率 b 为：

$$b = (n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{cl}}^2) / (n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2) \quad \dots(2.3)$$

对于 $\text{LP}_{l\mu}$ 模式：

$$V \sqrt{1-b} \frac{J_{l-1}(V \sqrt{1-b})}{J_l(V \sqrt{1-b})} = (n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{cl}}^2) / (n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2) \quad \dots(2.4)$$

限制因子 Γ 可由 V 、 b 表示为：

$$\Gamma = \frac{b^2}{V^2} \left[1 - \frac{J_l^2(V \sqrt{1-b})}{J_{l+1}(V \sqrt{1-b}) J_{l-1}(V \sqrt{1-b})} \right] \quad \dots(2.5)$$

式中， l 为模式的周向阶数， J 为第一类贝塞尔函数（Bessel function）。图 2.1 为单模阶跃光纤传输基模 LP_{01} 模有效折射率 b 和限制因子 Γ 同归一化频率 V 的关系，当归一化频率 $V < 2.4$ 时，限制因子 Γ 为 0.8，模式归一化有效折射率 b 约为 0.5。

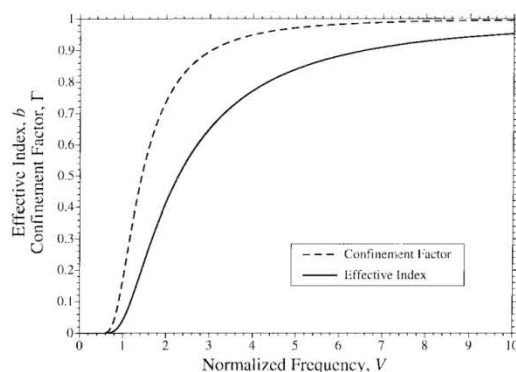


图 2.1 阶跃光纤 LP_{01} 模有效折射率 b 和限制因子 Γ 同归一化频率 V 的关系[100]

Figure 2.1 Effective index parameter b and core confinement factor Γ versus normalized frequency V for the LP_{01} mode of a step index fiber [100]

光纤光栅的光学特性本质上由随光纤轴向 z 的有效折射率变化 δn_{eff} 决定的。图 2.2 展示了几种常见光纤光栅折射率变化，具体为：(a) 具有正折射率变化的均匀的光纤光栅，(b) 高斯型切趾的光纤光栅，(c) 升余弦切趾光纤光栅，(d) 啁啾光纤光栅，(e) π 相移光纤光栅，(f) 超结构光纤光栅。

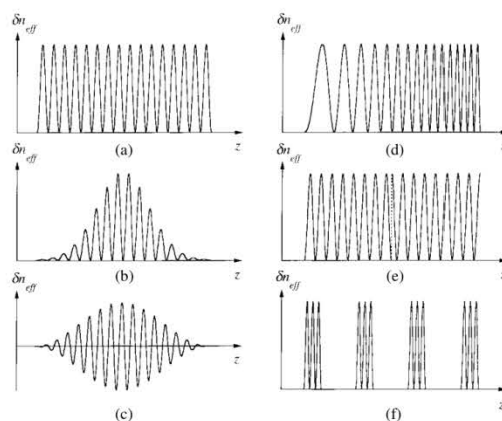


图 2.2 几种常见的光纤光栅折射率在光纤轴向上的变化[100]

Figure 2.2 Common types of fiber gratings as classified by variation of the induced index change along the fiber axis [100]

在耦合模理想模式近似条件下，将光纤光栅的横向电场分解为理想模式（下标为 j ）的和，这些模式可以通过求解无微扰的理想波导得到，

$$\vec{E}_t(x, y, z, t) = \sum_j [A_j(z) \exp(i\beta_j z) + B_j(z) \exp(-i\beta_j z)] \cdot \vec{e}_j(x, y) \exp(-i\omega t) \quad \dots (2.6)$$

式中， $A_j(z)$ 和 $B_j(z)$ 分别表示第 j 阶模场沿光纤轴向 z 的正向及反向缓慢变化的幅度。传输常数 β 为

$$\beta = (2\pi / \lambda) n_{eff} \quad \dots (2.7)$$

横向模场 $\vec{e}_j(x, y)$ 可以表示纤芯、包层或 LP 辐射模。在理想波导中模式是正交的，因此没有能量交换，光纤光栅中周期性介电微扰导致了模式耦合，第 j 阶的 $A_j(z)$ 和 $B_j(z)$ 沿 z 轴的演化为

$$\frac{dA_j}{dz} = i \sum_k A_k (C_{kj}^t + C_{kj}^z) \exp[i(\beta_k - \beta_j)z] + i \sum_k B_k (C_{kj}^t - C_{kj}^z) \exp[-i(\beta_k + \beta_j)z] \quad \dots (2.8)$$

$$\frac{dB_j}{dz} = -i \sum_k A_k (C_{kj}^t - C_{kj}^z) \exp[i(\beta_k + \beta_j)z] - i \sum_k B_k (C_{kj}^t + C_{kj}^z) \exp[-i(\beta_k - \beta_j)z] \quad \dots (2.9)$$

$C_{kj}^t(z)$ 是第 j 阶和 k 阶模式间横向耦合系数，可表示为

$$C_{kj}^t(z) = \frac{\omega}{4} \iint_{\infty} dx dy \Delta \varepsilon(x, y, z) \vec{e}_{kt}(x, y) \cdot \vec{e}_j^*(x, y) \quad \dots (2.10)$$

式中， $\Delta \varepsilon(x, y, z)$ 是介电微扰，当折射率变化远低于折射率时，约等于 $2n\delta n$ 。纵向耦合系数同横向耦合系数的定义相同，但由于纵向耦合系数远低于横向耦合系数，通常可以被忽略。

对于大多数光纤光栅，紫外光照射引入的折射率变化 $\delta n(x, y, z)$ 在纤芯是近似均匀的，而在纤芯外则不存在。因此，用 $\overline{\delta n_{co}}(z)$ 代替 $\overline{\delta n_{eff}}(z)$ ，纤芯折射率可以用类似公式 2.1 的方法描述。另外，自耦合系数可表示为

$$\sigma_{kj}(z) = \frac{\omega n_{co}}{2} \overline{\delta n_{co}}(z) \iint_{core} dx dy \vec{e}_{kt}(x, y) \cdot \vec{e}_j^*(x, y) \quad \dots (2.11)$$

交叉耦合系数可表示为

$$\kappa_{kj}(z) = \frac{1}{2} \sigma_{kj}(z) \quad \dots (2.12)$$

式中， σ 是直流“dc”耦合系数， κ 是交流“ac”耦合系数。总的耦合系数可表

示为

$$C_{kj}^t(z) = \sigma_{kj}(z) + 2\kappa_{kj}(z) \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \phi(z)\right] \quad \dots(2.13)$$

公式 2.8 至 2.13 是可分析光纤光栅光谱的耦合模公式。

2.2 光纤布拉格光栅耦合模理论[100]

光纤布拉格光栅的模式为反向模式耦合，对式 2.8 和式 2.9 简化可得

$$\frac{dY}{dz} = i\hat{\sigma}Y(z) + i\kappa S(z) \quad \dots(2.14)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) - i\kappa^*Y(z) \quad \dots(2.15)$$

式中，

$$Y(z) \equiv A(z) \exp(i\delta z - \phi/2) \quad \dots(2.16)$$

$$S(z) \equiv B(z) \exp(-i\delta z + \phi/2) \quad \dots(2.17)$$

$\hat{\sigma}$ 为直流耦合系数，定义为

$$\hat{\sigma} \equiv \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz} \quad \dots(2.18)$$

其中， δ 为模式之间的失谐量，与 z 没有关系，定义为

$$\delta \equiv \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = \beta - \beta_D = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right) \quad \dots(2.19)$$

式中， $\lambda_D \equiv 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 为光纤光栅的设计波长，为有效折射率调制接近 0 的弱光栅谐振波长。

对于单模光纤布拉格光栅，可以将直流、交流耦合系数简化为

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff}}} \quad \dots(2.20)$$

$$\kappa = \kappa^* = \frac{\pi}{\lambda} \overline{\nu \delta n_{\text{eff}}} \quad \dots(2.21)$$

如果光纤光栅沿轴向 z 是均匀的， $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 是常数且 $d\phi/dz = 0$ ，因此 κ 、 σ 、 $\hat{\sigma}$ 均为常数，式 2.14 和式 2.15 可以简化为全部常数因子一阶模式耦合的普通差分方程，当边界条件已知时，可以得到差分方程的闭合解。假设在 $z = -\infty$ 处有前向传输的光注入周期均匀的光纤布拉格光栅，光栅长度为 L ，且在 $z \geq L/2$ 时没有后向反射光。幅度 ρ 与能量的反射系数 $R = |\rho|^2$ 分别为

$$\rho = \frac{-\kappa \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L)}{\hat{\sigma} \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L) + i\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L)} \quad \dots(2.22)$$

$$R = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L)}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L) - \frac{\hat{\sigma}^2}{\kappa^2}} \quad \dots(2.23)$$

当 $\kappa L = 2$ 和 $\kappa L = 8$ 时，利用式 2.23 可以计算得出均匀光纤布拉格光栅的反射谱，如图 2.3 所示，图中横坐标归一化波长为

$$\frac{\lambda}{\lambda_{res}} = \frac{1}{1 + \frac{\hat{\sigma} L}{\pi N}} \quad \dots(2.24)$$

式中， $N = L/\Lambda$ ，为光纤光栅的周期总数，图中的 N 选取为 10000， λ_{res} 为谐振波长。对于固定长度的 κL ，随着 N 的增加光纤光栅的带宽将变窄，因此实验中可以通过增加光纤布拉格光栅的刻写长度实现更窄的带宽。

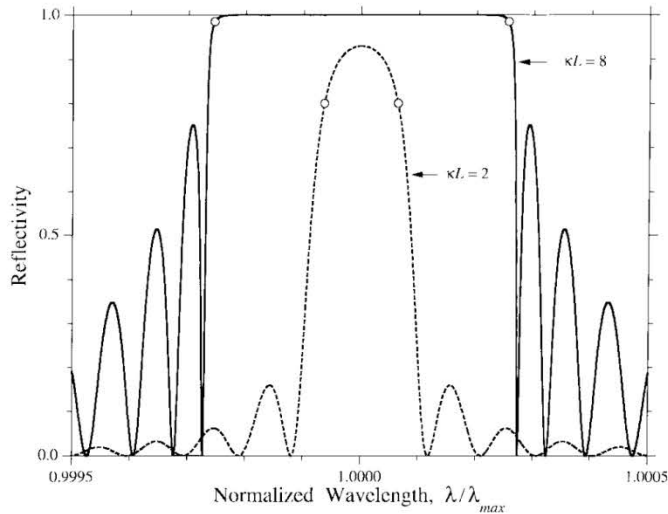


图 2.3 均匀光纤光栅的布拉格反射谱与归一化波长的关系[100]

Figure 2.3 Reflection spectra versus normalized wavelength for Bragg reflection in uniform fiber gratings [100]

根据式 2.23， $\hat{\sigma} = 0$ 时，即在谐振波长 λ_{res} 处，光纤布拉格光栅的具有最大反射率，为

$$R_{max} = \tanh^2(\kappa L) \quad \dots(2.25)$$

2.3 倾斜光纤光栅耦合模理论[100]

对于单模倾斜光纤光栅，栅区倾斜主要的影响是减少了公式 2.1、2.12 以及 2.13 中的折射率调制条纹可见度 v 。光栅的倾斜也会影响对辐射模的耦合。如图

2.4 所示，对于倾斜光纤光栅， z' 定义为

$$z' = x \sin \theta + z \cos \theta \quad \dots(2.26)$$

因此，沿 z 轴方向（光纤方向）的光栅周期决定了光纤光栅耦合谐振波长，该周期为

$$\Lambda = \Lambda_g / \cos \theta \quad \dots(2.27)$$

为了研究光纤光栅倾斜对于单模布拉格反射的影响，假设纤芯中的折射率变化随角度 θ 旋转，即

$$\delta n_{co}(x, z) = \overline{\delta n_{co}}(z') \left\{ 1 + \nu \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda_g} z' + \phi(z') \right] \right\} \quad \dots(2.28)$$

对于缓慢变化的 $\overline{\delta n_{co}}(z')$ 以及 $\phi(z')$ ， $z' \cong z \cos \theta$ 。

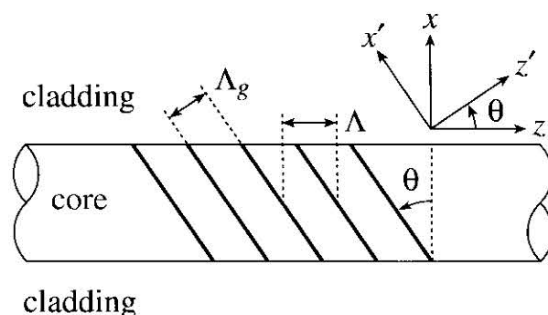


图 2.4 倾斜光纤光栅的结构图示[100]

Figure 2.4 Structure of tilted fiber gratings [100]

因此，除了当一个对应前向模 (+) 一个对应后向传输模 (-) 时，式 2.13 中的下标 j 和 k 描述同一个模，总的耦合系数变为

$$C_{\pm}^t(z) = \sigma(z) + 2\kappa_{\pm}(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z \cos \theta) \right] \quad \dots(2.29)$$

自耦合系数变为

$$\sigma(z) = \frac{\omega n_{co}}{2} \overline{\delta n_{co}}(z \cos \theta) \iint_{core} dx dy \dot{e}_{\pm}(x, y) \cdot e_{\pm}^*(x, y) \quad \dots(2.30)$$

交叉耦合系数变为

$$\kappa_{\mp}(z, \theta) = \frac{\nu \omega n_{co}}{2} \overline{\delta n_{co}}(z \cos \theta) \iint_{core} dx dy \cdot \exp(\pm i \frac{2\pi}{\Lambda} x \tan \theta) \dot{e}_{\mp}(x, y) \cdot e_{\pm}^*(x, y) \quad \dots(2.31)$$

注意到 $\kappa_{\pm} = (\kappa_{\mp})^*$ ，倾斜的作用可以归为有效调制条纹可见度 $\nu_{\pm}(\theta)$ ，其定义为

$$\frac{\nu_{\pm\pm}(\theta)}{\nu} = \frac{\iint_{\text{core}} dx dy \exp(\pm i \frac{2\pi}{\Lambda} x \tan \theta) \vec{e}_{\pm t}^-(x, y) \cdot \vec{e}_{\pm t}^*(x, y)}{\iint_{\text{core}} dx dy \vec{e}_{\pm t}^-(x, y) \cdot \vec{e}_{\pm t}^*(x, y)} \quad \dots(2.32)$$

因此，通过直接类比式 2.12，

$$\kappa_{\pm\pm}(z, \theta) = \frac{\nu_{\pm\pm}(\theta)}{2} \sigma(z) \quad \dots(2.33)$$

这个结果表明光栅倾斜对单模布拉格衍射的影响在于减少了一部分有效调制条纹可见度（式 2.32）。对于倾斜光纤光栅， $\kappa \equiv \kappa_{-+}$ ，其布拉格反射光谱可以通过式 2.14 和式 2.15 计算。图 2.5 是模拟的不同倾斜角度的高斯光栅的反射光谱，半高宽为 5nm，最大折射率改变为 7.25×10^{-4} ，没有倾斜时的条纹可见度为 1。

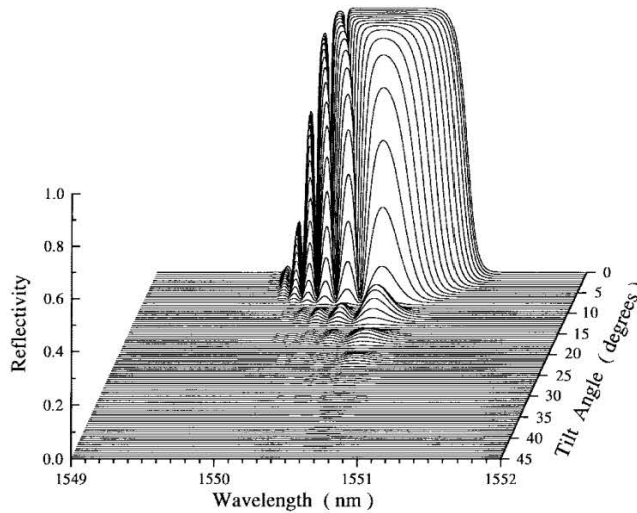


图 2.5 计算的高斯光栅不同倾斜角度的反射光谱[100]

Figure 2.5 Calculated reflectivity spectra over a range of grating tilt angles for a Gaussian grating [100]

2.4 倾斜光纤光栅全矢量复耦合模理论

传统的耦合模理论将波导的边界条件忽略，不适合具有极端倾斜角度的光纤光栅，且对于辐射模的分析是基于弱波导的近似。为适用于更复杂的情况，在耦合模理论的基础上，提出了全矢量复耦合模理论（Full vector complex coupled mode theory）[101]。

在倾斜光纤光栅中，由于栅区的倾斜会有偏振效应。用圆光纤中的全矢量模可以对 p 偏振模式和 s 偏振模式归类。m 阶 p 偏振模式的模场为

$$\begin{aligned} e_{rm} &= e_{rm}(r) \cos(\mu\varphi) \\ e_{\varphi m} &= e_{\varphi m}(r) \sin(\mu\varphi) \\ e_{zm} &= e_{zm}(r) \cos(\mu\varphi) \end{aligned} \quad \dots(2.34)$$

$$\begin{aligned} h_{rm} &= h_{rm}(r) \sin(\mu\varphi) \\ h_{\varphi m} &= h_{\varphi m}(r) \cos(\mu\varphi) \\ h_{zm} &= h_{zm}(r) \sin(\mu\varphi) \end{aligned} \quad \dots(2.35)$$

式中, $\mu=0,1,2\dots$ 是方位角阶次。m 阶 s 偏振模式的模场为

$$\begin{aligned} e_{rm} &= e_{rm}(r) \sin(\mu\varphi) \\ e_{\varphi m} &= -e_{\varphi m}(r) \cos(\mu\varphi) \\ e_{zm} &= e_{zm}(r) \sin(\mu\varphi) \end{aligned} \quad \dots(2.36)$$

$$\begin{aligned} h_{rm} &= -h_{rm}(r) \cos(\mu\varphi) \\ h_{\varphi m} &= h_{\varphi m}(r) \sin(\mu\varphi) \\ h_{zm} &= -h_{zm}(r) \cos(\mu\varphi) \end{aligned} \quad \dots(2.37)$$

用上标“p”分辨 p/s 偏振态,“+”表示 p 偏振模式,“-”表示 s 偏振模式。倾斜光纤光栅的横向模场可以用功率归一化的模式模场展开

$$E_t(\vec{r}_t, z) = \sum_{p=\pm} \sum_n [\alpha_n^p(z) + b_n^p(z)] \vec{e}_n^p(\vec{r}_t) \quad \dots(2.38)$$

$$H_t(\vec{r}_t, z) = \sum_{p=\pm} \sum_n [\alpha_n^p(z) - b_n^p(z)] \vec{h}_n^p(\vec{r}_t) \quad \dots(2.39)$$

将公式 2.38 和公式 2.39 带入麦克斯威尔方程组 (Maxwell's equations) 并利用模式的正交性 (即当 $m \neq n$ 或 $p \neq q$ 时, $\langle \vec{e}_{tm}^p, \vec{h}_{tn}^q \rangle = 0$), 可以得到 $\alpha_m^p(z)$ 的振幅方程

$$\frac{d\alpha_m^p}{dz} + j\beta_m^p \alpha_m^p = -j \sum_{p=\pm} \sum_n (\kappa_{mn}^{pq} \alpha_n^q + \sigma_{mn}^{pq} b_n^q) \quad \dots(2.40)$$

$$\frac{db_m^p}{dz} - j\beta_m^p b_m^p = +j \sum_{p=\pm} \sum_n (\kappa_{mn}^{pq} b_n^q + \sigma_{mn}^{pq} \alpha_n^q) \quad \dots(2.41)$$

耦合系数为

$$\kappa_{mn}^{pq} \approx \frac{\varepsilon_0 \omega}{2 \langle \vec{e}_{tm}^p, \vec{h}_{tm}^p \rangle} \iint \bar{n}(r) P(r) \Delta n(z') \cdot (\vec{e}_{tm}^p \cdot \vec{e}_{tn}^q + \vec{e}_{zm}^p \cdot \vec{e}_{zn}^q) dS \quad \dots(2.42)$$

$$\sigma_{mn}^{pq} \approx \frac{\varepsilon_0 \omega}{2 \langle \vec{e}_{tm}^p, \vec{h}_{tm}^p \rangle} \iint \bar{n}(r) P(r) \Delta n(z') \cdot (\vec{e}_{tm}^p \cdot \vec{e}_{tn}^q - \vec{e}_{zm}^p \cdot \vec{e}_{zn}^q) dS \quad \dots(2.43)$$

式中, $\bar{n}(r)$ 是光纤的折射率分布, 扰动区内 $P(r)=1$, 扰动区外 $P(r)=0$, $\Delta n(z')$ 是光纤纤芯的有效折射率变化。将式 2.34 及式 2.35 代入式 2.40 和式 2.41 即得到 p 偏振模式的耦合效率。

另外，倾斜光纤光栅的反射和透射系数为

$$R = \sum_{n=1}^N |b_n(-L/2) / a_1(-L/2)|^2 \quad \dots(2.44)$$

$$T = \sum_{n=1}^N |a_n(+L/2) / a_1(-L/2)|^2 \quad \dots(2.45)$$

式中， L 是光纤光栅的长度， N 是模式数。

根据该理论，可以模拟出倾斜光纤光栅的透射光谱演化。设定光纤纤芯半径为 $4.1 \mu\text{m}$ ，包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$ ，涂覆层半径 $75 \mu\text{m}$ ，包层折射率为 1.466 ， $(n_{co}^2 - n_{cl}^2) / (2n_{co}^2) = 0.36\%$ ，光栅周期为 $0.5278 \mu\text{m}$ 。图 2.6 是当包层折射率 n_{cl} 等于涂覆层折射率 n_s 时模拟的倾斜光纤光栅透射光谱。图 2.7 是当包层折射率 n_{cl} 大于涂覆层折射率 n_s 时倾斜光纤光栅的透射光谱。

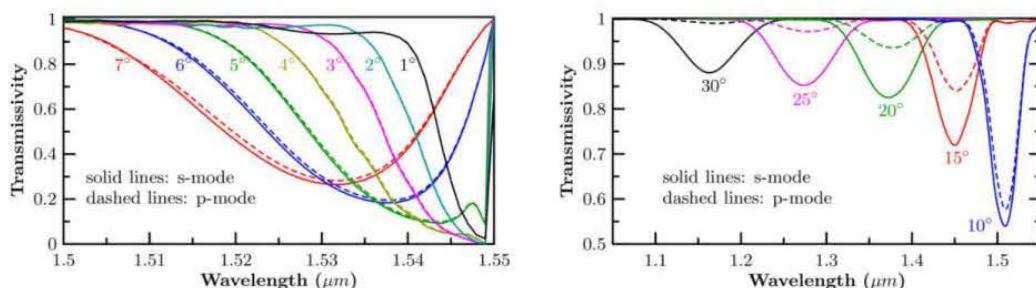


图 2.6 倾斜光纤光栅透射光谱随倾斜角度的变化 ($n_{cl} = n_s$) [101]

Figure 2.6 Transmission spectra evolution of tilted fiber gratings with the increase of tilt angle ($n_{cl} = n_s$) [101]

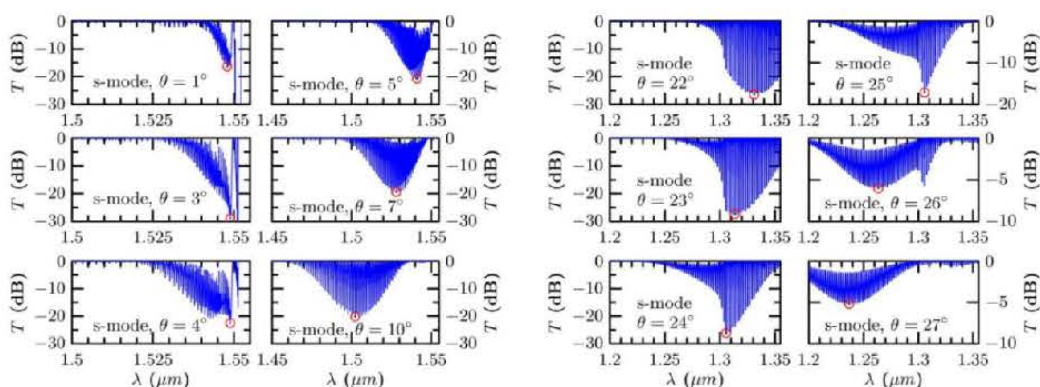


图 2.7 倾斜光纤光栅透射光谱随倾斜角度的变化 ($n_{cl} > n_s = 1$) [101]

Figure 2.7 Transmission spectra evolution of tilted fiber gratings with the increase of tilt angle ($n_{cl} > n_s = 1$) [101]

2.5 小结

耦合模理论分析光纤光栅模式耦合的有效方法，可以分析多种光纤光栅特性。本章首先介绍了光纤光栅的基本耦合模理论，给出了耦合系数的计算公式。随后介绍了均匀光纤布拉格光栅的耦合模理论，推导了光栅反射系数公式。另外，介绍了倾斜光纤光栅的耦合模理论，并在此基础上，进一步介绍了倾斜光纤光栅全矢量复耦合模理论，得到了倾斜光纤光栅的耦合系数以及反射透射系数。光纤光栅的耦合模理论对于光纤光栅的研究开展具有指导作用并提供了理论基础。

第3章 特种光纤光栅制作

目前, 光纤光栅的刻写方法主要有相位掩模法[103]、双光束全息相干法[104]、逐点写入法[105]、驻波法[106]。其中, 相位掩模刻写方法是光纤光栅制作主要采用的方法, 该技术对光源相干性要求较低, 根据掩模板特性可以制作光纤布拉格光栅、啁啾光纤光栅、倾斜光纤光栅等; 双光束全息相干法通过光路的角度调节可以实现多种光纤光栅周期, 不受掩模板周期限制, 可用于特殊波段光纤布拉格光栅的制作; 逐点写入法很适合制作周期超过 $10\ \mu\text{m}$ 的长周期光纤光栅; 驻波法是一种单光束内部写入法, 所制作的光纤光栅只能工作在刻写激光的波长附近, 因此该方法目前使用的较少。另外, 光纤光栅刻写所采用的光源一般为紫外激光或者飞秒激光。

在我们的工作中, 主要研制的特种光纤光栅有 45° 倾斜光纤光栅、大角度倾斜光纤光栅、耐高温 Ia 型再生光纤光栅等。本章首先介绍我们的光纤光栅刻写系统, 然后重点介绍 45° 倾斜光纤光栅以及大角度倾斜光纤光栅的制作原理及方法, 最后介绍我们设计的一种用于特殊波长光纤光栅制作的双光束干涉扫描刻写方法。

3.1 光纤光栅制作系统

3.1.1 光纤载氢系统

光纤的光敏性是指当光纤纤芯受到具有一定强度和特定波长的激光照射时, 折射率发生永久性变化, 是制作光纤光栅的必要条件。为制作高质量光纤光栅, 我们首先采用载氢的方法提升光纤光敏性, 其装置结构如图 3.1 所示。耐高压气罐用于注入氢气及存放需要载氢的光纤, 温度控制器可以控制气罐的温度以加速光纤载氢过程。另外, 由于氢气是易燃易爆气体, 为确保载氢的安全性, 设计了多个载氢系统安全装置: 1) 氮气注入口, 将气罐内的空气用惰性气体氮气排空, 避免氢气和氧气混合; 2) 气压缓冲装置, 减少高压气体注入气罐时的冲击; 3) 气压监测及泄压装置, 用于实时监测气罐内的气压, 当气压过高时自动进行泄压; 4) 氢气浓度监测报警及外部排风装置, 当载氢操作间氢气浓度超过标准时进行报警并自动排风; 5) 外部温度触发器, 对气罐温度进行实时监测, 当温度控制

器失灵导致持续加热进而气罐过高时，关闭外部电源并停止加热装置的工作。

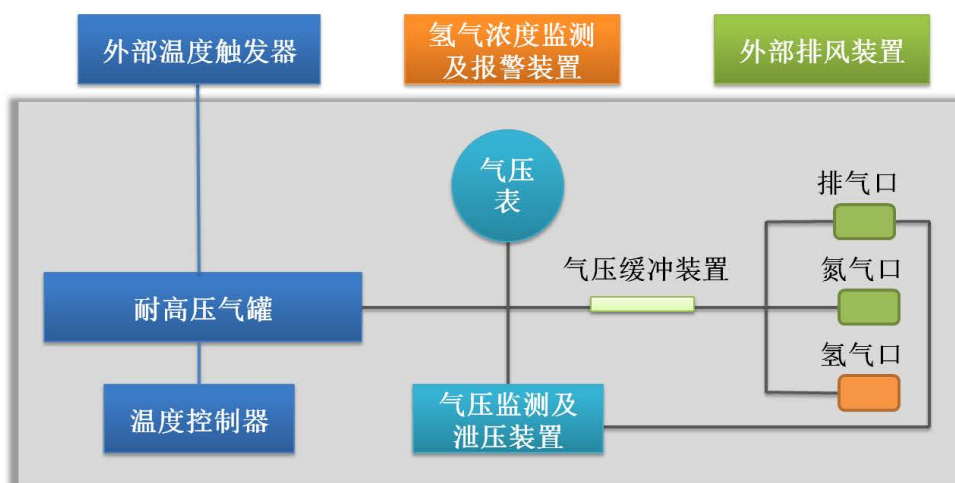


图 3.1 载氢系统结构图

Figure 3.1 Structure of hydrogen-loading system

在本实验中，载氢的基本参数为氢气气压 100-150 bar，载氢温度 76-80℃，载氢时间为 48-72 小时。载氢后的光纤应及时存放在低温保存箱中，以减少氢扩散出去。

3.1.2 光纤光栅刻写装置

本实验主要采用相位掩模法进行光纤光栅刻写。相位掩模技术如图 3.2 所示，垂直入射到掩模板的紫外光被衍射为多束光，掩模板的零级和高级衍射效率很低，能量主要集中在±1 级衍射光。两束 1 级衍射光在光纤纤芯处干涉并形成周期性强度条纹，光纤光栅的周期为相位掩模板的一半。

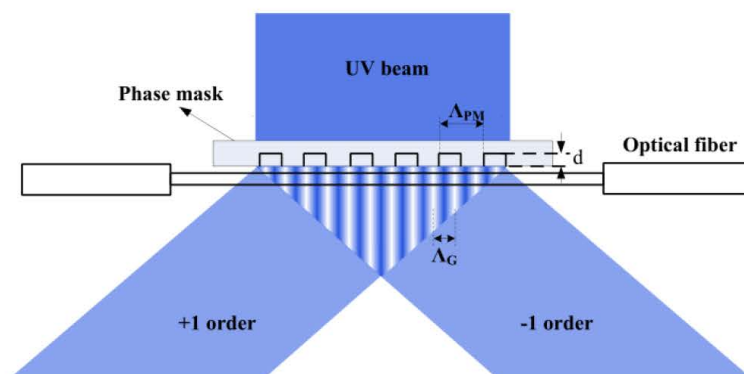


图 3.2 相位掩模法刻写光纤光栅原理

Figure 3.2 Principle of fiber grating fabrication based on phase mask method

具体的光纤光栅刻写系统结构如图 3.3 所示。刻写光源为氩离子连续光紫外激光器,其工作波长为 244 nm,输出功率最高可达 500 mW,输出光束直径 0.6-0.9 mm,光束发散度 0.5-0.85 mrad,这种紫外连续激光具有较好的相干性,同样适用于双光束全息相干法。由于激光光束较小,通过高精度平移台控制激光光束实现对相位掩模板的扫描,该平移台的最小位移增量为 0.02 μm ,精度为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$,最大速度为 1000 mm/s,行程范围 500 mm。激光快门或紫外声光调制器用于激光输出控制。反射镜为氩离子激光反射镜,聚焦透镜为紫外熔融石英柱透镜。相位掩模板置于光纤和聚焦透镜之间,并贴近光纤,其参数根据光纤光栅的参数选定。通过对光纤施加适当的应力,可在小范围内调节相位掩模法制作的光纤光栅波长,因此使用光纤应力计监测刻写光纤的应力可提高制作的光纤光栅重复性。此外,在光纤光栅制作过程中,激光的开关和扫描由编写的 Labview 程序自动控制。光纤光栅刻写装置的实物图如图 3.4 所示。

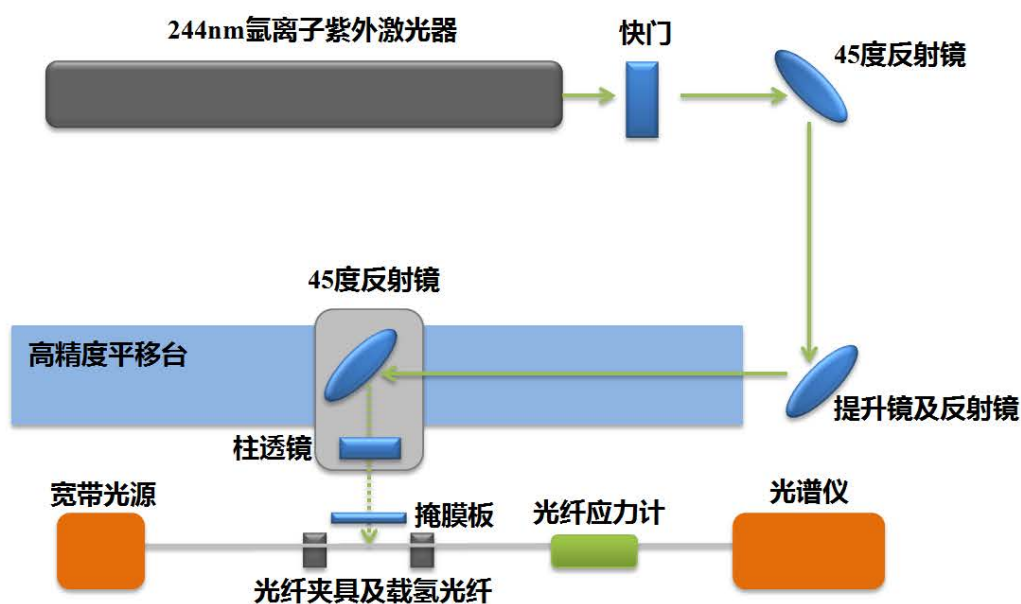


图 3.3 相位掩模扫描法光纤光栅制作系统结构图

Figure 3.3 Structure of fiber grating fabrication system based on phase mask scanning method

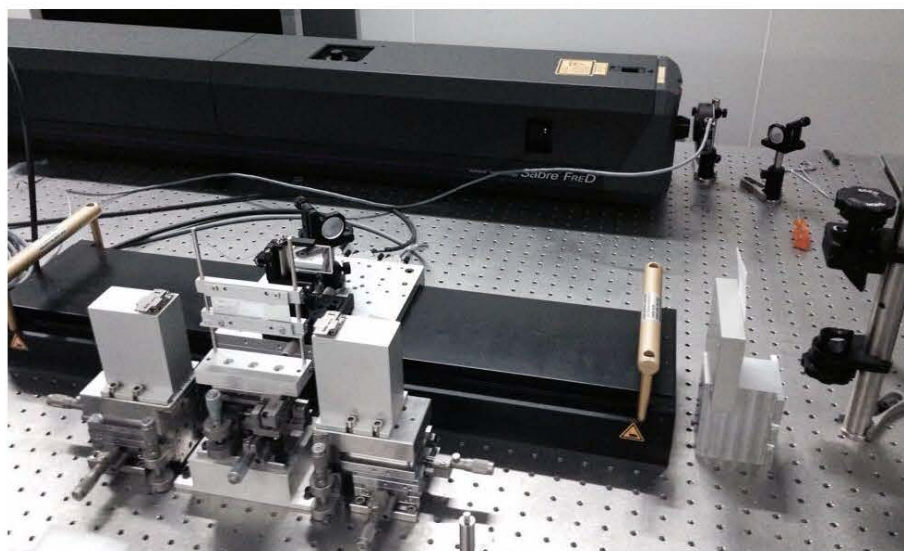


图 3.4 相位掩模法光纤光栅制作系统实物图

Figure 3.4 Photograph of fiber grating fabrication system based on phase mask method

这种通过紫外连续光源扫描相位掩模板制作光纤光栅的优点是：1) 激光光束较小且没有激光扩束，照射在光纤上的光功率密度较大易于实现纤芯折射率调制；2) 通过高精度平移台可以精确控制刻写光纤光栅的位置以及长度；3) 扫描的长度可以超过 100 mm，适合制作具有较长长度的光纤光栅，例如啁啾光纤光栅和 45 度倾斜光纤光栅；4) 通过扫描控制更容易在增益光纤上制作间距较近的光纤光栅对，形成超短腔光纤激光器；5) 通过调节平台移动的速度以及加速度可以实现刻写光纤光栅参数的变化，如光纤布拉格光栅反射强度；6) 将该装置中的相位掩模板去掉即可实现逐点写入法，可制作多种长周期光纤光栅。

本研究中，基于该相位掩模扫描刻写系统制作的光纤光栅示例：图 3.5 为采用这种相位掩模扫描刻写系统在单根光纤上制作的多段光纤布拉格光栅串透射光谱，8 个光纤光栅的长度为 10 mm 且等间距，光栅的中心波长间隔为 4.5 nm 且波长范围在 1526-1560 nm 之间，反射率大于 90%。图 3.6 为制作的 1650 nm 波段的宽带啁啾光纤光栅的透射光谱，其反射强度大于 20 dB，带宽大于 14 nm。图 3.7 为利用幅度掩模板制作的具有 25 μm 相对小周期的长周期光纤光栅透射谱。图 3.8 为利用逐点写入法在少量模光纤上制作的具有 846 μm 周期的长周期光纤光栅透射谱，在 1559 nm 处的耦合强度达到了 37 dB。图 3.9 为利用相位掩模板制作的具有约 15 nm 带宽、强度大于 20 dB 的 1 μm 波段啁啾光纤光栅透射谱。图 3.10 为在掺铒增益光纤上制作的光纤布拉格光栅，中心波长约为 1553.75 nm，

反射强度大于 20 dB。

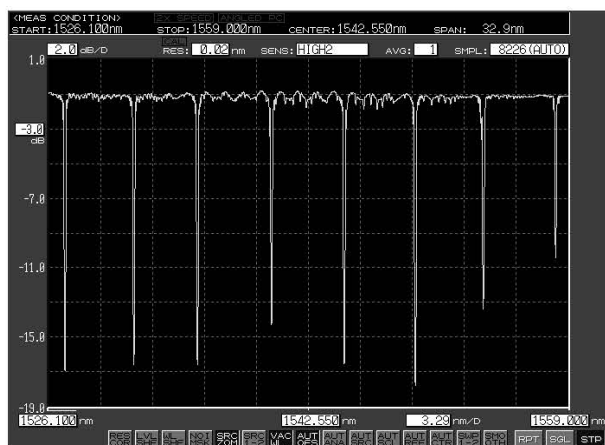


图 3.5 光纤布拉格光栅串透射谱

Figure 3.5 Transmission spectrum of series of fiber Bragg gratings

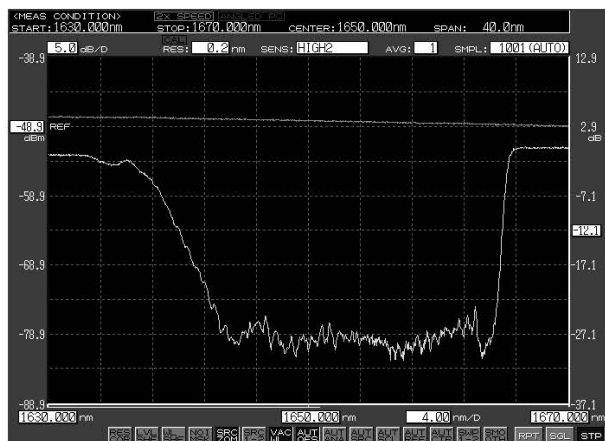


图 3.6 1650 nm 波段宽带光纤光栅透射谱 (绿色线)

Figure 3.6 Transmission spectrum of broadband fiber grating at 1650 nm (Green line)

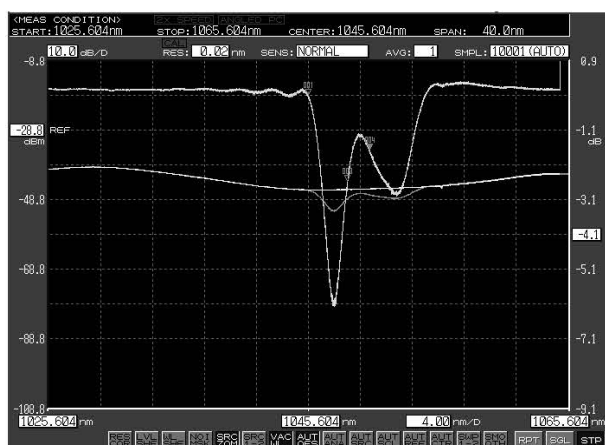


图 3.7 25 μ m 相对小周期长周期光纤光栅透射谱 (绿色线)

Figure 3.7 Transmission spectrum of 25 μ m period long period fiber grating (Green line)

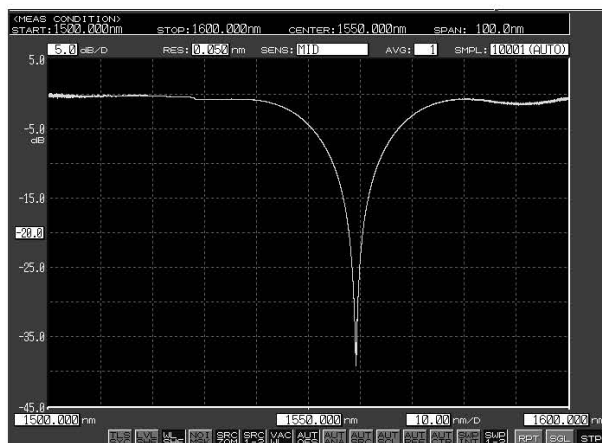


图 3.8 少量模长周期光纤光栅透射谱

Figure 3.8 Transmission spectrum of long period fiber grating written in few-mode fiber (Green line)

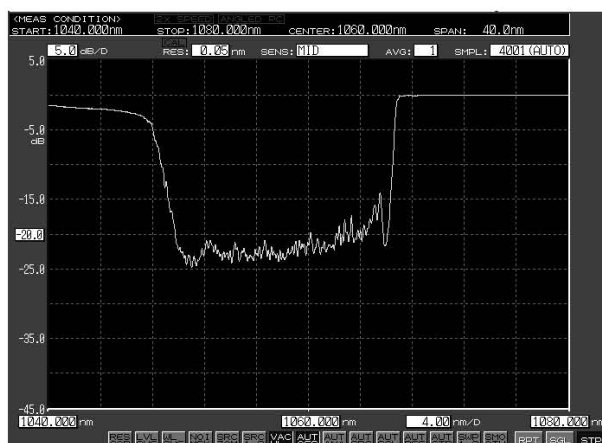


图 3.9 1 μm 波段宽带啁啾光纤光栅透射谱

Figure 3.9 Transmission spectrum of chirped fiber grating at 1 μm

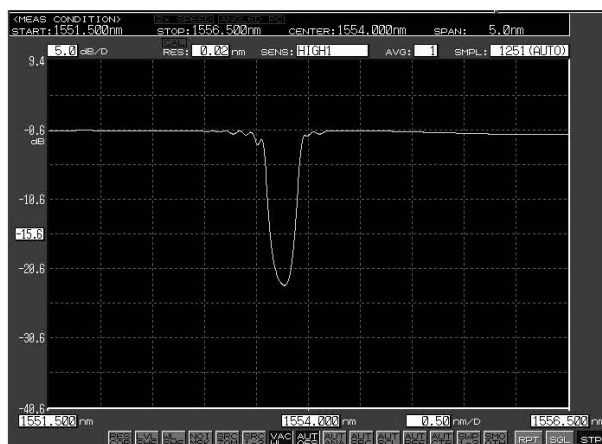


图 3.10 掺铒增益光纤上制作的光纤布拉格光栅透射谱

Figure 3.10 Transmission spectrum of fiber Bragg grating written in Er-doped gain fiber

3.1.3 退火处理

为提升光纤光栅折射率调制的稳定性,在光纤光栅刻写完成后需对其进行高温退火处理。在退火过程中,光纤中残留的氢分子可以扩散掉,提升光纤光栅的稳定性。退火的温度过高会导致光纤损伤和光栅擦除,因此,在本研究中,采用80℃退火,退火时间为48小时。进一步增加退火的时间无法增加退火效果。另外,退火会稍微影响光纤光栅的参数,例如退火后光纤光栅的中心波长会发生漂移、强度有所减少等。

3.2 倾斜光纤光栅制作技术

3.2.1 45度倾斜光纤光栅制作技术

目前,制作倾斜光纤光栅主要有双光束全息相干法和相位掩模法两种方法。由于紫外光的光束尺寸较小,采用双光束全息相干法只适合制作长度较短的45度倾斜光纤光栅,如图3.11所示。45度倾斜光纤光栅的消光比正比于其光栅长度,因此,用双光束全息相干法制作的45度倾斜光纤光栅的消光比也一般较低。在本研究中,采用相位掩模法制作45度倾斜光纤光栅。

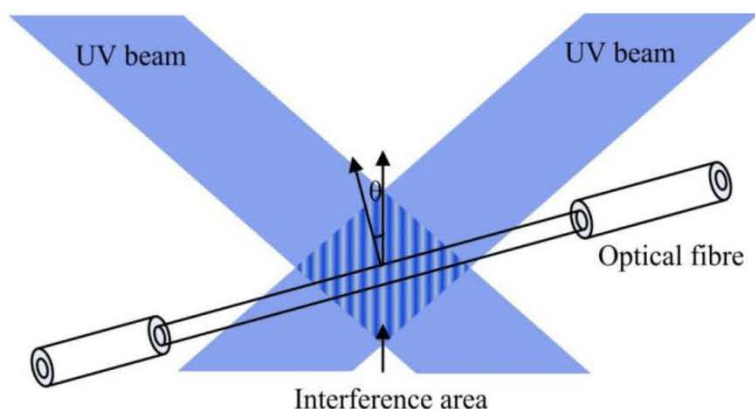


图 3.11 双光束全息相干法制作倾斜光纤光栅

Figure 3.11 Tilted fiber grating fabrication based on holographic technique

相位掩模法制作倾斜光纤光栅一般有三种方法。

在第一种方法中,光纤与相位掩模板平行且无相对旋转,如图3.12所示,两者不再与紫外入射光垂直,而是与紫外光的垂直面呈一定夹角 θ 。基于该方法刻写的光纤光栅平面倾角 θ_G 满足

$$\theta_G = \frac{1}{2} \left\{ \arcsin \left[\frac{1}{n_w} \left(\sin \theta + \frac{\lambda_{uv}}{\Lambda_{pm}} \right) \right] + \arcsin \left[\frac{1}{n_w} \left(\sin \theta - \frac{\lambda_{uv}}{\Lambda_{pm}} \right) \right] \right\} \quad \dots(3.1)$$

式中， Λ_{pm} 为掩模板周期， λ_{uv} 为入射紫外光的波长， n_w 为纤芯在紫外光处的折射率。对于这种方法，如果倾斜的角度过大，-1级衍射光的能量会远远低于+1级的衍射光，影响倾斜光纤光栅刻写的调制深度。因此，该方法不适于制作 45 度倾斜光纤光栅。

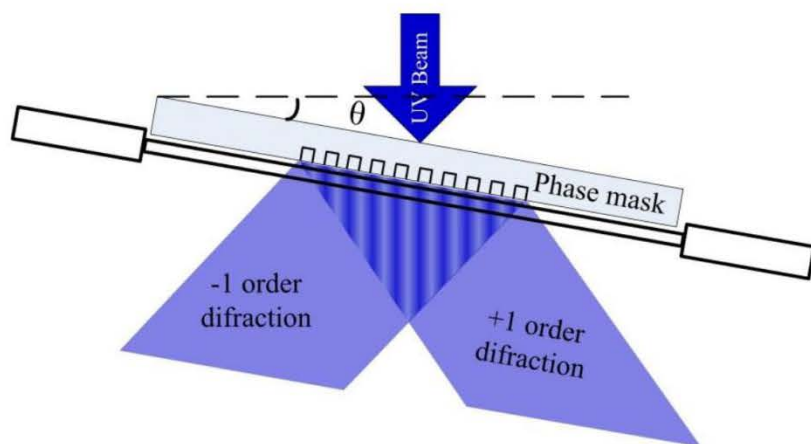


图 3.12 倾斜光纤光栅制作方法（掩模板相对入射紫外光倾斜）

Figure 3.12 Method of tilted fiber grating fabrication (Inclination of mask to incident ultraviolet light)

对于另一种制作倾斜光纤光栅的方法，紫外光垂直入射相位掩模板，如图 3.13 所示，掩模板为标准掩模板，通过旋转光纤使得其与相位掩模板的条纹具有倾斜角度。由于掩模板其掩模区的高度一般较低（2-10 mm），这种方法制作 45 度倾斜光纤光栅的长度会受到较大限制。

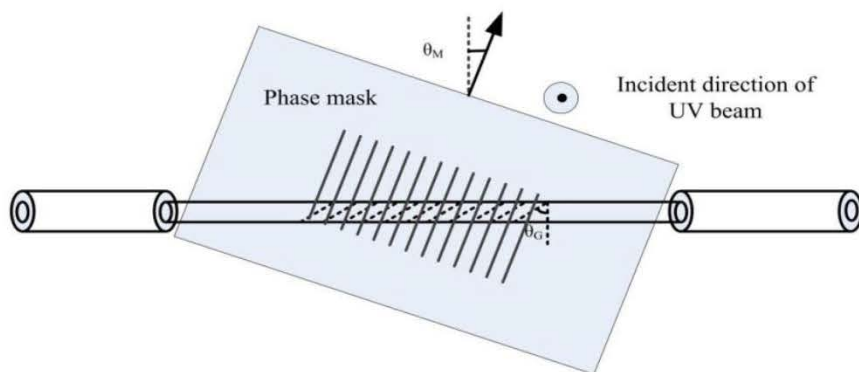


图 3.13 倾斜光纤光栅制作方法（掩模板相对光纤倾斜）

Figure 3.13 Method of tilted fiber grating fabrication (Inclination of mask to fiber)

采用掩模区为倾斜结构的相位掩模板（倾斜掩模板）制作倾斜光纤光栅，与第二种方法类似，紫外光垂直入射相位掩模板，如图 3.14 所示。但由于这种倾斜掩模板的宽度可以达到 50 mm，可实现较长长度倾斜光纤的制作，因此非常适合制作具有高消光比的 45 度倾斜光纤光栅。

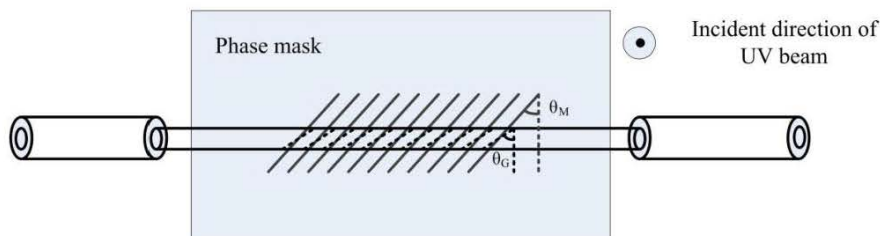


图 3.14 采用倾斜相位掩模板制作倾斜光纤光栅

Figure 3.14 Tilted fiber grating fabrication using tilted phase mask

对于后两种倾斜光纤光栅制作方法，由于光纤的圆柱几何体结构，光纤光栅的倾斜角度 θ_G 不同于掩模板倾斜角度[107]，且为

$$\theta_G = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{1}{n_w \tan \theta_m}\right) \quad \dots(3.2)$$

式中 θ_m 如图 3.13 和图 3.14 所示。

在本研究中，采用 33.7 度倾斜角度的相位掩模板制作 45 度倾斜光纤光栅，刻写过程中激光的输出功率控制在 120-200 mW，扫描速度 0.02-0.05 mm/s，扫描长度为 30-50 mm。1.5 μm 波段 SMF-28 单模光纤（Single mode fiber, SMF）中制作的 45 度倾斜光纤光栅消光比可达 35 dB；850 nm 波段保偏光纤中制作的 45 度倾斜光纤光栅消光比可达 20 dB；1.3 μm 波段保偏光纤中制作的 45 度倾斜光纤光栅消光比可达 30 dB。工作带宽均大于 100 nm。退火后 45 度倾斜光纤光栅的消光比一般会降低 1-2 dB。图 3.15 为所制作的 45 度倾斜光纤光栅的显微图。图 3.16 为某根在 1.3 μm 波段、保偏光纤上制作的 45 度倾斜光纤光栅消光比实测图（测试设备：消光比测量仪，ERM-202）测量。另外，在保偏光纤中制作 45 度倾斜光纤光栅需要在刻写前对保偏光纤进行对轴，一般沿保偏光纤快轴或慢轴刻写。



图 3.15 45 度倾斜光纤光栅显微图

Figure 3.15 Microscopy image of a 45 degree tilted fiber grating



图 3.16 45 度倾斜光纤光栅消光比实测图

Figure 3.16 Measurement photograph of polarization extinction ratio of 45 degree tilted fiber grating

另外，在保偏光纤中制作 45 度倾斜光纤光栅需要在刻写前对保偏光纤进行对轴，一般沿保偏光纤快轴或慢轴刻写。对于熊猫型保偏光纤可以直接采用 CCD 放大成像的方法观测其应力棒位置，将观测光纤置于合适的折射率匹配液，旋转光纤并通过光纤成像结果判断其快慢轴向。对于一些特殊的非熊猫型保偏光纤，无法采用 CCD 放大成像的方法。为判断其快慢轴，我们采用衍射光斑分析的方法，方案如图 3.17 所示。具体方法为：光源的光照射在剥掉涂覆层的光纤上，在光纤后的屏上产生衍射光斑，360 度旋转光纤并通过分析屏上某一点的衍射光斑光强变化可以确定快慢轴的角度位置，最后通过退扭控制使得所需刻写的一段光纤的快轴或慢轴均处于光路的水平方向。

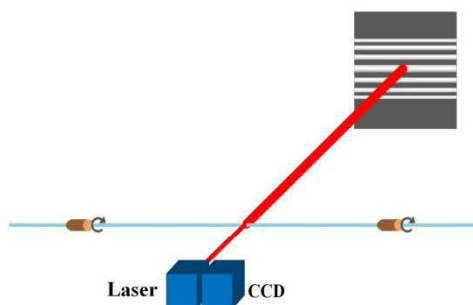


图 3.17 利用衍射标定保偏光纤轴向的方法

Figure 3.17 A method of calibrating the axis of polarization maintaining fiber by diffraction

3.2.2 大角度倾斜光纤光栅制作技术

为实现前向的模式耦合，大角度倾斜光纤光栅的倾斜角一般要超过 70 度。本研究采用幅度掩模板倾斜的方法制作这种大角度倾斜光纤光栅。

不同于相位掩模板利用 ±1 级衍射，幅度掩模板利用的是 0 级衍射，光纤光栅的轴向周期和幅度掩模板周期相同，如图 3.18 所示。

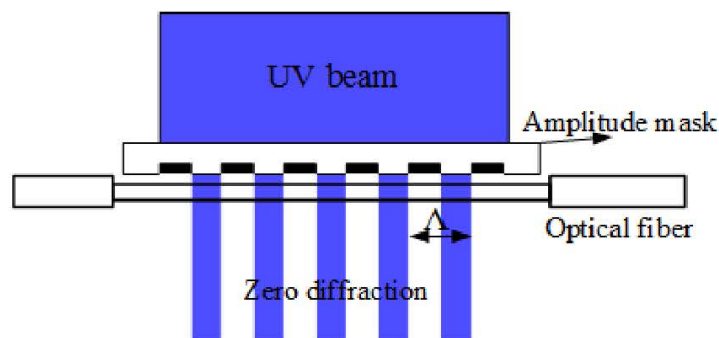


图 3.18 幅度掩模板制作光纤光栅原理

Figure 3.18 Principle of fiber grating fabrication based on amplitude mask

通过倾斜幅度掩模板实现大角度倾斜光纤光栅的制作，如图 3.19 所示。光纤光栅的倾斜角度同幅度掩模板的倾斜角度可参考式 3.2。大角度倾斜光纤光栅的周期 Λ_G 和幅度掩模板的倾斜角度 θ_{ext} 的关系为

$$\Lambda_G = \frac{\Lambda_{AM} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \arctan\left[\frac{1}{n_{uv} \tan \theta_{ext}}\right]\right)}{\cos \theta_{ext}} \quad \dots(3.3)$$

式中 Λ_{AM} 为幅度掩模板的周期。

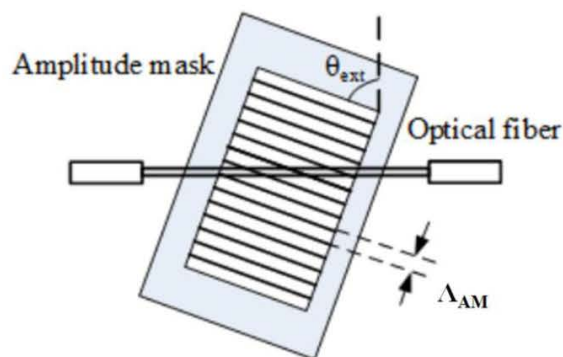


图 3.19 幅度掩模板制作大角度倾斜光纤光栅

Figure 3.19 Fabrication of excessively tilted fiber grating based on amplitude mask

本研究中，采用周期为 $6.6 \mu\text{m}$ 的幅度掩模板，通过倾斜掩模板约 76.5° ，制作了 81° 大角度倾斜光纤光栅。采用周期为 $5 \mu\text{m}$ 的幅度掩模板，通过倾斜掩模板约 80° 制作了 83° 大角度倾斜光纤光栅，其透射谱如图 3.20 所示。

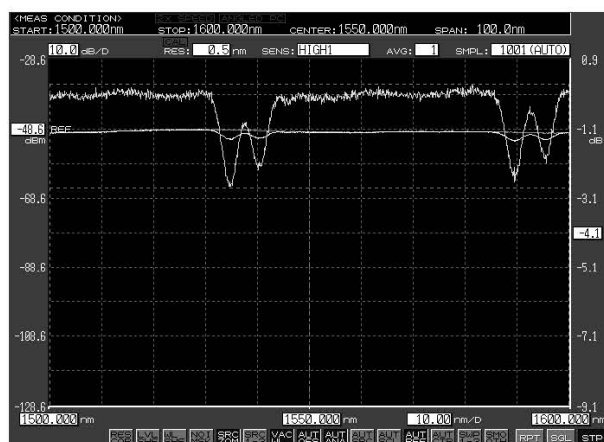


图 3.20 83° 大角度倾斜光纤光栅透射谱（绿色线）

Figure 3.20 Transmission spectrum of 83 degree tilted fiber grating (Green line)

3.3 双光束干涉扫描刻写技术

3.3.1 双光束干涉扫描刻写系统

在传统的双光束全息相干法中，一般采用光斑较大的准分子激光器，并将光束扩束，在光纤上形成一定长度的干涉条纹刻写光纤光栅。而在我们的研究中，由于氩离子倍频紫外激光器的输出光斑较小，难以利用扩束的方法直接实现较大范围的双光束干涉，因此设计了一种双光束干涉扫描刻写系统。

如图 3.21 所示，紫外光束垂直照射在分光器件上，该分光器件不同于平板分束镜（一束光反射，另一束光透射），分束的两束光均为透射，且分束角度一致。两束光分别经过反射镜 1 和 2 以及柱透镜 1 和 2 在光纤纤芯处形成干涉条纹，干涉点（区）宽度在 $1\text{-}2 \text{ mm}$ 量级。通过高精度平移台控制紫外光横向扫描，干涉点（区）在光纤上发生平移，从而制作具有较长长度的光纤布拉格光栅。

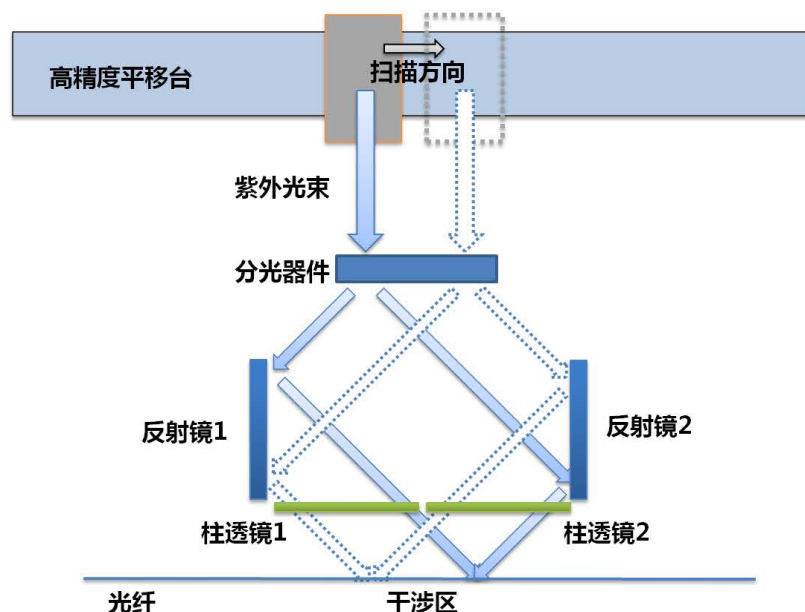


图 3.21 双光束干涉扫描刻写系统

Figure 3.21 Dual-beam interference scanning fabrication system

这种双光束干涉扫描法不受相位掩模板的限制，通过控制反射镜 1 和 2 的角度，可以实现不同周期的干涉条纹，因此可以实现较大波长范围内的光纤布拉格光栅。相比传统的双光束全息相干法，由于不受扩束和激光能量的限制，该系统可制作更长长度的光纤光栅（由反射镜和柱透镜尺寸决定），因此可实现具有更高反射率、更窄带宽的光纤布拉格光栅。另外，利用高精度平移台进行光束扫描可实现更精准的光纤光栅刻写位置、长度的控制，也更适合制作在单根光纤上制作的多个距离较近的光纤光栅。

3.3.2 特殊波段光纤光栅制作

利用所搭建的双光束干涉扫描刻写系统，采用激光输出功率范围为 60-120 mW，扫描速度范围为 0.05-0.5 mm/s，实现了多个特殊波段的光纤布拉格光栅研制，波长范围可覆盖 800-1800 nm。图 3.22 为 931 nm 光纤布拉格光栅透射谱，反射强度达到 24 dB；图 3.23 为 1337nm 光纤布拉格光栅透射谱，反射强度达 20 dB；图 3.24 为 1707 nm 光纤布拉格光栅透射谱，高反射的光栅强度达到 26 dB，低反射的光栅强度约为 1.2 dB。



图 3.22 931nm 光纤布拉格光栅透射谱

Figure 3.22 Transmission spectrum of 931 nm fiber Bragg grating



图 3.23 1337nm 光纤布拉格光栅透射谱

Figure 3.23 Transmission spectrum of 1337 nm fiber Bragg grating

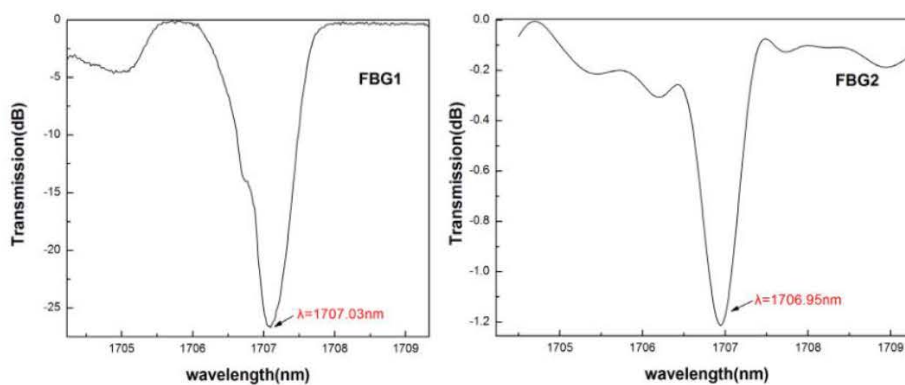


图 3.24 1707nm 光纤布拉格光栅透射谱[108]

Figure 3.24 Transmission spectrum of 1707 nm fiber Bragg grating [108]

由于这种紫外连续光所刻写的光纤光栅没有物理损伤、无热点效应，可以用

在瓦级光纤激光器中。基于我们研制的 $1.7\ \mu\text{m}$ 波段可承受高功率的光纤光栅对，在文献[108]中，实现了 $1707.01\ \text{nm}$ 中心波长、 $44\ \text{pm}$ 窄带宽连续光纤激光，其输出功率可达 $1.28\ \text{W}$ ；在文献[109]中，实现了 $1706.75\ \text{nm}$ 中心波长、 $50\ \text{pm}$ 窄带宽连续光纤激光，其输出功率可达 $3.15\ \text{W}$ 。这种 $1.7\ \mu\text{m}$ 波段高功率光纤激光为中红外激光器的实现提供了重要的泵浦光源。

3.4 小结

本章主要内容为特种光纤光栅的制作研究。具体内容包括：详细描述了本实验搭建的载氢系统以及光纤光栅刻写装置，分析了紫外连续光扫描掩模板法制作光纤光栅的优点，并介绍了基于该系统制作的几个特殊光纤光栅。研究了 45° 倾斜光纤光栅以及大角度倾斜光纤光栅的具体制作方法，实验上制作了多种 45° 倾斜光纤光栅以及大角度倾斜光纤光栅。设计了一种双光束干涉扫描刻写系统，利用该系统制作了多个特殊波段光纤光栅，并应用到特殊波段高功率光纤激光器中。

第 4 章 45 度倾斜光纤光栅在多波长光纤激光的应用研究

45 度倾斜光纤光栅的研制已在第三章中介绍。作为一种理想的全光纤起偏器，45 度倾斜光纤光栅在光纤激光及光纤传感中具有重要的应用。本章主要介绍 45 度倾斜光纤光栅的偏振原理及特性，并利用其偏振特性实现了基于 45 度倾斜光纤光栅的全光纤偏振干涉滤波器、多波长光纤激光器以及单偏振双波长光纤激光器。

4.1 45 度倾斜光纤光栅的原理及特性

4.1.1 45 度倾斜光纤光栅的起偏原理

参阅文献[28]，根据菲涅尔定律（Fresnel's law），当光照在两种不同介质的界面时，部分光会被反射和折射。反射率和折射率取决于介质的有效折射率、入射角以及光的偏振态。当光以布儒斯特角（Brewster angle）入射时，p 偏振态的反射率为零，而 s 偏振态的反射率非零，因此，反射光是全偏振的（s 偏振态），透射光为部分偏振。布儒斯特角为

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad \dots(4.1)$$

对于光纤光栅而言， n_1 和 n_2 是光纤纤芯内未经紫外光改变和经过紫外光改变的有效折射率。由于光纤光栅的折射率变化一般在 10^{-5} - 10^{-3} 量级，相比于纤芯的有效折射率，这个变化极小，其布儒斯特角为 45 度。因此，当光纤光栅呈 45 度倾斜时，将把 s 偏振态的光耦合出去并留下 p 偏振态的光在光纤中继续传输，从而形成光纤起偏器。

最强的耦合波长取决于相位匹配条件，可定义为

$$\vec{K}_R = \vec{K}_{core} + \vec{K}_G \quad \dots(4.2)$$

式中， \vec{K}_R 、 \vec{K}_{core} 、 \vec{K}_G 分别为辐射光、芯模、光栅的波矢，如图 4.1 所示。通常，由于纤芯和包层折射率很接近，可以忽略 \vec{K}_R 、 \vec{K}_{core} 的振幅差。因此，45 度倾斜光纤光栅的最强耦合波长为

$$\lambda_{strongest} = 2n\Lambda_G \cos 45^\circ \quad \dots(4.3)$$

式中 n 为纤芯有效折射率， Λ_G 是光纤光栅周期。

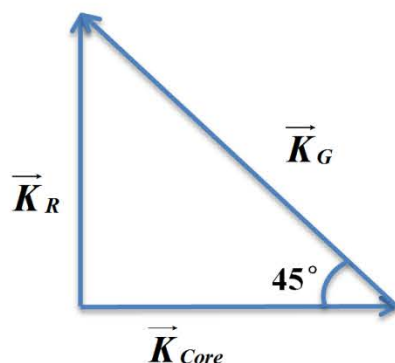


图 4.1 45 度倾斜光纤光栅的相位匹配条件

Figure 4.1 Vector phase-match condition for a 45 degree tilted fiber grating

4.1.2 45 度倾斜光纤光栅偏振相关损耗

理论上, 45 度倾斜光纤光栅可以通过耦合模理论进行模拟, 但体电流法 (Volume current method) 更易于分析 45 度倾斜光纤光栅的偏振相关损耗 (Polarization-dependant loss, PDL) 特性[28, 102]。45 度倾斜光纤光栅的损耗系数可以表达为

$$\alpha = -\frac{k_0^3 \delta n^3}{4n(1 + \frac{u^2}{w^2})} \frac{K_1^2(cw)}{K_0^2(cw)} \times \oint \left[1 - \sin^2 \theta_0 \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} - \varphi_0 \right) \right] \times \left[\frac{K_s J_0(cu) J_1(aK_s) - u J_0(aK_s) J_1(cu)}{K_s^2 - u^2} \right]^2 d\varphi_0 \quad \dots(4.4)$$

式中, $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ 是光在真空中的波矢量, δn 和 n 是纤芯折射率微扰和初始有效折射率, a 是纤芯半径, u 和 w 分别是光纤波导参数, K_s 满足

$$K_s = (K_t^2 + k_0^2 n_{cl}^2 \sin^2 \theta_0 + 2K_t k_0 n_{cl} \sin \theta_0 \times \cos \varphi_0)^{1/2} \quad \dots(4.5)$$

θ_0 是辐射光和光纤方向的夹角, 并满足

$$K_g - n_{eff} k_0 + k_0 n_{cl} \sin \theta_0 = 0 \quad \dots(4.6)$$

φ_0 是芯模极化度。 K_t 和 K_g 分别是光纤光栅沿光纤方向和横截面方向的波矢, 且

$$K_t = 2\pi / \Lambda_g \times \sin 45^\circ \quad \dots(4.7)$$

$$K_g = 2\pi / \Lambda_g \cos 45^\circ \quad \dots(4.8)$$

式中, Λ_g 是光纤光栅周期。 J 是第一类贝塞尔函数 (Bessel function)、 K 是第二类修正贝塞尔函数。

45 度倾斜光纤光栅的传输损耗为

$$T' = \exp(-\alpha L) \quad \dots(4.9)$$

L 是光栅长度, α 是损耗系数。将式 4.4 带入式 4.9, 可以计算出 45 度倾斜光纤光栅对于 s 偏振光和 p 偏振光的传输损耗。

PDL 是光学设备对所有偏振态最大和最低透过率的比值, 定义为

$$PDL = 10 \times \log\left(\frac{T'_{\max}}{T'_{\min}}\right) \quad \dots(4.10)$$

式中, T'_{\max} 、 T'_{\min} 分别是光的最大和最低传输损耗。将式 4.9 带入式 4.10 可的最终 PDL 表达式

$$PDL = -10(\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \log(e) \times L \quad \dots(4.11)$$

式中, α_{\max} 、 α_{\min} 是 45 度倾斜光纤光栅对光的最大和最小传输损耗系数, e 是自然指数。

根据这些公式可以计算得到不同光纤光栅长度的 PDL。如图 4.2 所示, 在 300nm 范围, PDL 谱为近高斯型, PDL 跟光纤光栅的长度呈线性正比关系。

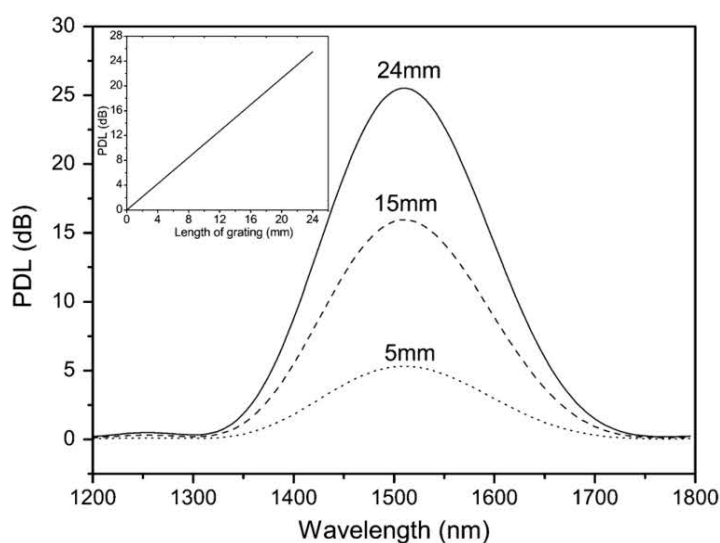


图 4.2 不同长度的 45 度倾斜光纤光栅 PDL 谱

(插图为不同长度对应的中心波长 PDL) [28]

Figure 4.2 PDL spectra of 45 TFGs with three different grating lengths. (Inset:

PDL at central wavelength against the length of 45 TFG) [28]

4.2 全光纤偏振干涉滤波器及多波长光纤激光器

4.2.1 基于 45 度倾斜光纤光栅的全光纤偏振干涉滤波器

在我们的研究中, 利用保偏光纤中刻写的 45 度倾斜光纤光栅可以制作全光

纤偏振干涉滤波器 (All-fiber polarization interference filter, AFPIF) [43-45]。其结构如图 4.3 所示, 2 个沿保偏光纤快轴制作的 45 度倾斜光纤光栅分别作为起偏器和检偏器熔接在一段保偏光纤两端, 这段保偏光纤作为双折射介质, 熔接时其快轴和 45 度倾斜光纤光栅线偏振方向相错 45 度。

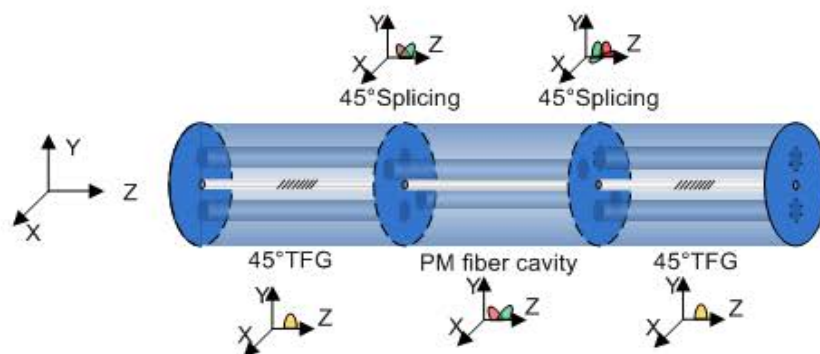


图 4.3 基于 45 度倾斜光纤光栅的全光纤偏振干涉滤波器

Figure 4.3 AFPIF based on 45 degree tilted fiber gratings

全光纤偏振干涉滤波器的原理如图 4.4 所示, 具体为: 当光经过第一个 45 度倾斜光纤光栅后成为线偏振光, 随后进入一段保偏光纤中。线偏振光的偏振方向和这段保偏光纤的快慢轴向具有 45 度夹角, 可以被分解为两束具有相同强度的光, 分别沿保偏光纤快轴和慢轴。由于保偏光纤中的双折射效应, 沿保偏光纤快轴和慢轴的有效折射率不同, 两束光具有不同的相速度进而产生相对相位差, 因此当这两束光到达第二个 45 度倾斜光纤光栅时, 会产生线偏振干涉输出。

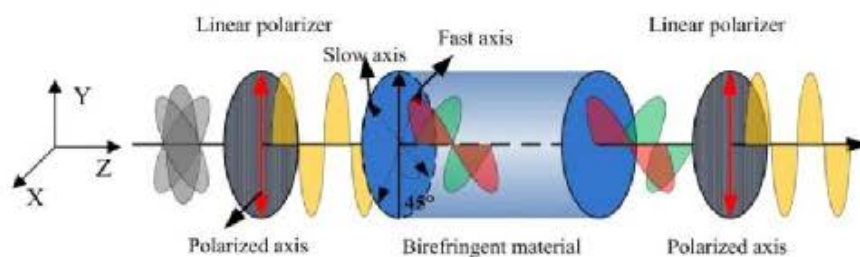


图 4.4 基于 45 度倾斜光纤光栅的全光纤偏振干涉滤波器原理

Figure 4.4 Principle of AFPIF based on 45 degree tilted fiber gratings

该滤波器的自由光谱范围 (Free spectral range, FSR) 和带宽均与中间的保偏光纤长度有关, 其关系式为

$$FSR = \frac{\lambda^2}{L_{pm} \Delta n} \quad \dots (4.12)$$

$$Bandwidth \cong \frac{\lambda^2}{2L_{bm}\Delta n} \quad \dots(4.13)$$

式中， λ 为工作波长， L_{bm} 是保偏光纤长度， Δn 是保偏光纤的双折射值。

实验中，45 度倾斜光纤光栅在 PM1550 保偏光纤上制作，光栅长度约为 49 mm，在 1530 nm 处的消光比为 33 dB，在 1608 nm 处的消光比为 29 dB。图 4.5 为不同保偏光纤长度的全光纤偏振干涉滤波器透射谱，可以看到该滤波器展现了明显的梳状滤波特性，且滤波带宽同保偏光纤长度成反比。该滤波器自由光谱范围和保偏光纤的长度的变化如图 4.6 所示。

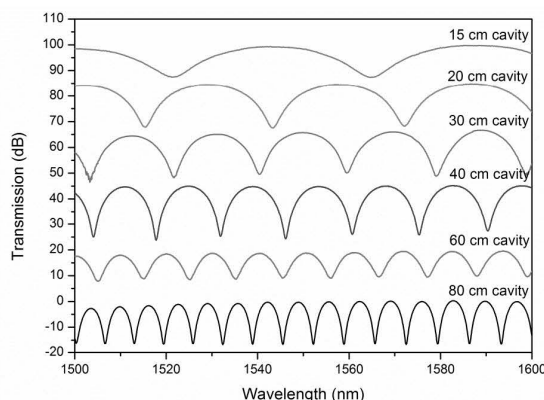


图 4.5 不同保偏光纤长度的全光纤偏振干涉滤波器透射谱

Figure 4.5 Transmission spectra of AFPIF with different lengths of polarization mainting fiber

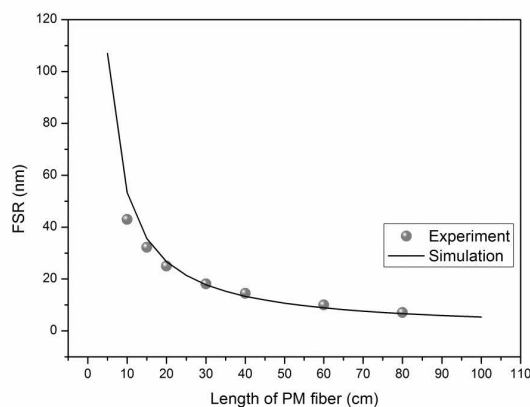


图 4.6 全光纤偏振干涉滤波器自由光谱范围随保偏光纤长度的变化

Figure 4.6 FSR of AFPIF versus the length of polarization mainting fiber

为了实现多波长光纤激光，需要进一步降低该滤波器的 FSR。通过采用约 42 m、双折射为 3.47×10^{-4} 的保偏光纤或约 20 m、双折射为 7.32×10^{-4} 的保偏光

纤可实现自由光谱范围为 0.164 nm 的偏振干涉滤波器，其透射谱如图 4.7 所示。

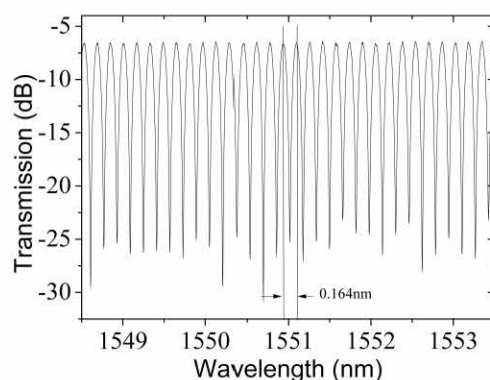


图 4.7 具有 0.164 nm FSR 的偏振干涉滤波器透射谱

Figure 4.7 Transmission spectrum of AFPIF with 0.164 nm FSR

4.2.2 基于全光纤偏振干涉滤波器的多波长光纤激光器装置及原理

多波长光纤激光器可以应用在光纤通信、光纤传感、光谱成像、微波光子学、仪器设备测量等多个领域，具有重要的研究意义。产生多波长光纤激光的常见方法有频移法 (Frequency shifting) [110]、光反馈法 (Optical feedback) [111-113] 以及基于掺铒光纤放大器 [114-116]、非线性偏振旋转 (Nonlinear polarization rotation, NPR) [117-121] 和非线性光学环镜 (Nonlinear optical loop mirror, NOLM) [122-125] 的方法。梳状滤波器也常被用在多波长激光器中帮助多波长的形成，包括法布里-珀罗滤波器 (Fabry-Pérot filter) [126]、模拍滤波器 (Mode-beating filter) [127]、马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer) [128, 129]、采样光栅 (Sampled grating) [130] 以及微光纤干涉仪 (Microfiber interferometer) [131]。

掺铒光纤是一种均匀展宽的增益介质，本质上导致了强烈的模式竞争不利于多波长激光的实现。本实验采用 NPR 效应和全光纤偏振干涉滤波器抑制激光器中的模式竞争并实现具有全光纤结构的多波长激光器。

多波长激光器装置如图 4.8 所示，增益光纤为 2 m 的掺铒光纤，通过一个波分复用器 (Wavelength Division Multiplexer, WDM) / 隔离器 (Isolator, ISO) / 耦合器 (Coupler) 三合一光纤器件被 980 nm 半导体激光泵浦。耦合器的输出为 5%。为产生多波长激光，激光器腔内需要有较高的非线性，本方案采用数千米 SMF-28 单模光纤提供足够的非线性，该单模光纤的色散和非线性系数在 1550 nm 处分别为 18 ps/nm/km 和 1.24 /W/km。偏振干涉滤波器的 FSR 为 0.164 nm，具有典型的梳状滤波光谱，如图 4.7 所示。另外由于偏振干涉滤波器是基于 45

度倾斜光纤光栅制作，具有较强的偏振响应，因此可以和两端的偏振控制器（Polarization controller, PC）实现激光器腔内 NPR 效应。激光光谱由光谱仪（Optical spectrum analyzer, OSA, Yokogawa AQ6370D）测量，其最小分辨率为 0.02nm。

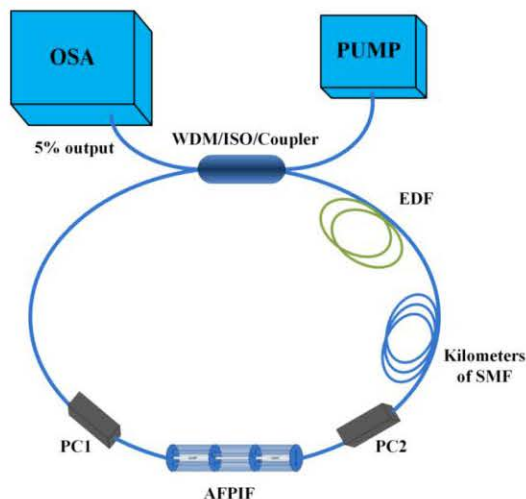


图 4.8 基于全光纤偏振干涉滤波器的多波长光纤激光器装置图

Figure 4.8 Schematic diagram of the proposed multiwavelength fiber laser based on AFPIF

NPR 效应常用于锁模，其基本原理是强度相关的可饱和吸收，即低强度的光成分被吸收，高强度的光成分通过。但是，NPR 效应是可饱和的，当光强度超过一定的量时，透射率反而随着光强度的增加而减少，这种强度相关的损耗被用于多波长光纤激光产生。如图 4.9 所示，其具体原理为： θ_1 是输入光偏振方向和 x 轴（光纤双折射快轴方向）的夹角， θ_2 是 x 轴和 45 度倾斜光纤光栅起偏器的偏振方向夹角， θ_1 和 θ_2 可以通过调节 PC1 和 PC2 改变。在传输过程中，线性偏振光偏振态会变为椭圆偏振态。由于克尔效应，在经过具有双折射效应的光纤后其偏振态方向和椭圆度均发生改变，旋转的角度与光强度有关。在经过检偏器后，通过的光是与最初入射光强度相关的。透过率为[132]

$$T_{NPR} = \cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \cos(\Delta\phi + \Delta\phi') \quad \dots(4.14)$$

式中 $\Delta\phi$ 是光纤双折射引起的线性相移， $\Delta\phi'$ 是克尔效应引起的非线性相移，为

$$\Delta\phi = 2\pi(n_y - n_x)L / \lambda \quad \dots(4.15)$$

$$\Delta\phi' = \frac{-2\pi n_k P_i L \cos 2\theta_2}{\lambda A_{eff}} \quad \dots(4.16)$$

n_x 和 n_y 分别是双折射光纤快轴和慢轴的有效折射率, L 是两个偏振控制器之间双折射光纤的长度, λ 是工作波长, n_k 是克尔非线性系数, P_i 是输出光功率, A_{eff} 是光纤纤芯的有效面积。

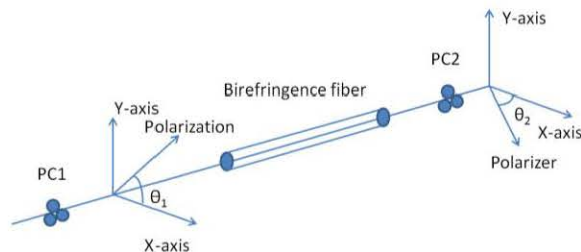


图 4.9 非线性偏振旋转原理图

Figure 4.9 Principle of NPR

4.2.3 多波长光纤激光器测量结果

实验中, 最初 3 km 长的单模光纤被用于激光器腔内提供非线性并抑制模式竞争。在 700 mW 泵浦功率条件下, 通过调节偏振控制器可以得到稳定的多波长激光输出。输出激光同时被示波器监测, 以确保其工作在连续激光状态。图 4.10

(a) 为所测得多波长激光光谱, 其中心波长为 1553 nm, 整体光谱宽度达 15 nm, 3 dB 范围内的波长数达 63 个, 信噪比为 31 dB。图 4.10 (b) 为小量程下的多波长激光光谱, 可以看到波长的间隔为 0.164 nm 和偏振干涉滤波器的 FSR 一致, 且谱峰的线宽为 0.03 nm。

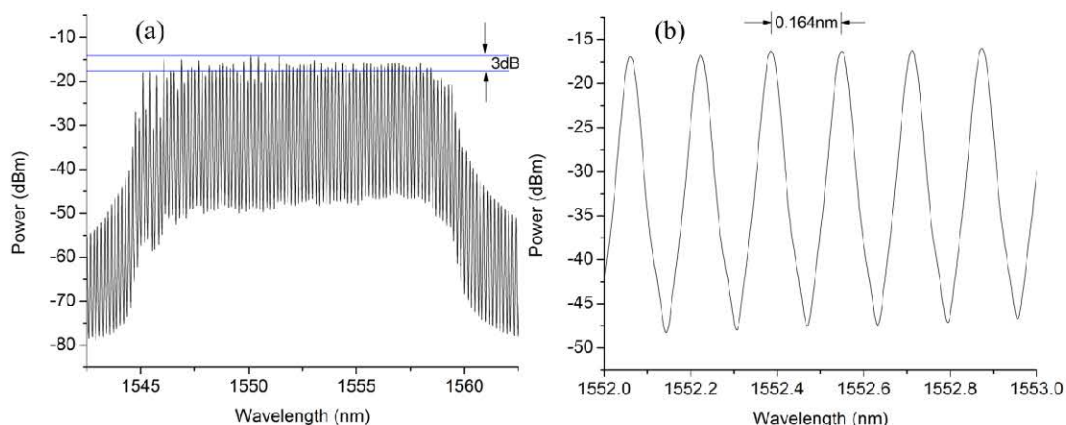


图 4.10 多波长光纤激光器输出光谱

(中心波长 1553 nm、2 m 掺铒光纤、3 km 单模光纤、700 mW 泵浦功率)

Figure 4.10 Output spectrum of the multiwavelength fiber laser

(1553 nm central wavelength, 2 m EDF, 3 km SMF, 700 mW pump power)

通过调节偏振控制器，可以得到另一种状态的多波长激光输出，如图 4.11 所示，其中心波长为 1559.5 nm，整体光谱宽度达 10 nm，3 dB 范围内的波长数达 50 个，信噪比为 30 dB。相比之前的多波长激光光谱，虽然辐射带宽变窄进而导致波长数变少，但其光谱更为平坦，展现了良好的均匀性。波长数变少的主要原因是 1553 nm 处的增益比 1559 nm 处的增益更高，可以满足更多波长激光激发的阈值。

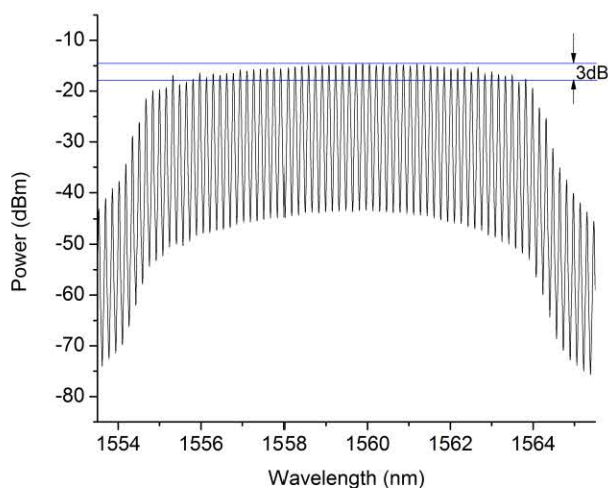


图 4.11 多波长光纤激光器输出光谱

(中心波长 1559.5 nm、2 m 掺铒光纤、3 km 单模光纤、700 mW 泵浦功率)

Figure 4.11 Output spectrum of the multiwavelength fiber laser

(1559.5 nm central wavelength, 2 m EDF, 3 km SMF, 700 mW pump power)

多波长激光器中一般采用数百至数千米长的高非线性光纤(非线性系数一般大于 10 /W/km) 提供足够的非线性。在本实验中，全光纤偏振干涉滤波器有助于激光器内增益和非线性的平衡，因此对于该多波长光纤激光器，仅仅使用几公里长的普通单模光纤即可提供足够的非线性。相比其他同样采用 3 km 单模光纤提供非线性的多波长激光器，该多波长激光的多项参数(如波长数、信噪比、光谱平坦度等)得到了较大的提升。采用单模光纤取代非线性光纤可以减少腔内约 3 dB 的损耗并降低成本。

我们将腔内用于提供非线性的单模光纤长度由 3 km 降低至 2 km，其输出光谱如图 4.12 所示。在 700 mW 泵浦功率下，3 dB 范围内的波长数仍有 30 个，信噪比为 30 dB。为探索该多波长激光器腔内非线性的极限，我们将单模光纤长度进一步降至 1 km，其输出光谱如图 4.13 所示。在 700 mW 泵浦功率下，3 dB 范围内的波长数降低至 11 个，光谱的平坦度较差，信噪比仍为 30 dB。当采用数

百米单模光纤时，该激光器虽然仍有少数波长输出，已不具备实用价值。

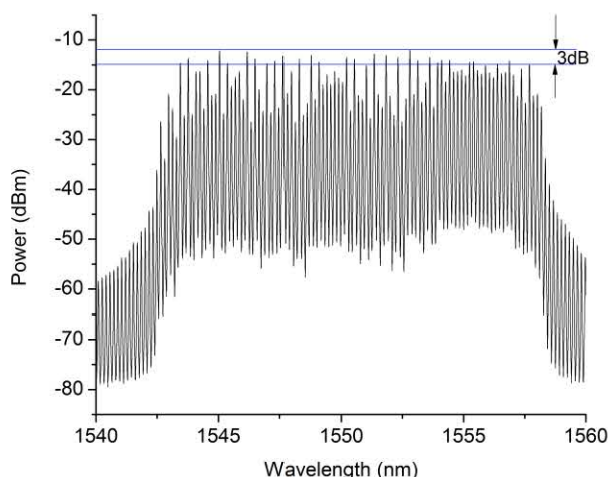


图 4.12 多波长光纤激光器输出光谱 (2 m 掺铒光纤、2 km 单模光纤、700 mW 泵浦功率)

Figure 4.12 Output spectrum of the multiwavelength fiber laser (2 m EDF, 2 km SMF, 700 mW pump power)

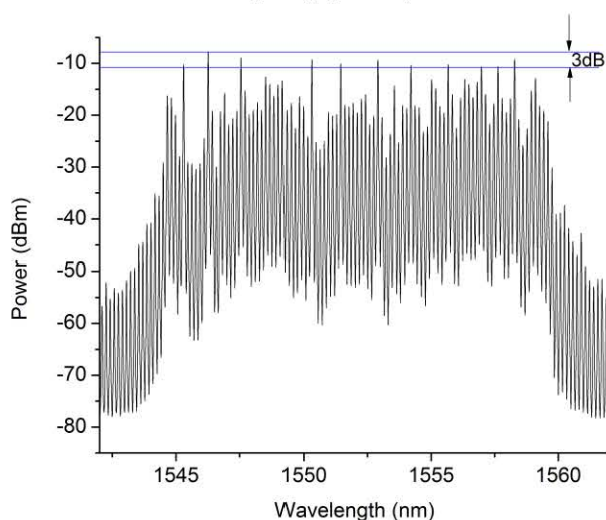


图 4.13 多波长光纤激光器输出光谱 (2 m 掺铒光纤、1 km 单模光纤、700 mW 泵浦功率)

Figure 4.13 Output spectrum of the multiwavelength fiber laser (2 m EDF, 1 km SMF, 700 mW pump power)

我们测试了泵浦功率对于多波长激光输出的影响。采用 3 km 单模光纤时，保持偏振控制器状态不变，将泵浦功率由 700 mW 降至 10 mW。如图 4.14 所示，即便泵浦功率只有 10 mW，仍有 3 dB 范围内 9 个波长的激光输出。当泵浦功率为 50 mW、200 mW 时，其光谱分别如图 4.15、4.16 所示，3 dB 范围内输出光谱数分别 17 以及 35 个。随着泵浦功率的增加，激光器腔内具有更多的增益以激发更多的光谱，光谱也具有更好的一致性和平坦度。

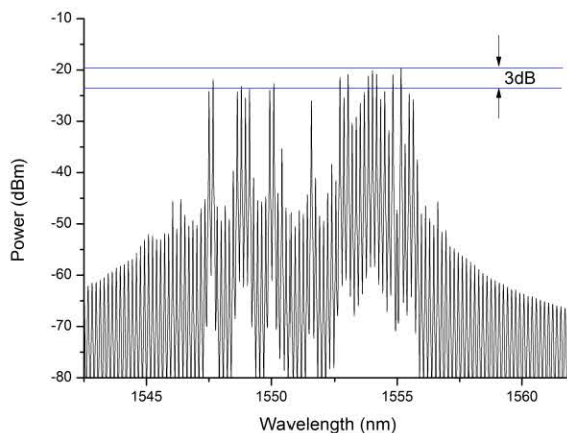


图 4.14 多波长光纤激光器输出光谱 (2 m 掺铒光纤、3 km 单模光纤、10 mW 泵浦功率)
Figure 4.14 Output spectrum of the multiwavelength fiber laser (2 m EDF, 3 km SMF, 10 mW pump power)

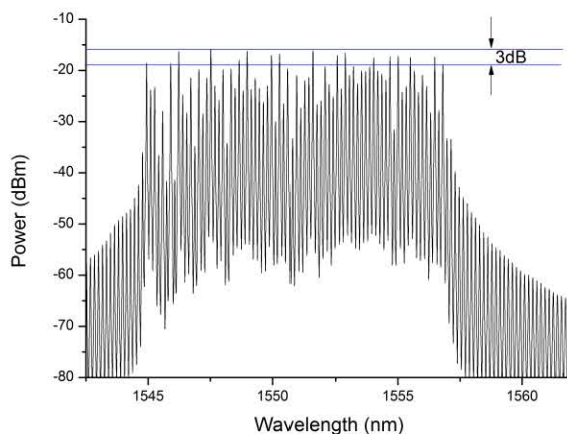


图 4.15 多波长光纤激光器输出光谱 (2 m 掺铒光纤、3 km 单模光纤、50mW 泵浦功率)
Figure 4.15 Output spectrum of the multiwavelength fiber laser (2 m EDF, 3 km SMF, 50 mW pump power)

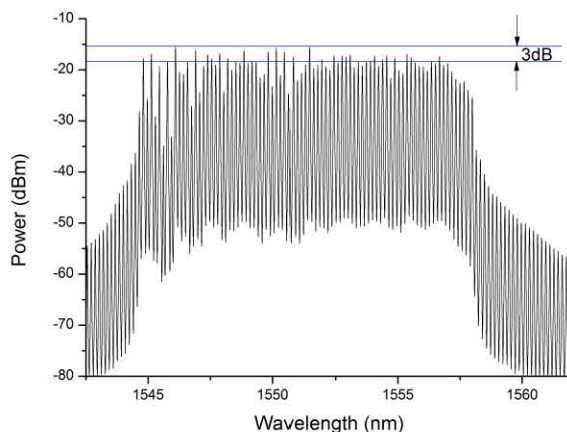


图 4.16 多波长光纤激光器输出光谱 (2 m 掺铒光纤、3 km 单模光纤、200 mW 泵浦功率)
Figure 4.16 Output spectrum of the multiwavelength fiber laser (2 m EDF, 3 km SMF, 200 mW pump power)

由于掺铒光纤的重吸收作用，掺铒光纤的长度越长则激光输出的波长约大。因此，对于该多波长光纤激光器，可以通过增加掺铒光纤长度实现更长波段的激光输出。这种波长调谐方法对于多波长光纤激光在不同领域的应用具有重要作用。实验中，将掺铒光纤的长度由 2 m 增加至 5 m，得到的多波长激光的中心波长红移至 1578 nm，如图 4.17 所示。

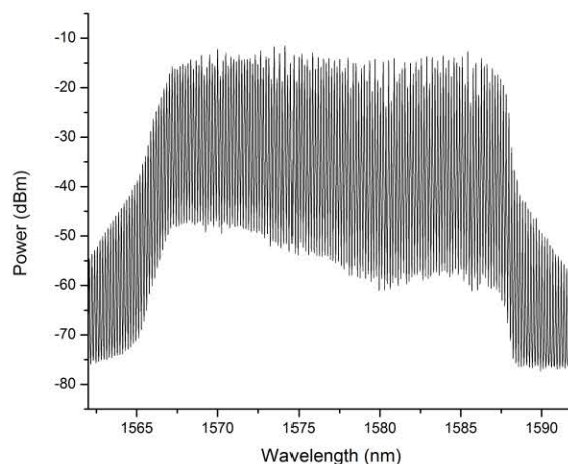


图 4.17 多波长光纤激光器输出光谱 (5 m 掺铒光纤、3 km 单模光纤、700 mW 泵浦功率)

Figure 4.17 Output spectrum of the multiwavelength fiber laser (5 m EDF, 3 km SMF, 700 mW pump power)

通过以上多波长激光器受腔内非线性、泵浦功率以及增益光纤长度等影响的研究，对基于全光纤偏振干涉滤波器的多波长光纤激光器进行了优化。采用 5 km 的单模光纤提供更多非线性、2 m 长的掺铒光纤、700 mW 泵浦功率，输出多波长激光光谱如图 4.18 所示。该光谱具有良好的一致性和平坦度，中心波长约为 1552 nm，更接近掺铒光纤的增益谱峰，整体光谱宽度大于 15 nm，3 dB 范围内的波长数高达 82 个，信噪比提升至 33 dB，波长的间隔仍为 0.164 nm，谱峰线宽约为 0.03 nm。通过对偏振干涉滤波器进行一定的温控，该多波长激光器展现了良好的稳定性。在室温下每 5 分钟测量一次多波长激光输出光谱，共计 30 分钟，如图 4.19 所示，没有明显的光谱抖动发生。最大的波长漂移为 0.016 nm，最大的功率浮动为 0.15 dB。

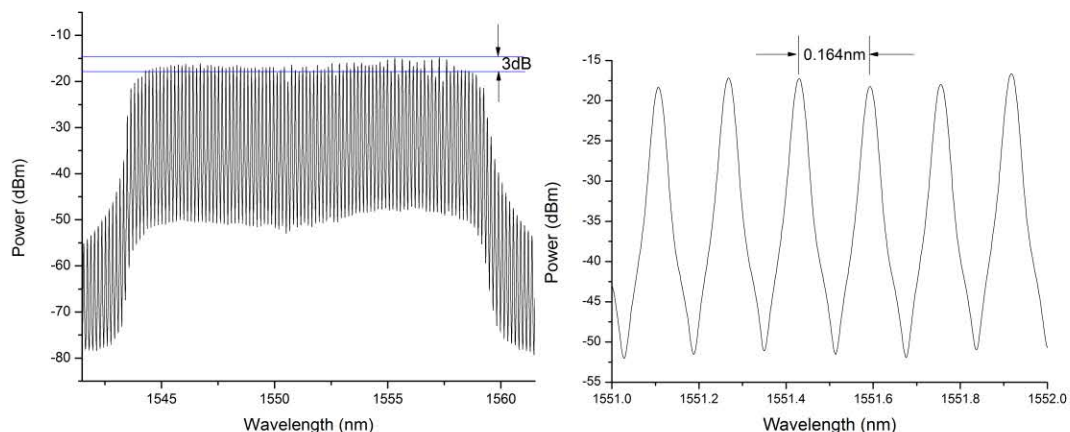


图 4.18 多波长光纤激光器输出光谱 (2 m 掺铒光纤、5 km 单模光纤、700 mW 泵浦功率)

Figure 4.18 Output spectrum of the multiwavelength fiber laser (2 m EDF, 5 km SMF, 700 mW pump power)

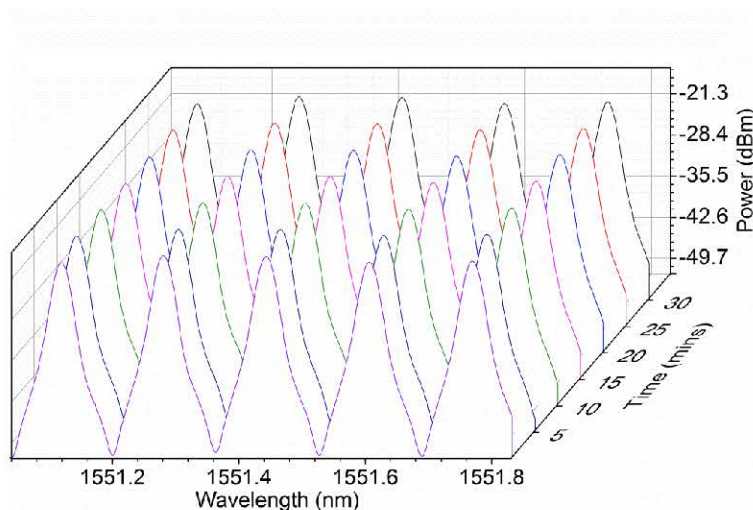


图 4.19 多波长光纤激光器输出稳定性测量

(2 m 掺铒光纤、5 km 单模光纤、700 mW 泵浦功率)

Figure 4.19 Stability of the multiwavelength fiber laser

(2 m EDF, 5 km SMF, 700 mW pump power)

另外，在实验中观测到了一种类多波长脉冲激光输出，如图 4.20 (a) 所示。在 100 mW 泵浦功率下，3 dB 范围内的波长数为 108 个，波长的间隔为 0.164 nm。通过示波器观测，该状态下激光器处于锁模状态，这主要是因为全光纤偏振干涉滤波器具有较强偏振响应，可以起到起偏功能，因而该激光器可以实现 NPR 锁模运转。另外，如图 4.20 (b) 所示，该多波长激光的信噪比为 15 dB 和偏振干涉滤波器的消光深度一致。因此，这种多波长输出是宽带锁模光谱直接被偏振干涉滤波器滤波所得到。通过提升偏振干涉滤波器的消光深度和调节激光锁模光谱

的形状，信噪比和波长数可以得到进一步的提升。这种多波长输出即具有传统多波长激光的光谱特性，同时又是锁模脉冲，对于某些研究领域具有一定的潜在应用。

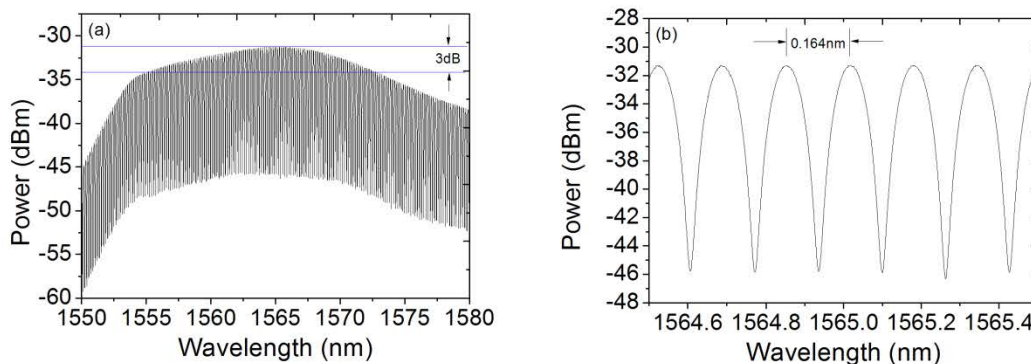


图 4.20 类多波长脉冲激光输出光谱

Figure 4.20 Spectra of multiwavelength-like lasing operation

4.3 基于 45 度倾斜光纤光栅的单偏振双波长锁模光纤激光器

4.3.1 双波长激光器原理及装置

双波长锁模输出是基于光纤双折射、光纤的克尔效应、NPR 效应及腔内偏振态控制的共同作用结果。利用 45 度倾斜光纤光栅的偏振特性可以实现 NPR 效应，其原理如 4.2.2 小节所述。根据式 4.14、式 4.15 和式 4.16，假设 $\theta_1 = \pi/4$ 、 $\theta_2 = 3\pi/4$ ，则透过率函数与相移的关系曲线如图 4.21 所示。对于固定的激光功率，非线性相移是一个常数，透过率仅和光纤双折射引起的线性相移有关，且短波区域的线性相移大于长波区域的线性相移。当光纤激光器工作在图 4.21 中的 A1 区域时，长波区域和中间波段的光损耗较大，短波区域的光损耗较小，短波区域有足够的能量支持稳定锁模输出，此时为单波长锁模运转。随着功率增加，非线性相移减少导致总的相移减少，激光器的工作区域左移。当处于 A2 区域时，短波区域的光具有一定的损耗，无法实现锁模但仍具有连续光输出，长波区域的光透过率仍较高，依然可以实现稳定的锁模。随着功率的继续增加，激光器工作在 A3 区域时，短波区域与长波区域的光透过率都较高，而中间波段的光损耗较大，因此可以获得双波长锁模输出。此时，若功率继续增加，激光器的工作区域会继续左移，短波区域会受到较大损耗，双波长激光会逐渐变为单波长激光。

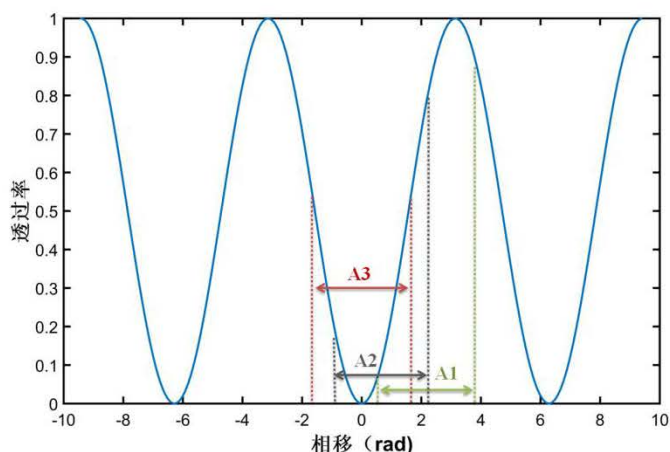


图 4.21 模拟的相移和透过率曲线关系

Figure 4.21 The simulated transmission coefficient versus phase shift

该激光器的结构如图 4.22 所示。增益光纤为掺镱光纤，在 976 nm 处的吸收系数为 500 dB/m，长度为 0.73 m，1050 nm 处色散参数为 20 ps²/km。通过 980/1053 nm WDM 被 976 nm 半导体激光光源泵浦，该泵浦光源的最大输出功率为 500 mW。偏振无关隔离器 (Polarization independent isolator, PI-ISO) 可以抑制后向反馈，实现环形腔激光器单向运转。45 度倾斜光纤光栅和两个 PC 用于实现 NPR 效应，45 度倾斜光纤光栅的消光比为 33 dB。耦合器的输出为 30%。除了增益光纤外，激光器内其余的光纤为单模光纤，1050 nm 处色散参数为 22.1 ps²/km。激光器总腔长为 6.3 m，腔内净色散为 0.14 ps²。滤波器 (Filter) 的中心波长为 1053 nm，带宽为 10 nm，用于滤掉双波长激光的一个波长，实现对单个波长脉冲特性的研究。输出激光由光谱仪 (Optical spectrum analyzer, OSA, Yokogawa AQ6370B)、高速示波器 (Lecroy SDA)、频谱仪 (Agilent E4447A) 以及自相关仪测量。另外，通过 PC3、准直器 (Collimator)、偏振分束器 (Polarization beam splitter, PBS) 以及功率计 (Power Meter) 测量输出脉冲的偏振特性。

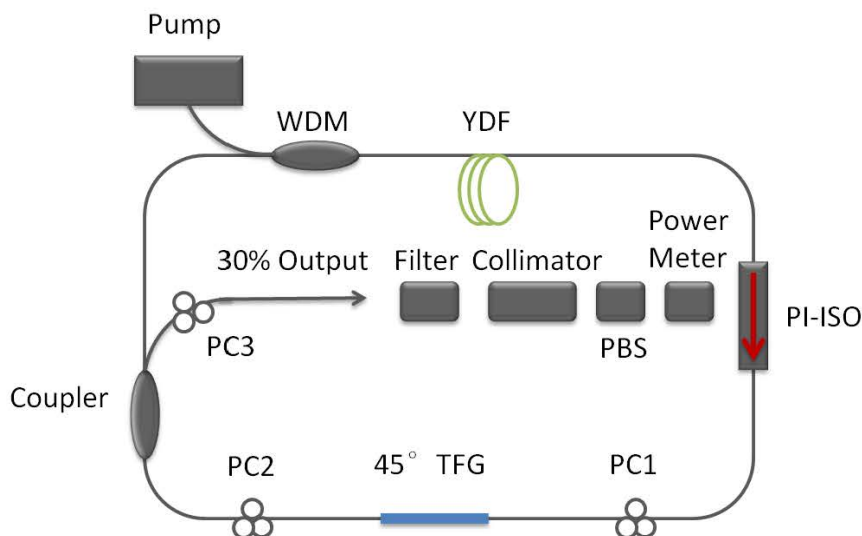


图 4.22 基于 45 度倾斜光纤光栅的单偏振双波长光纤激光器装置图

Figure 4.22 Setup of the single polarization dual-wavelength fiber laser based on 45 degree tilted fiber grating

4.3.2 激光器输出特性

在 339 mW 泵浦功率下, 通过适当调节 PC, 可以获得双波长锁模激光输出, 输出功率为 31 mW。双波长锁模输出是光纤双折射、光纤非线性效应及线性相移共同作用的结果。如图 4.23 所示, 双波长激光的中心波长分别为 1033 nm 和 1053 nm, 3 dB 带宽均为 10 nm。由于激光器腔内为全正色散, 输出激光为耗散型脉冲, 其光谱具有陡峭边沿。

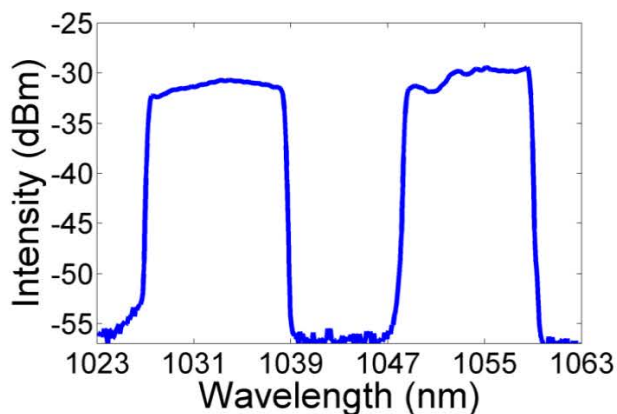


图 4.23 单偏振双波长光纤激光器输出光谱

Figure 4.23 Spectrum of the single polarization dual-wavelength fiber laser

图 4.24 为用示波器测量的输出激光脉冲序列, 激光器腔内形成两个独立的锁模脉冲。两组脉冲序列的强度基本一致, 说明两个脉冲的能量接近, 满足能量

量子化效应。该双波长激光的自相关曲线如图 4.25 所示，在洛伦兹拟合条件下，单脉冲脉宽为 4.3 ps。

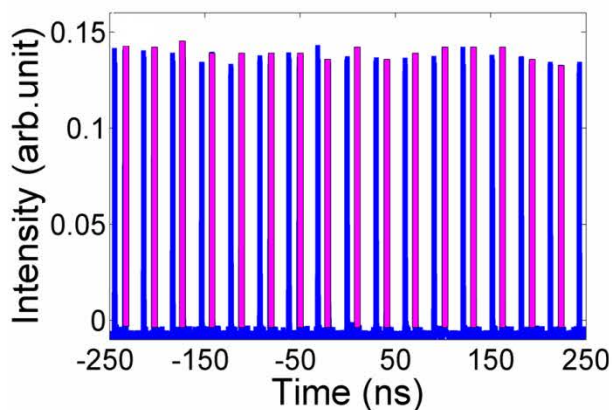


图 4.24 单偏振双波长光纤激光器输出脉冲序列

Figure 4.24 Pulse train of the single polarization dual-wavelength fiber laser

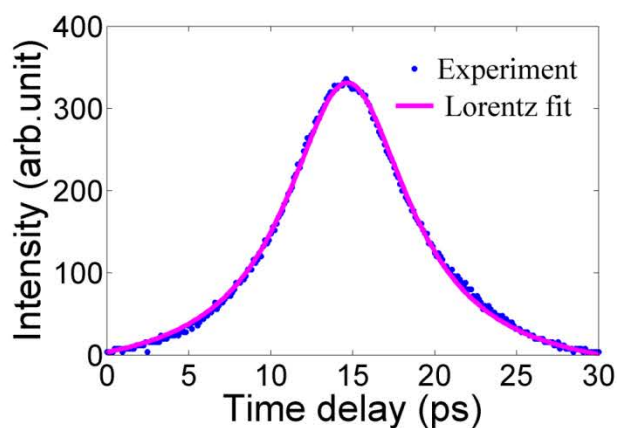


图 4.25 单偏振双波长光纤激光器输出自相关曲线

Figure 4.25 Autocorrelation trace of the single polarization dual-wavelength fiber laser

如图 4.26 所示，双波长锁模激光具有两个基频，间隔为 6 kHz。不同中心波长的脉冲在光纤中传输的速度不同，其群速度与波长成反比，因此双波长锁模激光具有两个重复频率，与频谱图一致。长波长对应的更大的基频，1033 nm 的基频为 32.798 MHz，1053 nm 的基频为 32.804 MHz，在 1 Hz 分辨率下，双波长激光的信噪比为 65 dB。

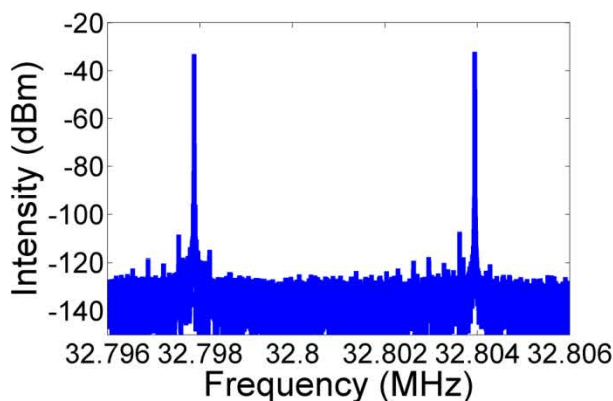


图 4.26 单偏振双波长光纤激光器输出频谱图

Figure 4.26 Radio-frequency spectrum of the single polarization dual-wavelength fiber laser

使用滤波器滤掉 1033 nm 处的波长，单个输出脉冲的特性如图 4.27 所示。输出光谱仅保留了 1053 nm 处的波长，3 dB 带宽仍为 10 nm。脉冲序列间隔 30.5 ns，并具有统一强度。频谱图只保留了一个基频，为 32.804 MHz。单脉冲宽度仍为 4.3 ps（洛伦兹拟合），时间带宽积为 12.5，脉冲具有较大啁啾。单个波长脉冲的功率为 15 mW，对应单脉冲能量约为 0.45 nJ。

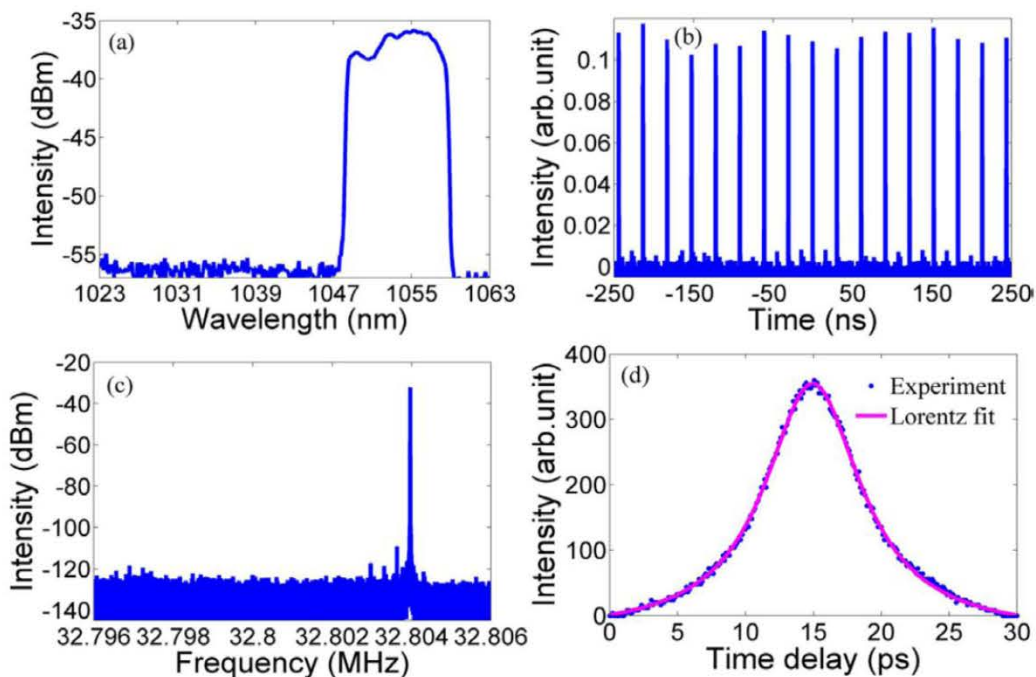


图 4.27 单偏振双波长光纤激光器输出特性

Figure 4.27 Output property of the single polarization dual-wavelength fiber laser

由于采用了具有高消光比的 45 度倾斜光纤光栅，双波长激光具有较高偏振度。这种单偏振激光在光纤传感、非线性变频、光参量装置、相干合束等具有较

大的应用潜力。实验中，PBS 的消光比为 40 dB，用于解析两个正交偏振分量。通过 PC3 调整双波长激光的输出偏振态，同时测量 PBS 一个出口口的最大及最小功率，可以计算得到双波长激光的偏振度约为 27 dB。

4.4 小结

本章首先介绍了 45 度倾斜光纤光栅的起偏原理并在理论上分析了其偏振特性。利用 45 度倾斜光纤光栅的偏振特性，实现了全光纤偏振干涉滤波器。通过研究发现这种滤波器的 FSR 同保偏光纤长度成反比，通过采用数十米长的保偏光纤制作了具有 0.164 nm 自由光谱范围的梳状滤波器。利用所制作的滤波器，实现了全光纤多波长激光，在 3 dB 范围内的波长数高达 82 个，信噪比为 33 dB。另外，理论分析了双波长激光的产生机理，利用 45 度倾斜光纤光栅实现了单偏振双波长锁模光纤激光器，双波长激光的中心波长分别为 1033 nm 和 1053 nm，3 dB 带宽为 10 nm，偏振度高达 27 dB。

第 5 章 大角度倾斜光纤光栅特性及在锁模光纤激光的应用研究

大角度倾斜光纤光栅一般具有大于 70 度的栅区倾斜角度，可以实现前向的包层模耦合，目前常被用于光纤传感系统中，可以测量应力、负载、扭动以及折射率。大角度倾斜光纤光栅的研制已在第三章中介绍，本章主要开展大角度倾斜光纤光栅耦合特性的理论研究，分析了大角度倾斜光纤光栅的典型双峰光谱特性，并在实验上进行了验证。另外，首次利用大角度倾斜光纤光栅的模式耦合特性设计了一种全光纤可饱和吸收体结构，并应用到光纤激光器中实现了激光锁模运转，拓展了大角度倾斜光纤光栅在光纤激光技术中的应用。

5.1 大角度度倾斜光纤光栅特性研究

5.1.1 光纤包层模式的有效折射率计算

传输光纤是由具有高折射率、小直径的纤芯和低折射率包层组成。在第二章的介绍中，模式有效折射率可以通过解麦克斯威尔方程组得到。作为一种近似计算，包层模折射率可以通过将包层等效为被空气包围的空心棒而计算得出。包层和空气的有效折射率差在计算过程中不能被忽略。 TM_{0m} 和 TE_{0m} 的本征值方程分别为[133]

$$\frac{J_1(u)}{uJ_0(u)} + (1 - 2\Delta n_{cl-air}) \frac{K_1(w)}{wK_0(w)} = 0 \quad \dots(5.1)$$

$$\frac{J_1(u)}{uJ_0(u)} + \frac{K_1(w)}{wK_0(w)} = 0 \quad \dots(5.2)$$

式中， Δn_{cl-air} 是包层和空气的有效折射率差， J 是第一类贝塞尔函数， K 是第二类修正贝塞尔函数， u 和 w 分别为

$$u = \frac{2\pi r_{cl} (n_{cl}^2 - n_{cl_{eff}}^2)^{1/2}}{\lambda} \quad \dots(5.3)$$

$$w = \frac{2\pi r_{cl} (n_{cl_{eff}}^2 - n_{air}^2)^{1/2}}{\lambda} \quad \dots(5.4)$$

式中， r_{cl} 是包层的半径， $n_{cl_{eff}}$ 、 n_{cl} 、 n_{air} 分别为包层模式折射率、包层材料有效折射率及空气有效折射率。

通过解式 5.1 及 5.2 可以得到 TM_{0m} 和 TE_{0m} 包层模式的有效折射率。由于包

层和空气的折射率差较大, TM_{0m} 和 TE_{0m} 包层模式的有效折射率差会有微小的差别。图 5.1(a)是计算的 SMF-28 单模光纤的 TM_{0m} 和 TE_{0m} 包层模的有效折射率, 有效折射率随着波长的增加而降低, 且越高阶次的模式有效折射率越低。插图为放大的第 30 阶包层模的有效折射率, 可以看到 TE 模式的有效折射率略大于 TM 模式的有效折射率。图 5.1 (b) 为第 1 阶、10 阶、20 阶、30 阶、40 阶、50 阶的 TE 和 TM 包层模式折射率差。折射率差值随着模式阶次和波长的增加而增加。

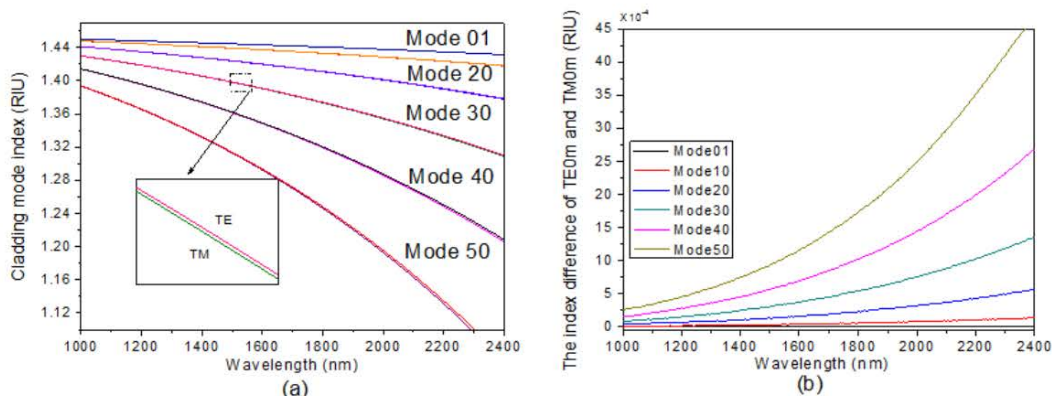


图 5.1 (a) TE 和 TM 包层模有效折射率 (插图为 30 阶模式有效折射率放大图) (b) TE 和 TM 包层模折射率差随波长的变化

Figure 5.1 (a) The mode indexes of TE and TM cladding modes (inset shows the enlarged scale for 30th modes) and (b) the mode index difference between TE and TM cladding modes as a function of the wavelength

5.1.2 大角度倾斜光纤光栅模式特性理论计算

单模光纤由于其圆对称结构, 双折射几乎可以忽略。普通光纤光栅可写过程中的非对称紫外光曝光会在光纤中引入双折射, 该双折射还是很弱, 在正常情况下也可以被忽略。然而, 当光纤纤芯中写入倾斜的折射率调制后, 破坏了圆对称结构, 在纤芯中引入明显的双折射。因此大角度倾斜光纤光栅可以耦合正交的 TE 和 TM 芯模到 TE 和 TM 包层模。

对倾斜光纤光栅, 相位匹配条件决定了芯模和包层模最强耦合的波长。类似第二章第三节中 45 度倾斜光纤光栅的原理分析, 如图 5.2 所示, 大角度倾斜光纤光栅的相位匹配条件为[52]:

$$\lambda_{res} = \left(n_{co}^{eff}(\lambda_{res}) - n_{cl,m}^{i,eff}(\lambda_{res}) \right) \frac{\Lambda_G}{\cos \theta} \quad i=TE \text{ or } TM \quad \dots(5.5)$$

式中, λ_{res} 是谐振波长, $n_{co}^{eff}(\lambda_{res})$ 是谐振波长处的芯模有效折射率, $n_{cl,m}^{i,eff}(\lambda_{res})$ 是

谐振波长处 m 阶 TE 或 TM 包层模有效折射率。 Λ_G 是光纤光栅的周期， θ 为光纤光栅倾斜角度。大角度倾斜光纤光栅的轴向周期 Λ 为

$$\Lambda = \frac{\Lambda_G}{\cos \theta} \quad \dots(5.6)$$

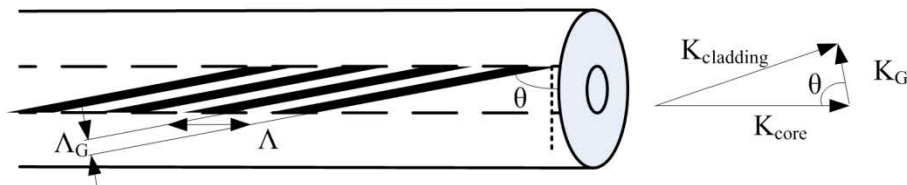


图 5.2 大角度倾斜光纤光栅结构及矢量相位匹配

Figure 5.2 The schematic and vector phase matching diagram of an excessively titled fiber grating

将式 5.6 带入式 5.5，大角度倾斜光纤光栅的相位匹配条件为

$$\lambda_{res} = (n_{co}^{eff}(\lambda_{res}) - n_{cl,m}^{i,eff}(\lambda_{res}))\Lambda \quad i=TE \text{ or } TM \quad \dots(5.7)$$

根据该式，大角度倾斜光纤光栅的谐振波长由纤芯和包层的模式折射率和光栅的轴向周期所决定。

在式 5.7 中应用相位匹配条件，可以得到一组相位匹配的曲线，如图 5.3 所示，波长范围为 1-2.4 μm ，TE 模为实线，TM 模为虚线。其中图 5.3 (a)、(b)、(c)、(d) 分别对应 1-9、10-20、21-30、29-45 阶次的模式。大角度倾斜光纤光栅的轴向周期越小，同一波长对应的模式阶次越高，每一个模式阶次均有两条曲线，分别对应 TE 模和 TM 模。每个模式均存在色散拐点，即 $d\lambda_{res}/d\Lambda = \infty$ ，色散拐点处的波长随着模式阶次的增加向短波方向变化[134]。在达到色散拐点之前，TM 模的谐振波长比同阶次的 TE 模的谐振波长要长，而在达到色散拐点之后，TE 模的谐振波长比同阶次的 TM 模的谐振波长要长。

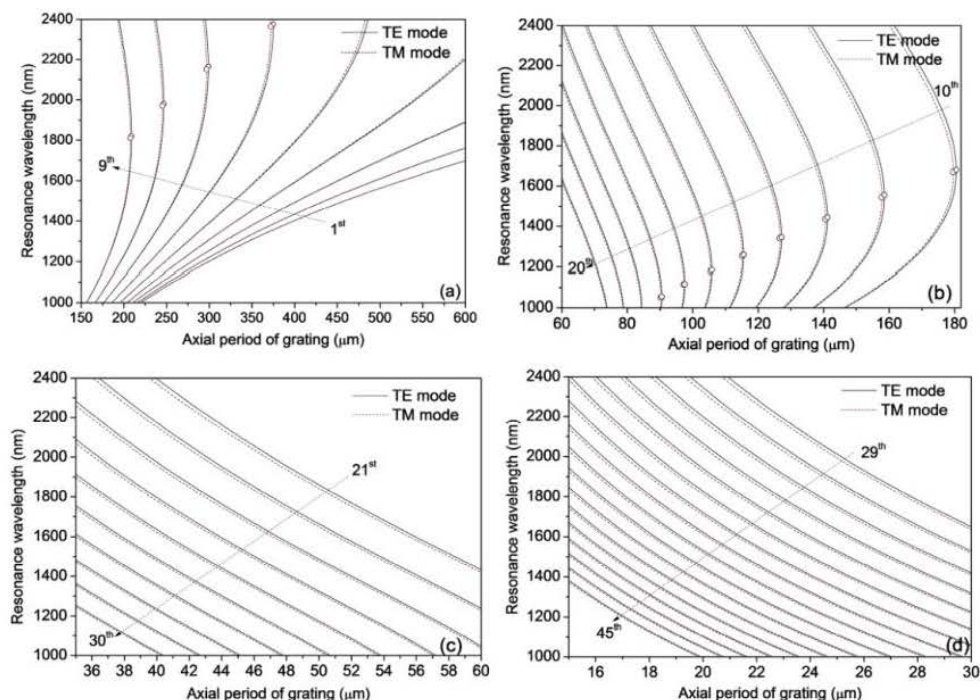


图 5.3 不同阶次 TE 和 TM 模的谐振波长和大角度倾斜光纤轴向周期的关系

Figure 5.3 Simulated resonance wavelength versus the axial period of excessively tilted fiber grating with TE and TM modes for different orders

大角度倾斜光纤光栅可以实现前向 TE 和 TM 纤芯基模到包层模耦合,因此,大角度倾斜光纤光栅透射谱会产生一系列偏振相关的双峰。根据文献[135]中的分析方法,可以得到大角度倾斜光纤光栅对 TE 和 TM 模光谱响应的普通表达式,为

$$\Delta\lambda = \lambda_{TM} - \lambda_{TE} = \frac{\Delta n_{cl,m}^{(TE-TM),eff} \Lambda}{1 - \Lambda \left(\frac{dn_{co}^{eff}}{d\lambda_{res}} - \frac{dn_{cl,m}^{TM,eff}}{d\lambda_{res}} \right)} = \gamma_{TM} \Delta n_{cl,m}^{(TE-TM),eff} \Lambda \quad \dots(5.8)$$

式中, $\Delta n_{cl,m}^{(TE-TM),eff}$ 是 TE 和 TM 包层模折射率差, γ_{TM} 是 TM 包层模的 γ 因子,表示波导色散的贡献。由式 5.7 可得,

$$\frac{d\lambda_{res}}{d\Lambda} = \frac{n_{co}^{eff}(\lambda_{res}) - n_{cl,m}^{i,eff}(\lambda_{res})}{1 - \left(\frac{dn_{co}^{eff}(\lambda_{res})}{d\lambda_{res}} - \frac{dn_{cl,m}^{i,eff}(\lambda_{res})}{d\lambda_{res}} \right) \Lambda} \quad i=TE \text{ or } TM \quad \dots(5.9)$$

$$\gamma = \frac{\frac{d\lambda_{res}}{d\Lambda}}{n_{co}^{eff}(\lambda_{res}) - n_{cl,m}^{i,eff}(\lambda_{res})} \quad \dots(5.10)$$

将 λ_{TE} 设为 1300nm、1550nm 和 1700nm, 双峰间隔和模式阶次的关系计算

结果如图 5.4 所示，在拐点处的模式的间隔达到最大。当 $d\lambda_{res}/d\Lambda > 0$ 时，TM 包层模的谐振波长比 TE 包层模的谐振波长要长，当 $d\lambda_{res}/d\Lambda < 0$ 时，TM 包层模的谐振波长比 TE 包层模的谐振波长要短。另外，谐振波长越长，TE 和 TM 包层模双峰间隔越大。

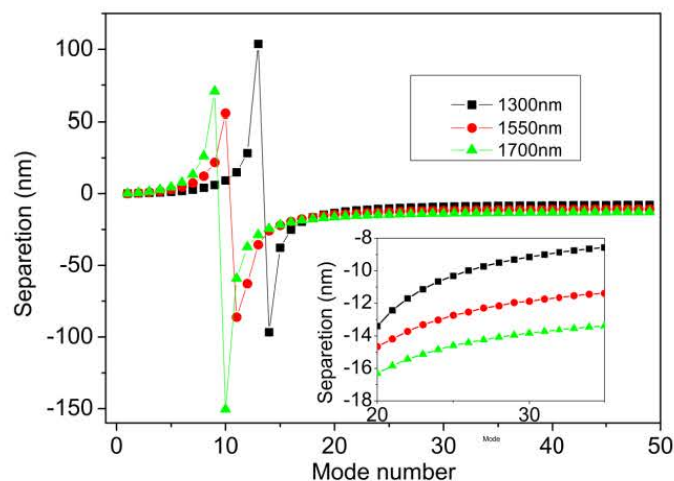


图 5.4 TE 和 TM 包层模双峰间隔和模式阶次的关系

(插图为 20-35 阶次模式的相应曲线放大图)

Figure 5.4 The separation of TM and TE resonance cladding modes as a function of mode order (Inset shows the enlarged separation data from mode 20 to 35)

5.1.3 大角度倾斜光纤光栅特性实验研究

利用具有 $6.6 \mu\text{m}$ 周期的幅度掩模板，通过掩模板倾斜 76.5° ，制作了 81° 倾斜光纤光栅。其透射光谱如图 5.5 所示。图 5.5 (a) 是用无偏振宽带光源测量的结果，在 $1300\text{-}1700 \text{ nm}$ 光谱范围内共有 7 个双峰响应，每个双峰都是由具有正交偏振态的 2 个包层模式耦合引起的。根据本章理论模拟，在 $1300\text{-}1700 \text{ nm}$ 应只有 5 个双峰，理论和实验的差异主要是由于：(1) 本章理论模型采用的是双层波导结构，是一种近似模型；(2) 紫外光导致的平均折射率调制没有被考虑；(3) 大角度倾斜光纤光栅的制作过程会存在角度误差，掩模板的倾斜角度由一个量角器控制，无法控制的绝对精准（一般大角度倾斜光纤光栅的倾斜角度会存在约 $\pm 1^\circ$ 的误差）。

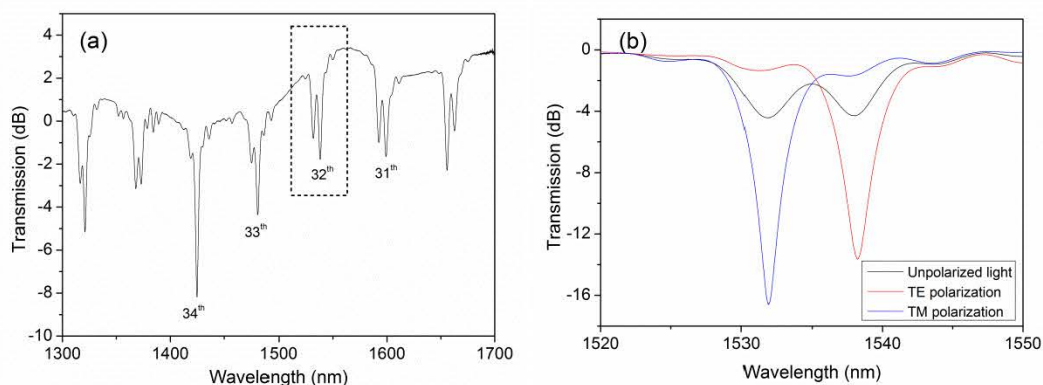


图 5.5 81 度倾斜光纤光栅的透射光谱

(a) 1300-1700 nm 范围 (b) 1520-1550 nm 范围

Figure 5.5 The transmission spectra of 81 degree tilted fiber grating

(a) 1300 to 1700 nm (b) 1520 to 1550 nm

图 5.5 (b) 为该 81 度倾斜光纤光栅在 1550nm 处的透射光谱。当光源为无偏振的光源时，大角度倾斜光纤光栅透射谱如黑色曲线所示，双峰具有相同的耦合强度，约为 3 dB (50%)。当光源为正交偏振光源时，一个峰达到耦合最强而另一个峰几乎消失。根据计算结果，对于 SMF-28 单模光纤，1530 nm 处的谐振模应该是 32 阶包层模，TM 模的波长应该比 TE 模的短。因此，1532 nm 处的峰为 TM 模式，1538.8 nm 处的峰为 TE 模式。

该 81 度倾斜光纤光栅的偏振相关损耗测量如图 5.6 所示，光源为无偏振的宽带光源，一段保偏光纤中制作的 45 度倾斜光纤光栅被用于产生线偏振光，偏振方向可以通过光纤旋转器调整，线偏光通过两个三维调整架空间耦合至大角度倾斜光纤光栅，并通过光谱仪测量其透射光谱。

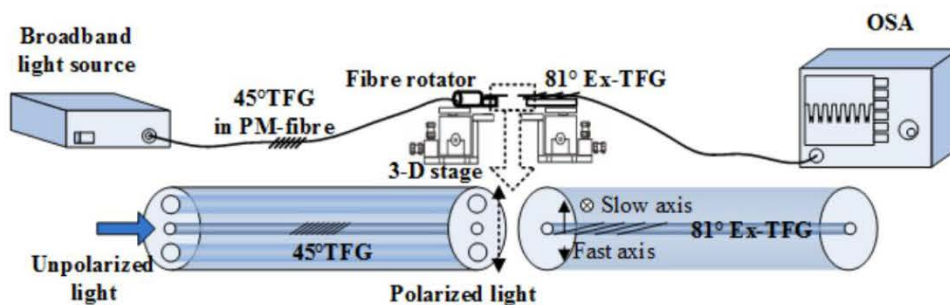


图 5.6 81 度倾斜光纤光栅偏振相关损耗测量

Figure 5.6 The experimental setup investigating the PDL of the 81 degree tilted fiber grating

将光纤旋转器从 0° 旋转至 90° (旋转间隔 15°)，大角度倾斜光纤光栅透

射谱如图 5.7 所示。当旋转角度为 0° 时，线偏振光为 TM 偏振，即偏振方向被调节至沿大角度倾斜光纤光栅快轴，TM 模式耦合最强，TM 模的谱峰（短波的峰）达最大，TE 模的谱峰（长波的峰）几乎消失。当旋转角度为 45° 时，两个峰的强度一致，均为 3dB（50%）。当旋转角度为 90° 时，TE 模式耦合最强，TE 模的谱峰达最大，TM 模的谱峰几乎消失。

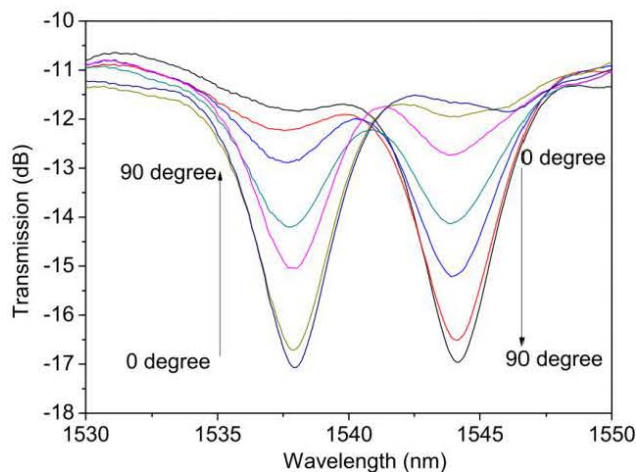


图 5.7 81 度倾斜光纤光栅的偏振响应

Figure 5.7 Polarization response of the 81 degree tilted fiber grating

根据理论分析，大角度倾斜光纤光栅的双峰特性是由 TE 和 TM 包层模的模式折射率差导致的。根据式 5.1 和式 5.2，这个折射率差是由于 TM 包层模的本征值方程不仅受周围介质折射率影响，还受到包层和周围介质折射率差的影响。当周围介质折射率增加，TE 和 TM 包层模的模式折射率发生改变，TE 和 TM 包层模的模式折射率差相应减少。在实验中，测试了周围介质对大角度倾斜光纤光栅 32 阶 TE 和 TM 包层模的影响。如图 5.8 所示，当周围介质的折射率为 1 时，双峰间隔的理论模拟结果为 6 nm，实验结果为 6.8 nm。当周围介质的折射率增加时，根据理论结果，双峰间隔逐渐减少至 1.2 nm（周围介质折射率 1.38），根据实验结果，该值为 0.48 nm（周围介质折射率 1.38）。如果进一步增加周围介质折射率，由于介质折射率大于包层模折射率，光纤包层不再能支持包层模式。虽然模拟结果和实验结果在数值上存在一定偏差，但变化的趋势一致，都明确表明大角度倾斜光纤光栅的双峰间隔随着周围介质折射率的增加而减少。

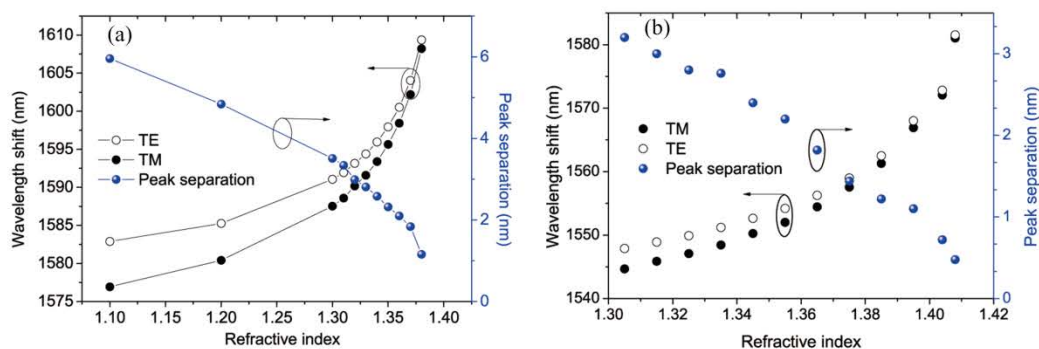


图 5.8 32 阶包层模双峰间隔受环境介质折射率的影响

(a) 模拟结果 (b) 实验结果

Figure 5.8 The simulated (a) and experimental (b) results of peak separation of 32nd dual peak cladding mode versus surrounding medium refractive index.

5.2 大角度度倾斜光纤光栅在锁模光纤激光器中的应用研究

5.2.1 可饱和吸收体简述

可饱和吸收体对光纤激光锁模具有至关重要的作用,同时可饱和吸收体还影响锁模光纤激光器的输出脉冲能量、宽度和稳定性。相比于 NPR 和 NOLM 这种类型可饱和吸收体,基于纳米材料的可饱和吸收体可以具有更高的环境稳定性。这类纳米材料主要包括一维纳米材料(碳纳米管[136-138])、二维纳米材料(石墨烯[139-143]、黑磷[144-146]、过渡金属硫族化合物[147-151])以及零维过渡金属氧化物纳米材料(四氧化三铁、二氧化钛、氧化锌、氧化铝)[152-159]等。

制作这类可饱和吸收体的关键在于实现光与纳米材料的相互作用。一种常见的方法是采用布拉格反射镜,可参考半导体可饱和吸收镜(Semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)[160, 161],如图 5.9 所示,可饱和吸收材料置于光纤和布拉格反射镜之间。另一种方法是将可饱和吸收纳米材料置于光纤陶瓷插芯连接器的端面上。这两种方法中,材料均放置于光纤的横截端面,破坏了全光纤结构,且由于纤芯面积较小,脉冲激光运转过程中可饱和吸收体承受较大的能量密度,容易损坏。

利用 D 型光纤[162-164]、拉锥光纤[165, 166]的倏逝场也可以实现光与纳米材料的相互作用,这种方法具有全光纤结构,且由于较长的作用长度(一般为数毫米至十几毫米),光与材料可以充分作用。然而 D 型光纤的制作需要复杂的工艺和昂贵的设备,难以和单模光纤熔接,且泄露出纤芯和材料作用的光的比例由

D 型光纤纤芯边缘和其抛光面的距离（一般为数个微米）决定，难以精确控制且无法调控，如图 5.10 所示。拉锥光纤的芯径很细容易断裂，不利于实际应用。

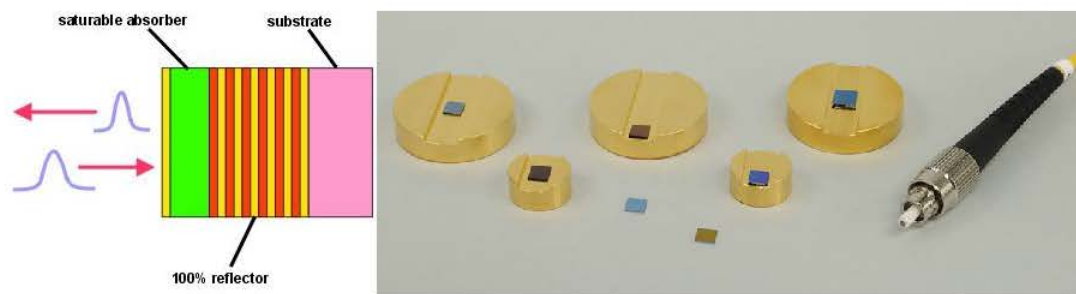


图 5.9 可饱和吸收反射镜的示意图和实物图

Figure 5.9 Illustration and photograph of SESAM

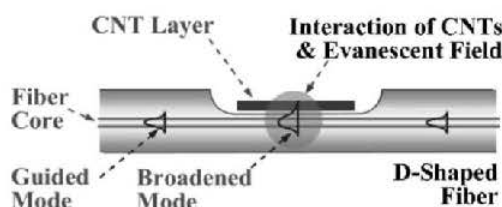


图 5.10 利用 D 型光纤实现光与纳米材料相互作用[165]

Figure 5.10 The interaction of light and nanomaterials based on D-shaped fiber [165]

5.2.2 基于大角度倾斜光纤光栅的可饱和吸收体

大角度倾斜光纤光栅可以实现纤芯至包层模式的耦合，利用这一特性，提出基于大角度倾斜光纤光栅的可饱和吸收体。如图 5.11 所示，可饱和吸收材料沉积在大角度倾斜光纤光栅栅区包层表面，从纤芯耦合至包层的光通过倏逝场和纳米材料相互作用。基于大角度倾斜光纤光栅的可饱和吸收体具有多个优点：（1）由于光纤包层表面的面积相对较大且光栅长度相对较长，纳米材料可以和光充分作用；（2）大角度倾斜光纤光栅具有滤波作用，可以抑制激光器腔内的模式竞争有助于实现激光的锁模，且可以控制输出脉冲的波长范围；（3）大角度倾斜光纤光栅的耦合效率可以通过偏振控制器在一定范围内调谐，因此可以控制光与纳米材料的作用程度，达到激光器腔内光与纳米材料相互作用和损耗的平衡，更容易实现激光器锁模；（4）大角度倾斜光纤光栅不破坏光纤的物理结构，具有更高的稳定性，且没有熔接问题、插入损耗低。

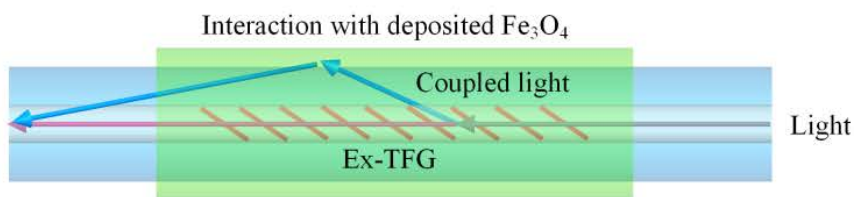


图 5.11 利用大角度倾斜光纤光栅实现光与纳米材料的相互作用

Figure 5.11 The interaction of light and nanomaterials based on excessively tilted fiber grating

在实验中，采用的可饱和吸收纳米材料为四氧化三铁 (Fe_3O_4)。这种基于大角度倾斜光纤光栅的可饱和吸收体也可采用石墨烯、黑磷等其它纳米材料。采用液相剥离法制作 Fe_3O_4 可饱和吸收体， Fe_3O_4 纳米颗粒分散在 N-甲基吡咯烷酮 (N-Methylpyrrolidone) 溶剂中，经过超声处理，形成均匀的悬浮颗粒，其浓度为 0.3 mg/ml 。如图 5.12 (a) 所示，所调配的 Fe_3O_4 溶液呈锈棕色。图 5.12 (b) 为通过扫描电子显微镜看到的 Fe_3O_4 纳米材料图像， Fe_3O_4 纳米材料展现了均匀的球形形状。 Fe_3O_4 纳米颗粒的横向尺寸约为 $54\text{-}300 \text{ nm}$ ，带隙约为 0.3 eV ，因此该材料可以工作在 $4.1 \text{ }\mu\text{m}$ 以下的波段。图 5.13 为利用傅立叶变换红外光谱仪 (Bruker VERTEX 80/80v) 测量的该材料透过谱。在 1595 nm 处，材料透过率为 35.6% ，展现了典型的吸收特性。

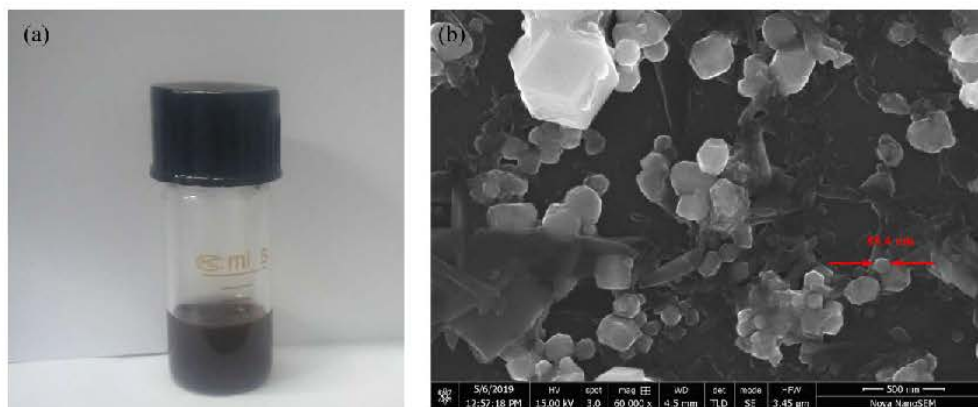
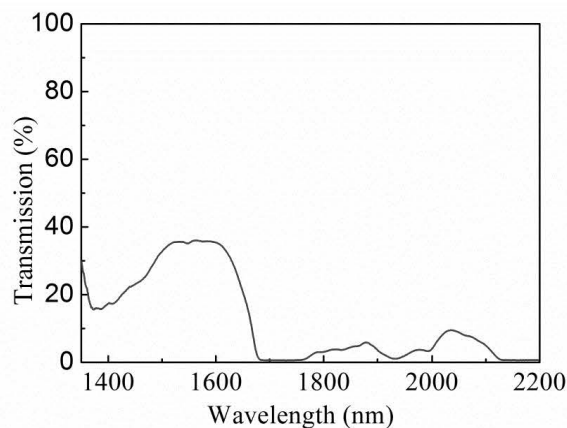


图 5.12 Fe_3O_4 纳米材料 (a) 实物图，(b) 扫描电子显微镜图

Figure 5.12 (a) Photograph and (b) the scanning electron microscope image of Fe_3O_4 nanomaterials

图 5.13 Fe_3O_4 纳米材料的透射谱Figure 5.13 The transmission of the Fe_3O_4 nanoparticles

在大角度倾斜光纤光栅的制作中，幅度掩模板的周期为 $6.6 \mu\text{m}$ ，掩模板倾斜 76° ，光纤光栅的倾斜角为 80.6° 。另外，光纤光栅的长度为 10 mm ，相对较长的作用长度有利于耦合光和材料的充分作用。基于光捕获效应，约 91 mW 的连续光在光纤中持续传输，经过约 1 小时，实现 Fe_3O_4 纳米材料在大角度倾斜光纤光栅表面的沉积，最终制成全光纤可饱和吸收体。图 5.14 为该可饱和吸收体的透射谱，类似于大角度倾斜光纤光栅的透射谱，具有典型的双峰特性。当测试光源为随机偏振光时，双峰位置分别为 1599 nm 和 1605 nm ，且具有相同的强度，约 3 dB (50%)。当采用正交偏振光时，一个耦合峰达到最大值约 5.6 dB ，另一个耦合峰则几乎消失。其光谱特性也表明了基于大角度倾斜光纤光栅的可饱和吸收体的消光比约为 5.6 dB 。

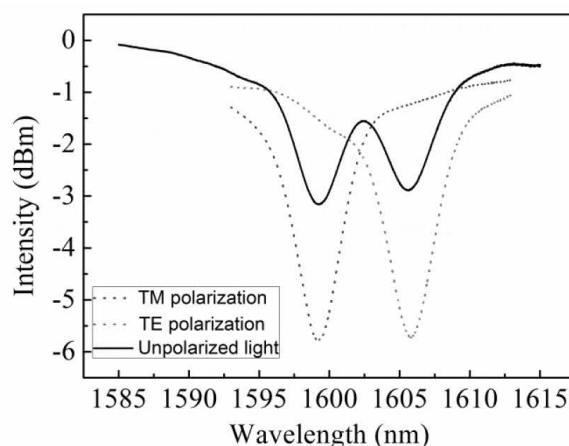


图 5.14 基于大角度倾斜光纤光栅的可饱和吸收体透射谱

Figure 5.14 The transmission spectra of the saturable absorber based on excessively titled fiber grating

利用平衡双探测器测量技术研究该可饱和吸收体的非线性透过特性,其方法如图 5.15 所示。测试光源发出的光经 50:50 的耦合器分束成等功率的两束光,一束直接被功率计测量,一束经过可饱和吸收体后被功率计测量。为消除大角度倾斜光纤光栅滤波作用对测试结果的影响,需采用光谱稳定的光源。因此,实验中采用的光源为一个自制的孤子锁模光纤激光器,单脉冲宽度约为 1 ps,在该光源输出功率逐渐提升至测试功率 7.36 mW 的过程中,最大中心波长漂移为 0.12 nm,最大 3 dB 带宽变化小于 0.19 nm。经测量,如图 5.16 所示,该可饱和吸收体的调制深度为 2.46%。

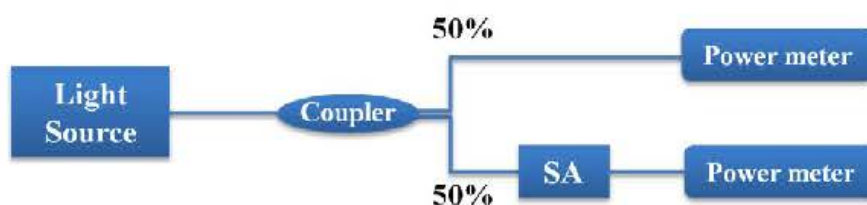


图 5.15 平衡双探测器测量装置

Figure 5.15 Experimental setup of the balanced twin-detector measurement device

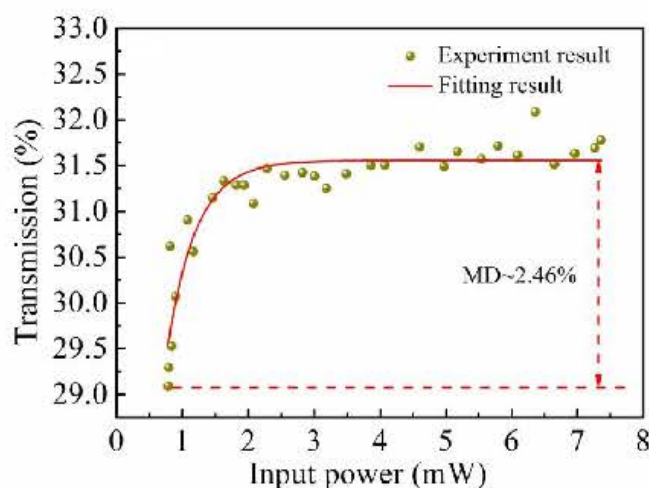


图 5.16 可饱和吸收体非线性传输特性测量结果

Figure 5.16 The nonlinear transmission curve of the saturable absorber

5.2.3 基于大角度倾斜光纤光栅可饱和吸收体的锁模光纤激光器

将这种基于大角度倾斜光纤光栅的可饱和吸收体应用于光纤激光器中,成功实现了激光锁模。如图 5.17 所示,激光器具有典型的环形腔结构。泵浦光源为 980 nm 的半导体 (Laser diode, LD) 激光器,其最高泵浦功率为 300 mW,泵浦光经过波分复用器 (WDM) 进入掺铒光纤 (EDF, Nufern SM-ESF-7/125, 在 1530

nm 处的吸收系数为 55 dB/m)，随后依次经过第一个偏振控制器 (PC1)、偏振无关隔离器 (PI-ISO)、基于大角度倾斜光纤光栅和 Fe_3O_4 纳米材料的可饱和吸收体 (Ex-TFG & Fe_3O_4)、第二个偏振控制器 (PC2) 以及具有 10% 输出的耦合器 (Optical coupler, OC)。激光器的总腔长约为 12.6 m，掺铒光纤和普通单模光纤的色散系数分别为 -46.25 ps/nm/km 和 18 ps/nm/km。锁模脉冲的特性由光谱仪 (Yokogawa AQ6370D)、示波器 (Tektronix TDS784D)、频谱仪 (Agilent technologies N9000A) 和自相关仪 (APE Pulse Check SM1200) 测量。

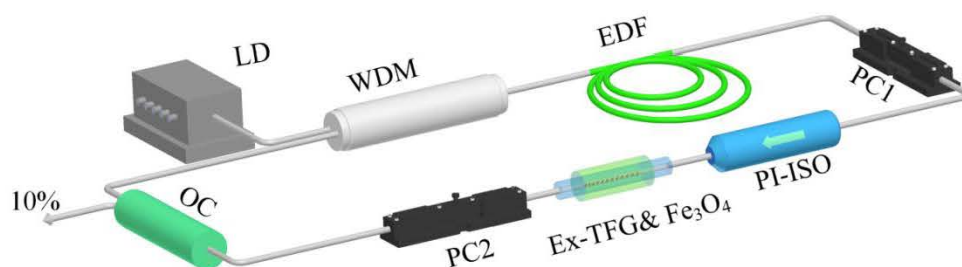


图 5.17 基于大角度倾斜光纤光栅可饱和吸收体的锁模光纤激光器结构图

Figure 5.17 The setup of mode-locked fiber grating using excessively tilted fiber grating based saturable absorber

当泵浦功率为 60 mW 时，通过调节偏振控制器可以实现单脉冲锁模运转。当泵浦光大于 200 mW 时，光纤激光处于多脉冲锁模状态。如图 5.18 所示，平均输出功率和泵浦功率呈线性关系，斜率为 3.68%。

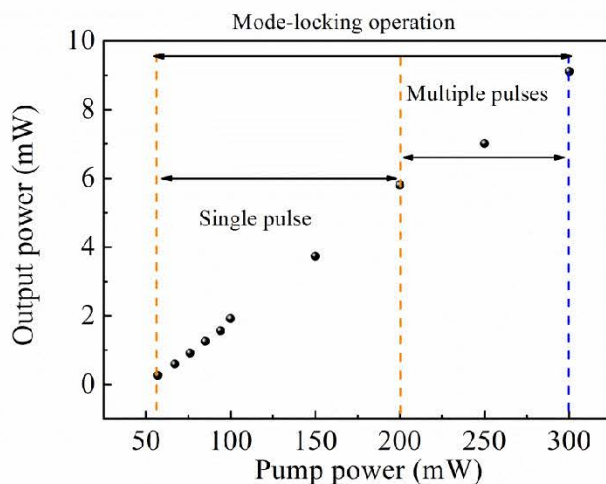


图 5.18 激光输出功率和泵浦功率的关系

Figure 5.18 Output power as a function of incident pump power

图 5.19 为锁模激光器在 100 mW、130 mW、190 mW 泵浦功率下的输出光谱，其中心波长为 1595 nm，3 dB 带宽为 4.05 nm。

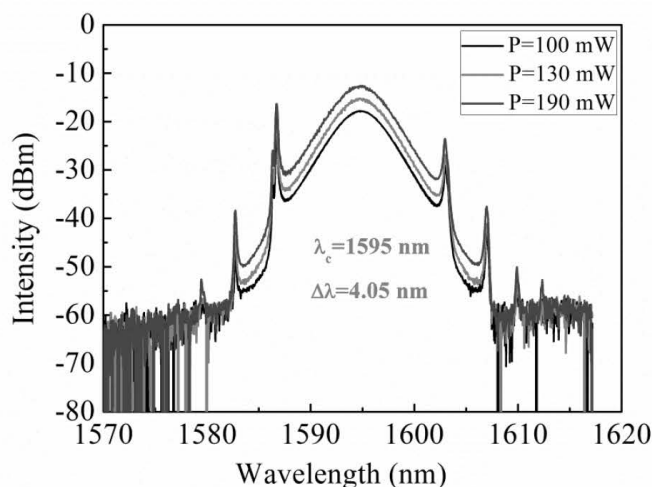


图 5.19 锁模激光器输出脉冲光谱图

Figure 5.19 Spectra of the mode-locked fiber laser

在 190 mW 泵浦功率下，分别用示波器、自相关仪和频谱仪测量了脉冲特性。如图 5.20 所示，锁模脉冲序列展现了良好的强度均匀性，脉冲间隔为 63.1 ns 对应的基本重频为 15.83 MHz，与激光器腔长一致。图 5.21 为输出脉冲的自相关曲线，脉冲为双曲正割型，在该拟合下脉宽为 912 fs，其时间带宽积为 0.435 接近其理论的变换极限 (0.315)。图 5.22 为输出脉冲的基频频谱图，分辨率带宽为 51 Hz，插图为宽带范围的频谱图。通过频谱测量可得输出激光脉冲的信噪比高达 67 dB，因此激光器具有良好的稳定性。对该激光器某一锁模状态进行了 8 小时的监测，中心波长漂移为 0.16 nm，功率浮动为 1.6 dB。

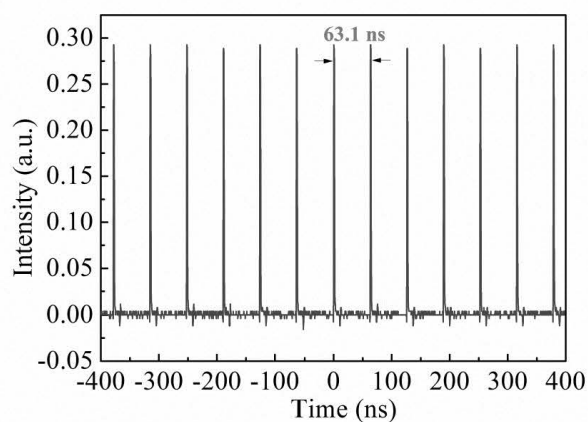


图 5.20 锁模激光器脉冲序列

Figure 5.20 The waveform of the pulse train of the mode-locked fiber laser

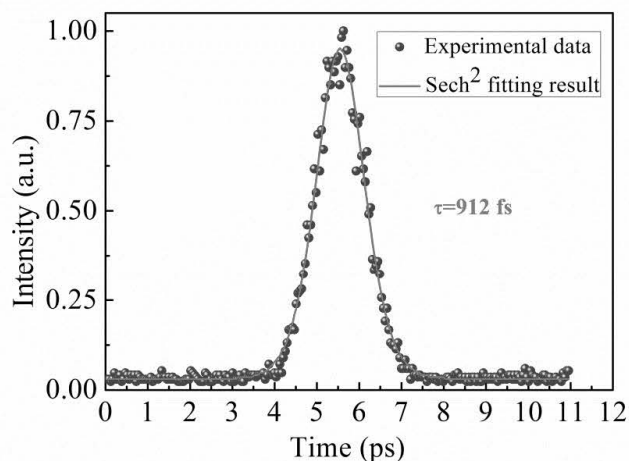


图 5.21 锁模激光器输出脉冲自相关曲线

Figure 5.21 Autocorrelation trace of the mode-locked fiber laser

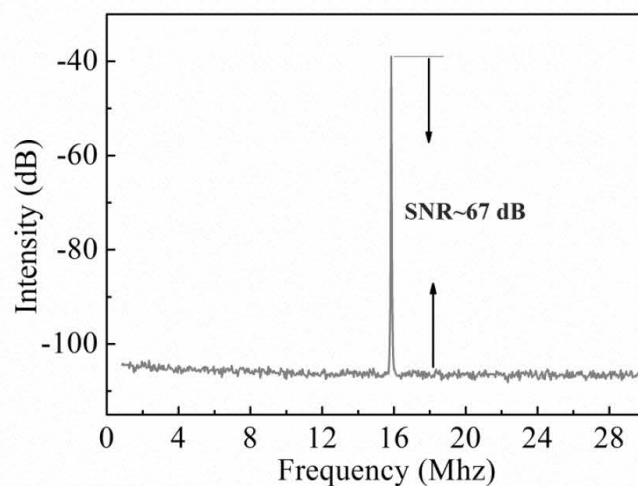


图 5.22 锁模激光器输出脉冲频谱图

Figure 5.22 Radio frequency spectrum of the mode-locked fiber laser

关于该激光器锁模的讨论：

(1) 在本实验中，特意选取了具有较低偏振响应的大角度倾斜光纤光栅以避免激光器 NPR 锁模。在大角度倾斜光纤光栅表面沉积 Fe_3O_4 纳米材料之前，无论如何调节偏振控制器和泵浦功率（最大 300 mW）均无法实现激光器锁模。另外，表面沉积了 Fe_3O_4 纳米材料的大角度倾斜光纤光栅的最大消光比只有 5.6 dB（在锁模波长处则小于 2 dB），对于该激光器腔内的有限非线性，仍不足以实现 NPR 锁模。

(2) 激光器锁模脉冲的中心波长为 1595 nm，并不处于大角度倾斜光纤光

栅的最强耦合波长 1599 nm 和 1605 nm 处。根据图 5.14, 在 1599 nm 处的耦合强度最大为 5.6 dB, 对应 72.5%的耦合效率; 在 1595 nm 处, 通过调节偏振控制器, 其耦合强度理论上可从 0.94 dB 调谐至 1.76 dB, 对应 19.5-33.3%的耦合效率。对于这类可饱和吸收体, 如果泄露的光太少 (<5%), 光与材料作用不够充分, 锁模一般会不稳定; 如果泄露的光太多, 虽然作用足够充分, 但引入过大的损耗, 同样不利于实现激光器锁模。因此, 在 1595 nm 处, 其耦合效率在 19.5%到 33.3%之间, 纳米材料与光的相互作用和激光器腔内增益/损耗达到平衡, 实现了稳定的激光锁模运转。该现象也体现了采用大角度倾斜光纤光栅实现可饱和吸收体的优点, 即大角度倾斜光纤光栅的耦合效率灵活可调节, 更易实现稳定锁模。

(3) 大角度倾斜光纤光栅将光从纤芯耦合至包层, 再利用倏逝场与纳米材料直接相互作用。由于光纤包层相对纤芯具有更大的表面面积, 相比于 D 型光纤、拉锥光纤等利用纤芯倏逝场的器件, 大角度倾斜光纤光栅更有益于实现光与纳米材料的相互作用。另外, 通过合理设计, 大角度倾斜光纤光栅可以具有数十毫米的栅区长度, 同样可以促进光与纳米材料的相互作用。

(4) 基于大角度倾斜光纤光栅的可饱和吸收体的调制深度为 2.46%。对于一般的可饱和吸收体锁模, 调制深度大于 0.5%即可以实现有效的激光器锁模。在文献[167]中, 实现了孤子锁模掺铒光纤激光器, 其可饱和吸收体的调制深度为 0.35%。在文献[168]中, 可饱和吸收体的调制深度为 0.67%。

(5) Fe_3O_4 纳米材料具有较大的三阶非线性极化率 (4.0×10^{-10} esu) 以及数十皮秒的超快时间响应, 有助于腔内非线性积累, 更容易实现激光器锁模。另外, 由于 Fe_3O_4 纳米材料线性吸收较高, 因此锁模的泵浦功率阈值相对较高(60 mW)。

5.3 小结

本章在理论、实验上研究了大角度倾斜光纤光栅的原理及特性, 分析了大角度倾斜光纤光栅轴向周期和不同阶次的 TE 和 TM 模的谐振波长的关系, 研究了大角度倾斜光纤光栅的透射光谱偏振响应特性, 研究了透射光谱受光栅周围介质的影响。另外, 利用大角度倾斜光纤光栅的模式耦合特性, 采用 Fe_3O_4 可饱和吸收纳米材料, 设计并研制了一种全光纤可饱和吸收体。基于大角度倾斜光纤光栅的优点, 该可饱和吸收体展现了良好的性能。实现了基于大角度倾斜光纤光栅可饱和吸收体的锁模光纤激光器并分析了其锁模激光特性。

第6章 Ia型耐高温光纤光栅及在DBR激光的应用研究

在 320℃以上的高温环境下，普通光纤光栅的折射率调制会衰退甚至消失，限制了光纤光栅传感在高温环境下的应用，例如航空航天、化工冶金、石油电力等应用领域。通过对光纤材料、光纤光栅形成机理以及制作光源等多个方面的研究，实现了多种耐高温的光纤光栅，包括：Ia型光纤光栅、II型光纤光栅、再生光纤光栅以及IIa型光纤光栅。本章在掺镱光纤以及掺铒光纤上制作了Ia型光纤光栅，可承受500℃高温，并利用所制作的耐高温光纤光栅实现了分布式布拉格反射激光器（Distributed Bragg Reflector, DBR）激光器，更适用于高温光纤传感。

6.1 Ia型耐高温光纤光栅

6.1.1 Ia型耐高温光纤光栅基本原理

Ia型光纤光栅是在载氢光纤上制作的，由于长时间紫外曝光，氢的膨胀使得OH键各向异性的形成，产生了各向异性应力释放，所以会形成更大的平均折射率变化。这种光纤光栅的谐振波长存在明显的红移，平均折射率变化可以高达 10^{-2} 量级，可以承受500℃ [71, 72]。

具体的原理为：根据第二章的光纤光栅耦合模理论，光纤光栅的折射率变化可以分为直流分量变化和交流分量变化，直流折射率变化为一个光栅周期内的平均有效折射率变化，交流折射率变化为光纤光栅绝对折射率变化。随着对载氢光纤进行不断的曝光，光纤中电子空穴密度变大，折射率的直流和交流分量同时增大，此时光纤光栅的强度不断增加。当电子空穴粒子数饱和时，光纤光栅的强度达到最大值。随后，由于纤芯内的高拉应力使得光栅内直流分量增大，光谱产生红移，同时纤芯体积扩张导致空穴粒子密度降低，交流折射率分量减少，因此在达到饱和之后光纤光栅的强度开始逐渐降低。当光纤光栅的谐振峰不断降低至接近完全擦除后，纤芯中分子氢键的扩张阻止了空穴高密度区的应力释放，使得直流和交流分量再次同时增大，光纤光栅的强度不断增强并发生红移。

6.1.2 Ia型耐高温光纤光栅制作

在掺镱光纤及掺铒光纤上分别制作了Ia型光纤光栅。光纤均在80℃高温载

氢，气压为 100 bar，载氢时间为 48 小时。

采用的掺铒光纤为烽火通信公司定制的高掺铒光纤，纤芯直径为 6.8 μm ，包层直径为 125 μm ，数值孔径为 0.174，975 nm 处的吸收系数为 60 dB/m。相位掩模板的周期为 733.79 nm，对应光纤光栅的波长为 1 μm 波段。光纤光栅制作系统已在第三章介绍。紫外连续光的功率设置为 65 mW，光束扫描速度为 50 $\mu\text{m}/\text{s}$ ，扫描长度为 3 mm。光纤光栅的透射谱由光谱仪（Yokogawa AQ6370D）和 1 μm 波段 ASE 光源测量。

Ia 型掺铒光纤光栅制作过程中的透射光谱演化如图 6.1 所示，可以分为三个阶段。在第一个阶段，光栅强度不断增加，并在 7 分钟紫外光曝光后达到饱和，强度为 41.25 dB（反射率 99.99%），此时光纤光栅为 IH 型光纤光栅。在该阶段随着光纤光栅的有效折射率的增加，其波长向长波漂移 0.26 nm。在第二个阶段，随着紫外光的持续曝光，光纤光栅的强度开始逐渐降低。经过约 15 分钟，该强度降低至 15 dB，波长向长波方向继续漂移 0.41 nm。在第三个阶段，光纤光栅的强度不再降低，反而持续增加，且波长继续发生红移。经过 40 分钟的紫外光曝光，光纤光栅强度最终达到 38.5 dB（反射率 99.98%），中心波长约为 1070.5 nm。经过退火后，其中心波长约为 1069.6 nm。

掺铒光纤为英国 Fibercore 公司的 I-25 光纤，纤芯直径为 3 μm ，包层直径为 125 μm ，数值孔径为 0.23，截止波长为 900 nm，980 nm 处的吸收系数为 35 dB/m。相位掩模板的周期为 1071.92 nm，对应光纤光栅的波长为 1.5 μm 波段。紫外连续光的功率设置为 80 mW，光束扫描速度为 50 $\mu\text{m}/\text{s}$ ，扫描长度为 6 mm。光纤光栅的透射谱由光谱仪和超连续光源（NKT SuperK Compact）测量。

Ia 型掺铒光纤光栅制作过程中的透射光谱演化如图 6.2 所示。和 Ia 型掺铒光纤的制作过程类似，在第一个阶段，经过 30 分钟的紫外光曝光，光栅强度不断增加至 33 dB（反射率 99.95%），波长向长波漂移 0.56 nm。在第二个阶段，经过 150 分钟的紫外光曝光，光纤光栅的强度最终降低至 2.1 dB，波长向长波方向继续漂移 1.22 nm。在第三个阶段，经过 210 分钟的紫外光曝光，光纤光栅强度最终达到 28.3 dB（反射率 99.95%），波长向长波方向漂移 0.52 nm，中心波长约为 1555.7 nm。经过退火后，其中心波长约为 1555.5 nm。

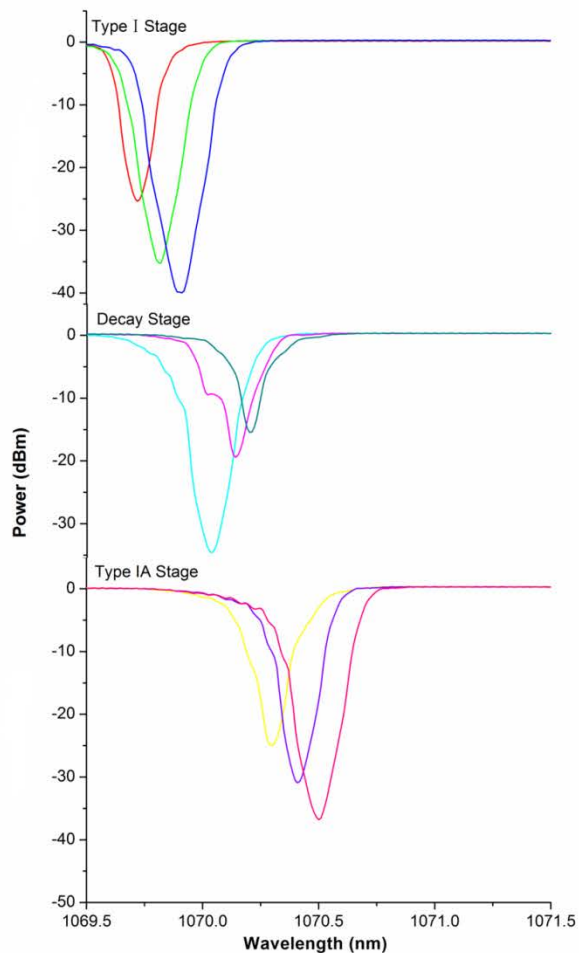


图 6.1 Ia 型掺镱光纤光栅制作过程中的透射光谱演化

Figure 6.1 Transmission spectra evaluation during the fabrication of type Ia grating in Yb-doped fiber

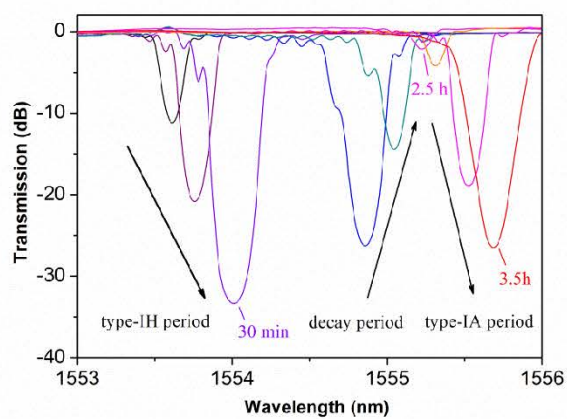


图 6.2 Ia 型掺铒光纤光栅制作过程中的透射光谱演化

Figure 6.2 Transmission spectra evaluation during the fabrication of type Ia grating in ER-doped fiber

6.1.3 Ia 型掺镜光纤光栅高温测试

将所制作的 Ia 型掺镜光纤光栅放置在加热炉中，温度由 25℃ 升至 500℃，升温间隔为 50℃，每个温度持续 30 分钟，其反射强度变化如图 6.3 所示。光纤光栅的反射强度由 32.04 dB(反射率 99.94%)最终降低至 28.4 dB(反射率 99.86%)，在 500℃ 时，光纤光栅仍保持着较高的反射率性能，没有被高温擦除。当温度继续提高，光纤光栅的反射强度急剧降低，600℃ 时，约为 5 dB(反射率 68%)，700℃ 时光纤光栅几乎被完全擦除。

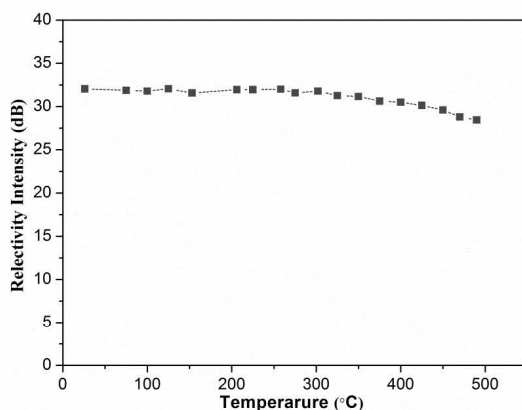


图 6.3 Ia 型掺镜光纤光栅反射强度随温度的变化

Figure 6.3 Reflectivity intensity of the type Ia Yb-doped fiber grating at different temperature

如图 6.4 所示，经过 120 分钟后，光纤光栅的反射强度最终稳定在 26 dB(反射率 99.75%)，其中心波长较为稳定，只有小于 0.02 nm 的漂移量。光纤光栅的高反射率有助于提高耐高温 DBR 光纤激光器的输出功率以及信噪比，并进而提升主动光纤传感系统的精度。图 6.5 为该 Ia 型掺镜光纤光栅中心波长随温度的变化。随着温度提高，光纤纤芯产生膨胀，光纤光栅的周期相应增加，因此导致中心波长向长波漂移。该光纤光栅的温度灵敏度为 9.1 pm/°C，中心波长随温度线性变化。

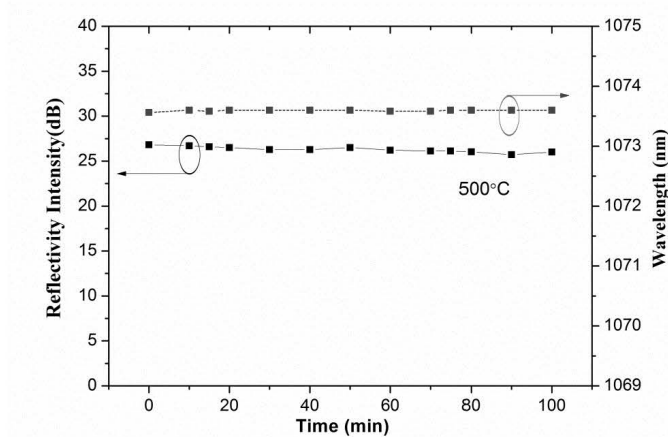


图 6.4 500°C 下 Ia 型掺镜光纤光栅反射特性在 2 小时内的变化

Figure 6.4 Reflectivity change of the type Ia Yb-doped fiber grating at 500°C for 2 hours

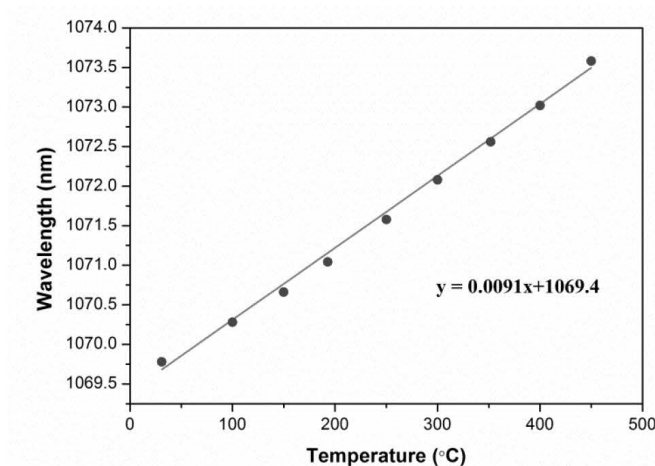


图 6.5 Ia 型掺镜光纤光栅中心波长随温度的变化

Figure 6.5 Central wavelength of the type Ia Yb-doped fiber grating versus temperature

6.2 基于耐高温光纤光栅的 DBR 光纤激光器研究

6.2.1 耐高温 DBR 光纤激光器研制

基于光纤激光器的主动式光纤传感不但具有被动式光纤光栅传感的固有自我参照和多路复用特点, 相比之下, 在灵敏度、波长分辨率、精度等方面还具有更高的性能[92]。DBR 光纤激光具有紧凑结构、小体积、单纵模以及高信噪比, 常被用于这些主动传感系统中[169-173]。

实验研制的耐高温 DBR 激光器结构如图 6.6 所示, 在单根掺镜光纤上制作两个 Ia 型光纤光栅形成激光谐振腔, 泵浦光源为 980 nm 半导体激光器, 通过 980/1060 WDM 注入掺镜光纤中。如图 6.7 所示, 左边光纤光栅为上文提到的高

反射光纤光栅，光栅长度为 3 mm，在其临近位置 4 mm 处，采用同样的方法制作另一根 Ia 型光纤光栅，光栅长度仍为 3 mm，该激光器的总腔长仅为 10 mm。

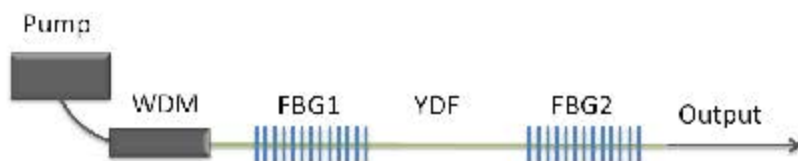


图 6.6 耐高温 DBR 光纤激光器结构示意图

Figure 6.6 Setup of DBR fiber laser with high temperature resistance



图 6.7 耐高温 DBR 光纤激光器实物图

Figure 6.7 Photograph of DBR fiber laser with high temperature resistance

当泵浦功率为 30 mW 时，该光纤激光器的输出光谱如图 6.8 所示。输出功率为-3.7 dBm，信噪比为 54 dB，线宽为 16 pm。

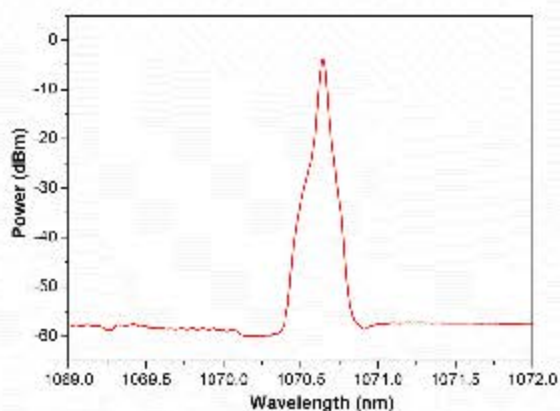


图 6.8 耐高温 DBR 光纤激光器输出光谱

Figure 6.8 Spectrum of DBR fiber laser with high temperature resistance

6.2.2 耐高温 DBR 光纤激光器高温测试

将耐高温 DBR 光纤激光器放置于加热炉中, 温度由 25℃ 逐渐提升至 500℃, 并在 500℃ 保持 1 小时, 随后将温度降至 450℃ 并保持 2 小时。在 450℃ 下每隔 5 分钟记录一次激光器输出光谱, 其输出功率和中心波长的变化如图 6.9 所示。激光器展现了较好的高温承受能力, 并具有稳定的输出光谱, 输出功率标准差为 0.071, 中心波长波动小于 0.01 nm。

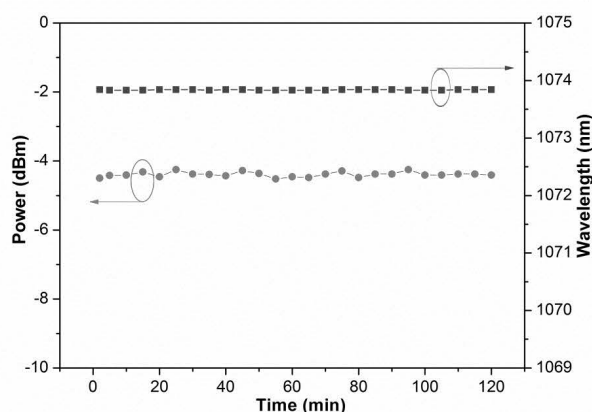


图 6.9 耐高温 DBR 光纤激光器在 450℃ 下的输出稳定性

Figure 6.9 Stability of DBR fiber laser with high temperature resistance at 450°C

将温度由 450℃ 降至 100℃, 激光器的输出光谱变化如图 6.10 所示。随着温度降低, 激光器的中心波长向短波漂移。另外在 100-450℃ 温度下, 该激光器的信噪比均大于 50 dB, 有助于实现极端条件下的长距离传感。

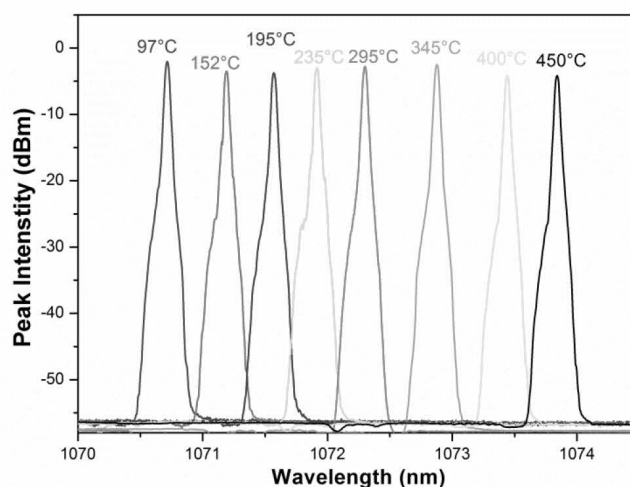


图 6.10 不同温度下激光器输出光谱

Figure 6.10 The spectra of the laser at different temperature

该激光器输出中心波长随温度的变化如图 6.11 所示，激光器的温度测试结果和耐高温光纤光栅的测试结果基本一致。基于 Ia 型光纤光栅的耐高温 DBR 激光器的温度灵敏度为 $8.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ，低于基于 IIa 型光纤光栅的耐高温 DBR 激光器的温度灵敏度（如文献[93]中，温度灵敏度为 $12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ）。因此，当应用该激光器在温度应力交叉传感系统中时，可以引入相对较少的串音误差。

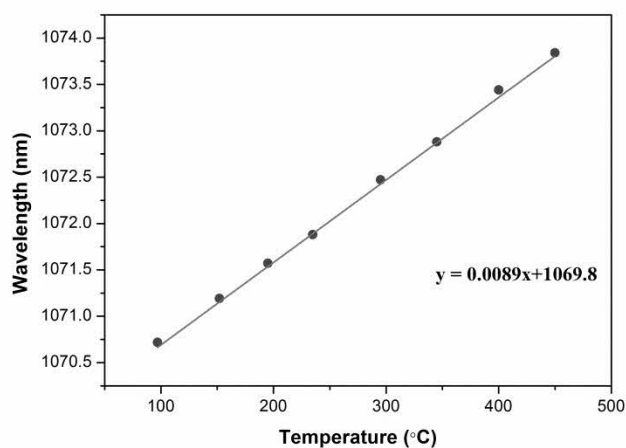


图 6.11 激光器中心波长随温度的变化

Figure 6.11 Central wavelength of the DBR laser versus temperature

6.3 小结

本章介绍了 Ia 型耐高温增益光纤光栅的研制，在掺镱光纤及掺铒光纤上分别制作了可承受 500°C 高温的光纤光栅。基于所制作的光纤光栅实现了 $1 \mu\text{m}$ 波段的耐高温 DBR 超短腔光纤激光器，该激光器腔长仅为 10 mm ，在 450°C 下输出稳定，信噪比大于 50 dB ，温度灵敏度为 $8.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。该激光器有助于实现应用在高温环境下的高精度、长距离光纤传感系统。

第7章 总结与展望

7.1 论文总结

光纤光栅作为一种无源器件具有光纤的固有特点如全光纤化、体积小、插损低、可靠性高、易于集成、极化不敏感、耐腐蚀以及抗干扰等，同时可以实现滤波、反射、色散管理、模式耦合、外界环境（如温度、应力、负载、折射率等）响应等多个功能，被广泛应用在光纤激光、光纤传感以及光纤通信等领域。特种光纤光栅具有更多的功能、更高的性能以及更苛刻环境的适应性，作为一种关键核心器件，对于相关应用领域的研究具有重要的推动作用。

本论文紧密围绕特种光纤光栅及在光纤激光器中的应用，开展了系统的研究并取得了多项创新成果：

1. 在特种光纤光栅的研制方面：

设计并搭建了掩模板扫描及双光束相干扫描两种光纤光栅刻写系统，这种扫描刻写技术具有更为精准的光栅刻写参数并且可以实现较长光纤光栅的制作；开展特种光纤光栅尤其是倾斜光纤光栅刻写技术的研究，成功研制多种高性能特种光纤光栅，主要包括：45度倾斜光纤光栅、大角度倾斜光纤光栅、Ia型耐高温增益光纤光栅、相对小周期长周期光纤光栅、特殊波段光纤光栅等。

2. 在光纤光栅的机理及特性方面：

介绍了光纤光栅的耦合模理论，包括光纤布拉格光栅耦合模理论、倾斜光纤光栅耦合模理论以及全矢量复耦合模理论；理论分析了45度倾斜光纤光栅的起偏原理及偏振相关损耗特性，系统研究了大角度倾斜光纤光栅的模式耦合特性，分析了其双峰透射谱特性，为倾斜光纤光栅的应用研究奠定基础；分析了Ia型掺镜光纤光栅耐高温原理，测试了其高温特性及温度响应。

3. 在光纤激光器应用方面：

1) 利用45度倾斜光纤光栅制作了具有0.164 nm自由光谱范围的偏振干涉滤波器，相比于传统的梳状滤波器，实现了全光纤结构且滤波间隔灵活可调节；首次利用这种基于45度倾斜光纤光栅的偏振干涉滤波器实现了全光纤多波长激光器，输出光谱具有良好的平坦度和均匀性，3 dB范围内具有82个波长，可进一步应用在光纤通信、光纤传感、光谱成像、微波光子学、仪器设备测量等多个

领域；另外，理论分析了双波长激光的产生机理，在实验上利用具有高消光比的 45 度倾斜光纤光栅实现了单偏振双波长锁模光纤激光器。这种单偏振激光在光纤传感、非线性变频、光参量装置、相干合束等领域具有较大的应用潜力。

2) 首次提出基于大角度倾斜光纤光栅模式耦合特性的可饱和吸收体结构。通过在大角度倾斜光栅表面沉积可饱和吸收纳米材料，制作了一种全光纤可饱和吸收器件，并利用该器件成功实现了稳定的锁模激光输出。基于大角度倾斜光纤光栅的可饱和吸收器件具有多个优点：光纤包层具有较大的表面积且光栅长度较长，纳米材料可以和光充分作用；大角度倾斜光纤光栅具有滤波作用，可以抑制激光器腔内的模式竞争，同时控制输出脉冲的波长范围；大角度倾斜光纤光栅的耦合效率可以通过改变偏振态在一定范围内调谐，因此可以控制光与纳米材料的作用程度，达到激光器腔内增益和损耗的平衡，有助于实现激光器锁模；大角度倾斜光纤光栅不破坏光纤的物理结构，具有更高的稳定性，可承受更高的功率，且没有熔接问题、插入损耗低。

3) 通过在掺镱光纤中制作一对 Ia 型耐高温光纤光栅，首次实现了 1 μm 波段耐高温 DBR 超短腔光纤激光器，腔长仅为 10 mm，激光光谱线宽为 16 pm。该激光器在 450 $^{\circ}\text{C}$ 高温下具有稳定的信噪比大于 50 dB 的激光输出，对于工作在高温苛刻环境中的高精度、长距离传感系统有着重要作用。

7.2 展望

特种光纤光栅具有相对复杂的机理、较多的种类以及更广泛的应用，仍需更深入、更全面的探索和研究。

在未来的工作中将开展以下研究：

1. 45 度倾斜光纤光栅的研究主要是基于偏振特性展开，对于其辐射特性的研究较少。然而利用 45 度倾斜光纤光栅辐射模，45 度倾斜光纤光栅可以作为一种理想的全光纤的衍射光栅和全光纤偏振分束器。因此，将开展 45 度倾斜光纤光栅辐射特性的研究，实现高斯分布辐射光束的 45 度倾斜光纤光栅，并探索其新的应用。

2. 大角度倾斜光纤光栅的回耦机制仍需要深入研究，如何实现宽带的模式耦合也是大角度倾斜光纤光栅需要解决的关键问题。因此，将基于耦合模理论更深入、更全面地研究大角度倾斜光纤光栅耦合特性，探索实现宽带耦合的有效方

法，另外利用大角度倾斜光纤光栅的模式耦合特性以及少量模/多模光纤高阶模式的色散特性，制作具有全光纤结构、色散范围大、灵活可调节的色散管理器件。

3. 单模光纤的局限性以及多模复杂非线性光学的重大研究进展再次激发了多模光纤的潜力，对于多模光纤的研究近年已多次被 *Nature*、*Science* 等期刊报道，利用多模光纤实现高能量超短脉冲激光输出已然成为重要研究方向及热点。因此，将开展多种多模光纤光栅的制作及特性研究，对于高能量多模光纤激光器研究具有重要的作用。

参考文献

- [1] Hill KO, Fujii Y, Johnson DC, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [2] Giles CR. Lightwave applications of fiber bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1391-1404.
- [3] Chen WT, Wang LA. Laser-to-fiber coupling scheme by utilizing a lensed fiber integrated with a long-period fiber grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(5): 501-503.
- [4] Chen WT, Wang LA. Optical coupling between single-mode fibres by utilising long-period fibre gratings[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(5): 421-423.
- [5] Rao YJ, Lobo Ribeiro AB, Jackson DA, et al. Combined spatial- and time-division-multiplexing scheme for fiber grating sensors with drift-compensated phase-sensitive detection[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(20): 2149-2151.
- [6] Meng H, Shen W, Zhang G, et al. Fiber Bragg grating-based fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 150(1): 226-229.
- [7] Chen G, Liu L, Jia H, et al. Simultaneous pressure and temperature measurement using Hi-Bi fiber Bragg gratings[J]. *Optics Communications*, 2003, 228(1-3): 99-105.
- [8] Liu Y, Williams JAR, Bennion I. Optical bend sensor based on measurement of resonance mode splitting of long-period fiber grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(5): 531-533.
- [9] Wang LA, Lin CY, Chern GW. A torsion sensor made of a corrugated long period fibre grating[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(7): 793-799.
- [10] Shu X, Zhang L, Bennion I. Fabrication and characterisation of ultra-long-period fibre gratings[J]. *Optics Communications*, 2002, 203(3-6): 277-281.
- [11] Chen XF, Zhou KM, Zhang L, et al. Optical chemsensors utilizing long-period fiber gratings UV-inscribed in D-fiber with enhanced sensitivity through cladding etching[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(5): 1352-1354.
- [12] Caucheteur C, Shevchenko Y, Shao LY, Wuilpart M, and Albert J. High resolution interrogation of tilted fiber grating SPR sensors from polarization properties measurement[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1656-1664.
- [13] Chan CF, Chen C, Jafari A, Laronche A, Thomson DJ, Albert J. Optical fiber refractometer using narrowband cladding-mode resonance shifts[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(7): 1142-1149.
- [14] Guo T, Shao L, Tam HY, Krug PA, and Albert J. Tilted fiber grating accelerometer incorporating an abrupt biconical taper for cladding to core recoupling[J]. *Optics Express*,

- 2009, 17(23): 20651-20660.
- [15] Glebov L, Smirnov V, Rotari E, Cohanoschi I, Glebova L, Smolski O, Lumeau J, Lantigua C, and Glebov A. Volume-chirped Bragg gratings: monolithic components for stretching and compression of ultrashort laser pulses[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 051514.
- [16] Zhang Z, Popa D, Wittwer VJ, Milana S, Hasan T, Jiang Z, Ferrari AC, and Ilday FO. All-fiber nonlinearity- and dispersion-managed dissipative soliton mode-locked laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(24): 241107.
- [17] Ortaç B, Plötner M, Limpert J, et al. Self-starting passively mode-locked chirped-pulse fiber laser[J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 16794.
- [18] Wang HS, Wang YS, Zhao W, et al. All-fiber mode-locked nanosecond laser employing intracavity chirped fiber gratings[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 7263-7268.
- [19] Zhang L, El-Damak A R, Feng Y, et al. Experimental and numerical studies of mode-locked fiber laser with large normal and anomalous dispersion[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12014.
- [20] Peng JS, Zhan L, Gu ZC, and Luo SY. High-energy all-fiber soliton laser employing a chirped fiber Bragg grating[J]. *Optics Communications*, 2013, 294(5): 246-249.
- [21] Duval S, Olivier M, Bernier M, Vallée R, Piché M. Ultrashort pulses from an all-fiber ring laser incorporating a pair of chirped fiber Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 989-992.
- [22] Woodward RI, Kelleher EJR, Runcorn TH, Lorange S, Popa D, Wittwer VJ, Ferrari AC, Popov SV, Kashyap R, and Taylor JR. Fiber grating compression of giant-chirped nanosecond pulses from an ultra-long nanotube mode-locked fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(3): 387-390.
- [23] Meltz G, Morey WW, Glenn WH. In-fibre Bragg grating tap[C]. *Optical Fibre Communications*, San Francisco, California, USA, 1990, TuG1.
- [24] Westbrook PS, Strasser TA. In-line polarimeter using blazed fibre gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(10): 1352-1354.
- [25] Mihailov S, Walker RB, Stocki TJ, and Johnson DC. Fabrication of a tilted fiber-grating polarization-dependent loss equalizer[C]. *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides*, Stresa, Italy, 2001, BFD2.
- [26] Zhou KM, George S, Chen XF, Zhang L, and Bennion I. High extinction ratio in-fiber polarizers based on 45° tilted fiber Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(11): 1285-1287.
- [27] Lu YC, Huang WP, and Jian SS. Full vector complex coupled mode theory for tilted fiber gratings[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 713-726.
- [28] Yan ZJ, Mou CB, Zhou KM, Chen XF, and Zhang L. UV-Inscription, polarization-dependant loss characteristics and applications of 45° tilted fiber gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(18): 2715-2724.

- [29] Yan ZJ, Zhou KM, and Zhang L. In-fiber linear polarizer based on UV-inscribed 45° tilted grating in polarization maintaining fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3819-3821.
- [30] Mou CB, Zhou KM, Zhang L, and Bennion I. Characterization of 45° -tilted fiber grating and its polarization function in fiber ring laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(10): 1905-1911.
- [31] Mou C, Wang H, Bale BG, Zhou KM, Zhang L, and Bennion I. All-fiber passively mode-locked femtosecond laser using a 45° -tilted fiber grating polarization element[J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 18906-18911.
- [32] Liu XL, Wang HS, Yan ZJ, Wang YS, Zhao W, Zhang W, Zhang L, Yang Z, Hu XH, Li XH, Shen DY, Li C, and Chen GD. All-fiber normal-dispersion single-polarization passively mode-locked laser based on a 45° -tilted fiber grating[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19000-19005.
- [33] Liu XL, Wang HS, Wang YS, Zhao W, Zhang W, Tan XF, Yang Z, Shen DY, Li C, Yan ZJ, Zhang L, and Chen GD. Bound dissipative-pulse evolution in the all-normal dispersion fiber laser using a 45° tilted fiber grating[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(9): 095103.
- [34] Zhang ZX, Mou CB, Yan ZJ, Zhou KM, Zhang L, and Turitsyn S. Sub-100 fs mode-locked erbium-doped fiber laser using a 45° -tilted fiber grating[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28297-28303.
- [35] Li JF, Yan ZJ, Sun ZY, Luo HY, He YL, Li Z, Liu Y, and Zhang L. Thulium-doped all-fiber mode-locked laser based on NPR and 45° -tilted fiber grating[J]. *Optics Express*, 2014, 20(25): 31020-31028.
- [36] Zhang ZX, Yan ZJ, Zhou KM, and Zhang L. All-fiber 250MHz fundamental repetition rate pulsed laser with tilted fiber grating polarizer[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(4): 045102.
- [37] Wang TX, Yan ZJ, Mou CB, Liu ZY, Liu YQ, Zhou KM, and Zhang L. Narrow bandwidth passively mode locked picosecond Erbium doped fiber laser using a 45° tilted fiber grating device[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16708-16714.
- [38] Wang TX, Yan ZJ, Mou CB, Zhou KM, and Zhang L. Stable nanosecond passively Q-switched all-fiber erbium-doped laser with a 45° tilted fiber grating[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3583-3588.
- [39] Zou CH, Wang TX, Yan ZJ, Huang QQ, Mohammed Alaraimi, Aleksey Rozhin, and Chengbo Mou. Wavelength-tunable passively mode-locked Erbium-doped fiber laser based on carbon nanotube and a 45° tilted fiber grating[J]. *Optics Communications*, 2018, 406: 151-157.
- [40] Wang TX, Yan ZJ, Huang QQ, Zou CH, Mou CB, Zhou KM, and Zhang L. Mode-locked erbium-doped fiber lasers using 45° tilted fiber grating[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1101506.
- [41] Lu CA, Moore GT. Quasi-phase matching all-fiber isolator[J]. *Advances in OptoElectronics*, 2010, 2010: 179813.
- [42] Lu CA, Moore GT. All-fiber isolator at multi-watt level operation[C]. OSA, Advanced

- Solid-State Photonics, Istanbul, Turkey, 2011, AMB7.
- [43] Yan ZJ, Mou CB, Wang HS, Zhou KM, Wang YS, Zhao W, et al. All-fiber polarization interference filters based on 45°-tilted fiber gratings[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(3): 353-355.
- [44] Yan ZJ, Wang HS, Zhou KM, Wang YS, Li C, Zhao W, and Zhang L. Soliton mode locking fiber laser with an all-fiber polarization interference filter[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4522-4524.
- [45] Yan ZJ, Wang HS, Zhou KM, et al. Broadband Tunable All-Fiber Polarization Interference Filter Based on 45° Tilted Fiber Gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(1): 94-98.
- [46] Zhou KM, Cheng XF, Yan ZJ, Adedotun A, and Zhang L. Optical Spectrum Analyzer using a 45° tilted fiber grating[C]. *Advanced Photonics Congress*, Colorado Springs, Colorado, 2012, BW2E.
- [47] Yan ZJ, Adebayo A, Zhou KM, Zhang L, Fu H, and Robinson D. Power Tapping Function in Near Infra-Red Region Based on 45° Tilted Fiber Gratings[J]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 3: 5.
- [48] Remund S, Bossen A, Chen XF, Wang L, Adebayo A, Zhang L, et al. Cost-effective optical coherence tomography spectrometer based on a tilted fiber Bragg grating[C]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2014, 8938(1): 89381E.
- [49] Sun NH, Lei SC, Liu YW, et al. Radiation in 45-degree tilted Fiber Bragg Gratings[C]. *Lasers & Electro-optics Pacific Rim*, Busan South Korea, 2015, 28F2.
- [50] Qin H, Yan ZJ, Sun QZ, et al. Theoretical analysis of diffraction grating based on 45 degrees-tilted fiber gratings[C]. *2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC)*, IEEE, Singapore, 2017.
- [51] Zhou KM, Zhang L, Chen XF, and Bennion I. Optic sensors of high refractive-index responsivity and low thermal cross sensitivity that use fiber Bragg gratings of >80° tilted structures[J]. *Optics Letters*, 2016, 31(9): 1193-1195.
- [52] Zhou KM, et al. Low thermal sensitivity grating devices based on Ex-45 degrees tilting structure capable of forward-propagating cladding modes coupling[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 5087-5094.
- [53] Chen XF, Zhou KM, Zhang L, and Bennion I. In-fiber twist sensor based on a fiber Bragg grating with 81 tilted structure[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(24): 2596-2598.
- [54] Suo R, Chen XF, Zhou KM, Zhang L, and Bennion I. In-fibre directional transverse loading sensor based on excessively tilted fibre Bragg gratings[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(3): 034015.
- [55] Luo BB, Wu SX, Zhang ZH, Zou WG, Shi SH, Zhao MF, Zhong NB, Liu Y, Zou X, Wang LL, Chai WN, Chuanmin Hu, and Lin Zhang. Human heart failure biomarker immunosensor based on excessively tilted fiber gratings[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(1): 57-67.

- [56] Jiang BQ, Zhou KM, Wang CL, Sun QZ, Yin GL, et al. Label-free glucose biosensor based on enzymatic graphene oxide-functionalized tilted fiber grating[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 254: 1033-1039.
- [57] Yan ZJ, Mou CB, Sun ZY, Zhou KM, Wang HS, Wang YS, Zhao W, and Zhang L. Hybrid tilted fiber grating based refractive index and liquid level sensing system[J]. *Optics Communications*, 2015, 351:144-148.
- [58] Yan ZJ, Sun ZY, Zhou KM, Luo BB, Li JF, Wang HS, et al. Numerical and Experimental Analysis of Sensitivity-Enhanced RI Sensor Based on Ex-TFG in Thin Cladding Fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(14): 3023-3027.
- [59] Badmos AA, Sun QZ, Yan ZJ, et al. High-sensitivity refractive index sensor based on large-angle tilted fiber grating with carbon nanotube deposition[C]. *Proc. of SPIE, Brussels, Belgium*, 2016, 9899.
- [60] Jiang BQ, Yin GL, Zhou KM, et al. Graphene-induced unique polarization tuning properties of excessively tilted fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(23): 5450-5453.
- [61] Yan ZJ, Sun QZ, Wang CL, Sun Z, Mou CB, Zhou KM, Liu D, and Zhang L. Refractive index and temperature sensitivity characterization of excessively tilted fiber grating[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3336-3346.
- [62] Lu HF, Luo BB, Shi SH, et al. Study on spectral and refractive index sensing characteristics of etched excessively tilted fiber gratings[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2590-2596.
- [63] Li ZH, Shen J, Ji QP, et al. Tuning the resonance of polarization-degenerate $LP_{1,l}$ cladding mode in excessively tilted long period fiber grating for highly sensitive refractive index sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(3): 397-405.
- [64] Shen FC, Wang CL, Sun ZY, Zhou Km, Zhang L, and Shu XW. Small-period long-period fiber grating with improved refractive index sensitivity and dual-parameter sensing ability[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 199-202.
- [65] Shen FC, Zhou KM, Gordon N, Zhang L, and Shu XW. Compact eccentric long period grating with improved sensitivity in low refractive index region[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15729-15736.
- [66] Mou CB, Saffari P, Fu HY, Zhou KM, Zhang L, and Bennion I. Single- and dual-wavelength switchable erbium-doped fiber ring laser based on intracavity polarization selective tilted fiber gratings[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(18): 3455-3459.
- [67] Zhang ZX, Mou CB, Yan ZJ, Wang YJ, Zhou KM, and Zhang L. Switchable dual-wavelength Q-switched and mode-locked fiber lasers using a large-angle tilted fiber grating[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1353-1360.
- [68] Zhang ZX, Mou CB, Yan ZJ, Sun ZY, and Zhang L. Orthogonally polarized bright-dark pulse pair generation in mode-locked fiber laser with a large-angle tilted fiber grating[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122: 161.

- [69] Liu Y, Williams JAR, Zhang L, and Bennion I. Abnormal spectral evolution of fiber Bragg gratings in hydrogenated fibers[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(8): 586-588.
- [70] Shu XW, Liu Y, Zhao DH, Gwandu B, Floreani F, Zhang L, and Bennion I. Dependence of temperature and strain coefficients on fiber grating type and its application to simultaneous temperature and strain measurement[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 701-703.
- [71] Canning J, Deyerl HJ, Sørensen HR, et al. Ultraviolet-induced birefringence in hydrogen-loaded optical fiber[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(5): 053104.
- [72] Canning J. Fibre gratings and devices for sensors and lasers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(4): 275-289.
- [73] Dong L, Liu WF, Reekie L. Negative-index gratings formed by a 193-nm excimer laser[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(24): 2032-2034.
- [74] Riant I, Haller F. Study of the photosensitivity at 193 nm and comparison with photosensitivity at 240 nm influence of fiber tension: type IIa aging[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1464-1469.
- [75] Groothoff N, Canning J. Enhanced type IIA gratings for high-temperature operation[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(20): 2360-2362.
- [76] Pissadakis S, Livitziis M, Tsibidis GD, et al. Type IIA grating inscription in a highly nonlinear microstructured optical fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(4): 227-229.
- [77] Prakash O, Kumar J, Mahakud R, et al. Enhanced temperature ($\sim 800^{\circ}\text{C}$) stability of type-IIa FBG written by 255 nm beam[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(1): 93-95.
- [78] Ran Y, Jin L, Gao S, et al. Type IIa Bragg gratings formed in microfibers[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3802-3805.
- [79] Fokine M. Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(8): 1759-1765.
- [80] Bandyopadhyay S, Canning J, Stevenson M et al. Ultrahigh-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(16): 1917-1919.
- [81] Lindner E, Chojetzki C, Brückner S, et al. Thermal regeneration of fiber Bragg gratings in photosensitive fibers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12523-12531.
- [82] Bandyopadhyay S, Canning J, Biswas P, Stevenson M, and Dasgupta K. A study of regenerated gratings produced in germanosilicate fibers by high temperature annealing[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1198-1206.
- [83] Chen T, Chen R, Jewart C, Zhang B, Cook K, Canning J, and Chen KP. Regenerated gratings in air-hole microstructured fibers for high-temperature pressure sensing[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3542-3544.
- [84] Wang T, Shao LY, Canning J, and Cook K. Temperature and strain characterization of regenerated gratings[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(3): 247-249.

- [85] Askins CG, Tsai TE, Williams GM, et al. Fiber Bragg reflectors prepared by a single excimer pulse[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(11): 833-835.
- [86] Mihailov SJ, Smelser CW, Lu P, Walker RB, Grobncic D, Ding HM, Henderson G, and Unruh J. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(12): 995-997.
- [87] Åslund ML, Jovanovic N, Groothoff N, et al. Photodarkening study of gratings written into rare-earth doped optical fibres using a femtosecond aser[C]. *Microelectronics, MEMS, and Nanotechnology*, International Society for Optics and Photonics, Canberra, Australia, 2007, 68000V.
- [88] Åslund ML, Jovanovic N, Groothoff N, et al. Large diffractive scattering losses in the visible region produced by femtosecond laser written Bragg gratings[C]. *Joint Conference of the Opto-Electronics and Communications Conference and the Australian Conference on Optical Fibre Technology*, Sydney, Australia, 2008, 4610512.
- [89] Liao CR, and Wang DN. Review of femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings for high temperature sensing[J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3(2): 97-101.
- [90] Lai Y, Martinez A, Khrushchev I, and Bennion I. Distributed Bragg reflector fiber laser fabricated by femtosecond laser inscription[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(11): 1672-1674.
- [91] Guan BO, Zhang Y, Wang HJ, Chen D, and Tam HY. High-temperature-resistant distributed Bragg reflector fiber laser written in Er/Yb co-doped fiber[J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 2958-2964.
- [92] Chen RZ, Yan AD, Li MS, Chen T, Wang QQ, Canning J, Cook K, and Chen KP. Regenerated distributed Bragg reflector fiber lasers for high-temperature operation[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2490-2492.
- [93] Ran Y, Feng FR, Liang YZ, Jin L, and Guan BO. Type IIa Bragg grating based ultra-short DBR fiber laser with high temperature resistance[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(24): 5706-5709.
- [94] Kogelnik H, Shank CW. Coupled wave theory of distributed feedback lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(5): 2327-2335.
- [95] Yariv A. Coupled-mode theory for guided-wave optics[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1973, 9(9): 919-933.
- [96] Erdogan T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters: Errata[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(8): 1760-1773.
- [97] Lee KS, Erdogan T. Fiber mode coupling in transmissive and reflective tilted fiber gratings[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(9): 1394-1404.
- [98] Lu YC, Huang WP, Jian SS. Influence of mode loss on the feasibility of grating-assisted optical fiber surface plasmon resonance refractive index sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(21): 4804-4808.

- [99] Lu YC, Geng R, Wang C, et al. Polarization Effects in Tilted Fiber Bragg Grating Refractometers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(11): 1677-1684.
- [100] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [101] Lu YC, Huang WP, and Jian SS. Full vector complex coupled mode theory for tilted fiber gratings[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 713-726.
- [102] Li Y, Froggatt M, and Erdogan T. Volume current method for analysis of tilted fiber gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(10): 1580-1591.
- [103] Hill KO, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [104] Meltz G, Morey WW, Glenn WH. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15): 823-825.
- [105] Hill KO, Malo B, Vineberg KA, et al. Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(16): 1270-1272.
- [106] Hill KO, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [107] Mihailov SJ, Walker RB, Lu P, Ding H, Dai X, Smelser C, and Chen L. UV-Induced polarization-dependant loss (PDL) in tilted fiber Bragg grating: Application of a PDL equalizer[J]. *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 2002, 149(56): 211-216.
- [108] Xiao XS, Guo HT, Lu M, Yan ZJ, Wang HS, Wang YS, Xu YT, Gao CX, Cui XX, Guo Q, and Peng B. Watts-level super-compact narrow-linewidth Tm-doped silica all-fiber laser near 1707nm with fiber Bragg gratings[J]. *Laser Physics*, 2016, 26(11): 115103.
- [109] Xiao XS, Guo HT, Yan ZJ, Wang HS, Xu YT, Lu M, Wang YS, and Peng B. 3 W narrow-linewidth ultra- short wavelength operation near 1707 nm in thulium-doped silica fiber laser with bidirectional pumping[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123: 135.
- [110] Zhou KJ, Zhou DY, Dong FZ and Ngo NQ. Room-temperature multiwavelength erbium-doped fiber ring laser employing sinusoidal phase-modulation feedback[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(11): 893-895.
- [111] Liu YY, Dong XY, Jiang M, Yu X and Shum P. Multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on random distributed feedback[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122: 240.
- [112] Diaz S and Lopez-Amo M. Multiwavelength operation of erbium-doped fiber-ring laser for temperature measurements[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78: 134-138.
- [113] DeMiguel-Soto V, Bravo M. and Lopez-Amo M. Fully switchable multiwavelength fiber laser assisted by a random mirror[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2020-2023.
- [114] Pan S, Lou CY, and Gao YZ. Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on inhomogeneous loss mechanism by use of a highly nonlinear fiber and Fabry-Perot filter[J]. *Optics Express*, 2006, 14(3): 1113-1118.

- [115] Li Q, Jia ZX, Weng HZ, et al. Broadband multi-wavelength Brillouin lasers with an operating wavelength range of 1500-1600 nm generating wavelength range of 1500-1600 nm generated by four-wave mixing in a dual wavelength Brillouin fiber laser cavity[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15: 055103.
- [116] Al-Alimi AW, Sarmani AR, Al-Mansoori MH, Lakshminarayana G, and Mahdi MA. Flat amplitude and wide multiwavelength Brillouin/erbium fiber laser based on Fresnel reflection in a micro-air cavity design[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3124-3137.
- [117] Zhang ZX, et al. Multiwavelength fiber laser with fine adjustment, based on nonlinear polarization rotation and birefringence fiber filter[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 324-326.
- [118] Zhang ZX, Ye ZQ, Sang MH and Nie YY. Nonlinear-Polarization-Rotation Based Multiwavelength Erbium-doped fiber lasers with highly nonlinear fiber[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(10): 1820-1824.
- [119] Zou H, Lou SQ, Ma JL, Su W, Han BL, and Shen X. Stable multi-wavelength fiber laser based on a compounded nonlinear polarization rotation effect[J]. *Laser Physics*, 2014 24(11): 115108.
- [120] Lian YD, Ren GB, Zhu BF, Gao YX, Jian W, Ren WH, and Jian SS. Switchable multiwavelength fiber laser using erbium-doped twin-core fiber and nonlinear polarization rotation[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(5): 055101.
- [121] Feng XH, Tam HY, and Wai PKA. Stable and uniform multiwavelength erbium-doped fiber laser using nonlinear polarization rotation[J]. *Optics Express*, 2006, 14(18): 8205-8210.
- [122] Xu Y, Ren L, Ma C, et al. Stable and uniform multiwavelength erbium-doped fiber laser based on a microfiber knot resonator with a Sagnac loop reflector[J]. *Journal of Optics*, 2017, 46: 420-424.
- [123] Yuan Y, Yao Y, Yi M, et al. Multiwavelength fiber laser employing a nonlinear Brillouin optical loop mirror: experimental and numerical studies[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15352-15363.
- [124] Wang PH, et al. Stable multi-wavelength fiber laser with single-mode fiber in a Sagnac loop[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(12): 3339-3342.
- [125] Chen J, Tong ZR, Zhang WH, Xue LF, and Pan HG. Research on tunable multiwavelength fiber lasers with two-section birefringence fibers and a nonlinear optical loop[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(5): 055107.
- [126] Estudillo-Ayala JM, Jauregui-Vazquez D, Haus JW, et al. Multi-wavelength fiber laser based on a fiber Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Physics B*, 2015, 121(4): 407-412.
- [127] Ma W, Wang T, Zhang P, et al. Widely tunable multiwavelength thulium-doped fiber laser using a fiber interferometer and a tunable spatial mode-beating filter[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(12): 3786-3791.

- [128] He W, Li D, Zhu L, et al. Tunable Multi-Wavelength Erbium-Doped Fiber Laser Employing PM-FBG and Mach-Zehnder Interferometer with Optical Fiber Delay Line[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 7202108.
- [129] Zhou YW, Sun GY, and Luo AP. Optically tunable multiwavelength fiber laser based on a Mach-Zehnder comb filter incorporating ytterbium-doped fibers[J]. Laser Physics, 2018, 28(1): 015105.
- [130] Li M, et al. Multiwavelength fiber laser based on the utilization of a phase-shifted phase-only sampled fiber Bragg grating[J]. Optics Letters, 2009, 34(11): 1717-1719.
- [131] Zulkhairi AS, Azzuhri SR, Shahrudin RA, Jaddoa MF, Salim MAM, Jasim AA and Ahmad H. Switchable multiwavelength ytterbium-doped fiber laser using a non-adiabatic microfiber interferometer[J]. Laser Physics, 2017, 27(5): 055104.
- [132] Li Y, Lou C, Wu J, Wu B, and Gao Y. Novel method to simultaneously compress pulses and suppress supermode noise in actively mode-locked fiber ring laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(9): 1250-1252.
- [133] Erdogan T. Cladding-mode resonances in short- and long- period fibre grating filters[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(8): 1760-1773.
- [134] Shu XW, Zhang L, and Bennion I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 255-266.
- [135] MacDougall TW, Pilevar S, Haggans CW, and Jackson MA. Generalized expression for the growth of long period gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(10): 1449-1451.
- [136] Wu K, Li X, Wang Y, Wang QJ, Shum PP, and Chen J. Towards low timing phase noise operation in fiber lasers mode locked by graphene oxide and carbon nanotubes at 1.5 μm [J]. Optics Express, 2015, 23(1): 501-511.
- [137] Kwon WS, Lee H, Kim JH, Choi J, Kim KS, and Kim S. Ultrashort stretched-pulse L-band laser using carbon-nanotube saturable absorber[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7779-7785.
- [138] Song YW, Yamashita S, Goh CS, and Set SY. Carbon nanotube mode lockers with enhanced nonlinearity via evanescent field interaction in d-shaped fibers[J]. Optics Letters, 2007, 32(2): 148-150.
- [139] Luo ZQ, Zhou M, Weng J, Huang GM, Xu HY, Ye CC and Cai ZP. Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser[J]. Optics Letters, 2010, 35(21): 3709-3711.
- [140] Sun ZP, Hasan T, Torrisi F, Popa D, Privitera G, Wang FQ, Bonaccorso F, Basko DM, and Ferrari AC. Graphene mode-locked ultrafast laser[J]. ACS Nano., 2010, 4(2): 803-810.
- [141] Mak KF, Sfeir MY, Wu Y, Lui CH, Misewich JA, and Heinz TF. Measurement of the Optical Conductivity of Graphene[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(19): 196405.

- [142] Park NH, Jeong H, Choi SY, Kim MH, Rotermund F, and Yeom DI. Monolayer graphene saturable absorbers with strongly enhanced evanescent-field interaction for ultrafast fiber laser mode-locking[J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19806-19812.
- [143] Mu HR, Wang ZT, Yuan J, Xiao S, Chen CY, Chen Y, Yao Y, Song JC, Xue YZ, Zhang H, and Bao QL. Graphene-Bi₂Te₃ heterostructure as saturable absorber for short pulse generation[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(7): 832-841.
- [144] Chen Y, Chen S, Liu J, Gao Y, and Zhang W. Sub-300 femtosecond soliton tunable fiber laser with all-anomalous dispersion passively mode locked by black phosphorus[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13316-13324.
- [145] Luo ZC, Liu M, Guo ZN, Jiang XF, Luo AP, Zhao CJ, and Zhang H. Microfiber-based few-layer black phosphorus saturable absorber for ultra-fast fiber laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 20030-20039.
- [146] Guo ZN, Zhang H, Lu SB, Wang ZT, Tang SY, Shao JD, Sun ZB, Xie HH, Wang HY, Yu XF, and Chu PK. From black phosphorus to phosphorene: basic solvent exfoliation, evolution of raman scattering, and applications to ultrafast photonics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(45): 6996-7002.
- [147] Mao D, Wang YD, Ma CJ, Han L, Jiang BQ, Gan XT, Hua SJ, Zhang WD, Mei T, and Zhao JL. WS₂ mode-locked ultrafast fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 7965.
- [148] Wu K, Zhang XY, Wang J, Li X, and Chen JP. WS₂ as a saturable absorber for ultrafast photonic applications of mode-locked and Q-switched lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11453-11461.
- [149] Liu WJ, Pang LH, Han HN, Liu ML, Lei M, Fang SB, and Wei ZY. Tungsten disulfide saturable absorbers for 67 fs mode-locked erbium-doped fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2950-2959.
- [150] Zhang H, Lu SB, Zheng J, Du J, Wen SC, Tang DY, and Loh KP. Molybdenum disulfide (MoS₂) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7249-7260.
- [151] Khazaeizhad R, Kassani SH, Jeong H, Yeom D, and Oh K. Mode-locking of Er-doped fiber laser using a multilayer MoS₂ thin film as a saturable absorber in both anomalous and normal dispersion regimes[J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 23732-23742.
- [152] Ahmad H, Reduan SA, Ali ZA, Ismail MA, Ruslan NE, Lee CSJ, Puteh R, Harun SW. C-band Q-switched fiber laser using titanium dioxide (TiO₂) as saturable absorber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1500107.
- [153] Ahmad H, Lee CSJ, Ismail MA, Ali ZA, Reduan SA, Ruslan NE, and Harun SW. Tunable Q-switched fiber laser using zinc oxide nanoparticles as a saturable absorber[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(16): 4277-4281.
- [154] Al-Hayali SKM, Mohammed DZ, Khaleel WA, and Al-Janabi AH. Aluminum oxide nanoparticles as saturable absorber for C-band passively Q-switched fiber laser[J]. *Applied*

- Optics, 2017, 56(16): 4720-4726.
- [155] Wang X, Wang YG, Mao D, Li L, and Chen ZD. Passively Q-switched Nd:YVO₄ laser based on Fe₃O₄ nanoparticles saturable absorber[J]. Optical Materials Express, 2017, 7(8): 2913-2921.
- [156] Bai XK, Mou CB, Xu LX, Huang SJ, Wang TY, Pu SL, and Zeng XL. Passively Q-switched Erbium-doped fiber laser using Fe₃O₄-nanoparticle saturable absorber[J]. Applied Physics Express, 2016, 9: 042701.
- [157] Mao D, Cui XQ, Zhang WD, Li MK, Feng TX, Du BB, Lu H, and Zhao JL. Q-switched fiber laser based on saturable absorption of ferroferric-oxide nanoparticles[J]. Photonics Research, 2017, 5(1): 52-56.
- [158] Chen YS, Yin JD, Chen H, Wang JZ, Yan PG, and Ruan SC. Single-wavelength and multiwavelength Q-switched fiber laser using Fe₃O₄ nanoparticles[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1501009.
- [159] Schlegel A, Alvarado SF, and Wachter P. Optical properties of magnetite (Fe₃O₄) [J]. Solid State Communications, 1979, 12(6): 1157-1164.
- [160] Zhang L, Zhou J, Wang Z, Gu X, and Feng Y. SESAM mode-locked, environmentally stable, and compact dissipative soliton fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(13): 1314-1316.
- [161] Chen L, Zhang M, Zhou C, Cai Y, Ren L, and Zhang Z. Ultra-low repetition rate linear-cavity erbium-doped fibre laser modelocked with semiconductor saturable absorber mirror[J]. Electronics Letters, 2009, 45(14): 731-733.
- [162] Aiub EJ, Steinberg D, Thoroh de Souza EA, and Saito LAM. 200-fs mode-locked erbium-doped fiber laser by using mechanically exfoliated MoS₂ saturable absorber onto d-shaped optical fiber[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 10546-10552.
- [163] Steinberg D, Zapata JD, Eunézio A, Thoroh de Souza EA, and Saito LAM. Mechanically exfoliated graphite onto d-shaped optical fiber for femtosecond mode-locked erbium-doped fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(10): 1868-1874.
- [164] Song YW, Yamashita SJ, Goh CS, and Set SY. Carbon nanotube mode lockers with enhanced nonlinearity via evanescent field interaction in D-shaped fibers[J]. Optics Letters, 2007, 32(2): 148-150.
- [165] Martinez A, Araimi MA, Dmitriev A, Lutsyk P, Li S, Mou CB, Rozhin A, Sumetsky M, and Turitsyn S. Low-loss saturable absorbers based on tapered fibers embedded in carbon nanotube/polymer composites[J]. APL Photonics, 2017, 2(12): 126103.
- [166] Song YW, Morimune K, Set SY, and Yamashita S. Polarization insensitive all-fiber mode-lockers functioned by carbon nanotubes deposited onto tapered fibers[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(2): 021101.
- [167] Yun L. Black phosphorus saturable absorber for dual-wavelength polarization-locked vector soliton generation[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32380-32385.

-
- [168] Pawliszewska M, Ge YQ, Li ZJ, Zhang H, and Sotor J. Fundamental and harmonic mode-locking at 2.1 μm with black phosphorus saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 16916-16925.
- [169] Feng FR, Ran Y, Ling YZ, Gao S, Feng YH, Jin L, and Guan BO. Thermally triggered fiber lasers based on secondary-type-In Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2015, 41(11): 2470-2473.
- [170] Shen Y, Qiu Y, Wu B, Zhao W, Chen S, Sun T, and Grattan KTV. Short cavity single frequency fiber laser for in-situ sensing applications over a wide temperature range[J]. *Optics Express*, 2007, 15(2): 363-370.
- [171] Liu WS, Guo T, Wong AC, Tam HY, and He SL. Highly sensitive bending sensor based on Er^{3+} -doped DBR fiber laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17834-17840.
- [172] Guan BO, Tam HY, Lau ST, and Chan HLW. Ultrasonic hydrophone based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(1): 169-171.
- [173] Zhang Y, Guan BO, and Tam HY. Characteristics of the distributed Bragg reflector fiber laser sensor for lateral force measurement[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(18): 4619-4622.

附录 中英文对照表

英文缩写	英文全称	中文全称
NPR	Nonlinear polarization rotation	非线性偏振旋转
YDF	Yb-doped fiber	掺镱光纤
EDF	Er-doped fiber	掺铒光纤
TDF	Tm-doped fiber	掺铥光纤
AFPIF	All-fiber polarization interference filter	全光纤偏振干涉滤波器
DBR	Distributed Bragg Reflector	分布式布拉格反射
PDL	Polarization-dependant loss	偏振相关损耗
FSR	Free spectral range	自由光谱范围
NOLM	Nonlinear optical loop mirror	非线性光学环镜
WDM	Wavelength Division Multiplexer	波分复用器
ISO	Isolator	隔离器
PI-ISO	Polariazation independent isolator	偏振无关隔离器
OSA	Optical spectrum analyzer	光谱仪
PC	Polarization controller	偏振控制器
SMF	Single mode fiber	单模光纤
PBS	Polarization beam splitter	偏振分束器
SESAM	Semiconductor saturable absorber mirror	半导体可饱和吸收镜
LD	Laser diode	半导体激光器
OC	Optical coupler	光学耦合器

致 谢

时光荏苒，岁月如梭，不知不觉已到了回首之时。曾经痛苦过、迷茫过，也兴奋过、喜悦过，到了最后却是也无风雨也无晴。博士期间收获的不仅是专业知识，更是严谨的治学态度和坚忍不拔的意志。在对科学的不懈追求之路，有幸结识了许多良师益友，在此，向所有帮助过我的人献上我最诚挚的谢意！

“落其实者思其树，饮其流者怀其源”，特别感谢我的恩师王屹山研究员，感谢您的悉心培养和谆谆教诲，衷心祝愿您身体健康，一切安好！

特别感谢亦师亦友的闫志君！

感谢课题组张伟、胡晓鸿、张挺、刘元山、王向林、杨直等几位师兄以及赵凤艳、冯野等人对我的帮助。

感谢西安光学精密机械研究所赵卫研究员、孙传东研究员、姚保利研究员、范文慧研究员、张文富研究员、刘红军研究员、高存孝研究员、郭海涛研究员、汤洁研究员、赵保银研究员、段弢副研究员以及李萍老师对我的大力支持。

感谢英国阿斯顿大学周凯明研究员和张琳教授，感谢上海大学牟成博教授，感谢西北工业大学毛东教授、姜碧强副教授，感谢英国班戈大学陈险峰副教授，感谢中科华芯测控有限公司徐金涛老师，感谢陕西师范大学李晓辉教授，感谢山西太原理工大学刘香莲老师，感谢华中科技大学熊松松。

感谢研究生部李晋芳主任、赵萍、朱家芹、张雯等几位老师。

感谢我的兄弟们：万仁刚、吴登科、刘尚波、宋家争、孙启兵、王擂然、黄楠、薛冰、孙先伟、侯超奇、白龙、杨文刚、张昊苏、马烽、孙强、孟晗、蒋亚楠、苏峰、林声焱、李伟、张鑫、郭永祥、王玉展、许海腾。

最后，感谢我的父母、妻子、爷爷奶奶、姥爷姥姥，借此机会说一句：我爱你们！

所幸曲终人未散，我还将继续为我国科研发展添砖加瓦，撸起袖子加油干。

2019年6月

作者简介及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简介:

2003年09月——2007年06月,在山东大学信息科学与技术院获得学士学位。

2007年09月——2010年06月,在中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士学位。

2014年09月——2019年06月,在中国科学院大学攻读博士学位。

工作经历:

2011年03月——至今,中国科学院西安光学精密机械研究所。

已发表(或正式接受)的学术论文:

1. Hushan Wang, Fengyan Zhao, Zhijun Yan, Xiaohong Hu, et al. Excessively tilted fiber grating based Fe_3O_4 saturable absorber for passively mode-locked fiber laser[J]. Optics Express, 2019, 27(11): 15693-15700.
2. Hushan Wang, Fengyan Zhao, Zhijun Yan, et al. All-fiber polarization interference filter based uniform multiwavelength erbium-doped fiber laser[J]. Laser Physics, 2019, 29(5): 055105.
3. Hushan Wang, Songsong Xiong, Jiazheng Song, Fengyan Zhao, Zhijun Yan, et al. High temperature resistant ultra-short DBR Yb-doped fiber laser[J]. Applied Optics. (已接收)
4. Hushan Wang, Zhijun Yan, Kaiming Zhou, et al. Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on an all-fiber polarization interference filter[C]. Proc. of SPIE 2017, 10323.
5. Fengyan Zhao, Hushan Wang, Ting Zhang, Yishan Wang, et al. Passively Q-switched all-fiber Yb-doped lasers based on nonlinear multimode interference[J]. Journal of Russian Laser Research, 2019, 40(1): 87-93. (共一作者)
6. Fengyan Zhao, Hushan Wang, Xiaohu Hong, Yishan Wang, et al. Experimental

- observation of bound solitons with a nonlinear multimode interference based saturable absorber[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(11): 115106. (共一作者)
7. Fengyan Zhao, Yishan Wang, Hushan Wang, Zhijun Yan, et al. Ultrafast soliton and stretched-pulse switchable mode-locked fiber laser with hybrid structure of multimode fiber based saturable absorber[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 16369. (通信作者)
 8. Fengyan Zhao, Yishan Wang, Hushan Wang, Xiaohong Hu, et al. High-energy solitons generation with a nonlinear multimode interference-based saturable absorber[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(8): 085104. (通信作者)
 9. Xianglian Liu, Hushan Wang, Yishan Wang, Zhijun Yan, and Lin Zhang. Single-polarization, dual-wavelength mode-locked Yb-doped fiber laser by a 45°-tilted fiber grating[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(6): 065102.
 10. Zhijun Yan, Hushan Wang, Changle Wang, Zhongyuan Sun, Guolu Yin, et al. Theoretical and experimental analysis of excessively tilted fiber gratings[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12107
 11. Lina Duan, Hushan Wang, Jing Bai, Yonggang Wang, et al. 844-fs mode-locked fiber laser by carboxyl functionalized graphene oxide[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(11): 116104.
 12. Lina Duan, Ting Zhang, Hushan Wang, Yishan Wang, et al. Dissipative soliton with sidebands on spectrum in an all-fibre laser[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(9): 095106.
 13. Jianyou Liu, Fengyan Zhao, Hushan Wang, Wei Zhang, et al. Generation of dark solitons in erbium-doped fiber laser based on black phosphorus nanoparticles[J]. *Optical Materials*, 2019, 89: 100-105.

参加的研究项目及获奖情况:

1. 国家自然科学基金青年项目,“基于大角度倾斜光纤光栅的全光纤色散管理器件及应用研究”,项目负责人。
2. 国家自然科学基金青年项目,“45度倾斜光纤光栅辐射模式机理及光束质量优化研究”,主要参与人。