

倾斜光纤光栅研究进展

张宇菁 王蒙 王泽锋 曹润秋 奚小明 陈子伦

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 倾斜光纤光栅是一类特殊的布拉格光纤光栅,在光学滤波、光纤传感、光纤通信等方面具有重要的应用价值。简要介绍了倾斜光纤光栅中的模式耦合机理,全面回顾了其理论研究、制作技术以及应用研究的发展历史与现状。基于其滤波特性,指出倾斜光纤光栅是抑制大功率光纤激光系统中受激拉曼散射的一种非常有潜力的技术途径。

关键词 光栅; 光纤布拉格光栅; 倾斜光纤光栅; 拉曼散射; 光纤传感

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.070005

Research Progress of Tilted Fiber Bragg Gratings

Zhang Yujing Wang Meng Wang Zefeng Cao Jianqiu Xi Xiaoming Chen Zilun

College of Optoelectric Science and Engineering, National University of

Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract As a special kind of fiber Bragg gratings, tilted fiber Bragg gratings (TFBG) have some good features, which are of great application value in optical filtering, fiber sensors, optical fiber communication, etc. In this paper, the mode coupling mechanism of TFBG is briefly introduced. Then a general review on the theories, fabrications and applications of TFBG is presented. The TFBG is a potential technique to suppress stimulated Raman scattering in high power fiber laser systems based on its filtering characteristics.

Key words gratings; fiber Bragg gratings; tilted fiber gratings; Raman scattering; fiber sensors

OCIS codes 050.2770; 060.3735; 060.2340; 290.5860; 060.2370

1 引言

自1978年,加拿大通信研究中心的 Hill 等^[1]发现了纤芯掺铒的光纤具有光敏性,并利用双向传播的488 nm 氩离子激光束形成的驻波刻写了世界上第一个光纤光栅以来,光纤光栅获得了飞速的发展,已经成为一种重要的光纤无源器件,被广泛应用于光纤激光器、光通信、光纤传感等各个领域。1990年, Meltz^[2]首次提出倾斜光纤光栅(TFBG)模型。而国内倾斜光纤光栅方面的相关研究起步较晚,2000年有国内学者研究了倾斜光栅的反射特性。倾斜光栅的光栅平面不再与光纤轴向垂直,而是有一定倾斜角度,进而加强了从前向传输的纤芯模到后向或前向传输的包层模、辐射模之间的耦合。它能够通过改变制作系统的装置来精确地按照目标光谱进行制备,而且光纤种类不限,可以是普通的单模光纤、双包层光纤或是光子晶体光纤。正因为有上述特点,倾斜光纤光栅一直是近些年的研究重点。本文将系统地介绍倾斜光纤光栅的模式耦合机理、理论研究进展、制作技术发展状况以及应用情况。

2 倾斜光纤光栅的工作机理

与普通布拉格光纤光栅类似,倾斜光纤光栅也是在纤芯中沿光纤轴向呈现周期性的折射率调制,但与其

收稿日期: 2016-01-24; 收到修改稿日期: 2016-03-07; 网络出版日期: 2016-06-27

作者简介: 张宇菁(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅方面的研究。E-mail: 15084929846@163.com

导师简介: 王泽锋(1980—),男,博士,副教授,主要从事光纤光栅和光纤气体激光器方面的研究。

E-mail: hotrosemaths@163.com(通信联系人)

不同的是,光栅平面与光纤的切向呈一定倾角^[3],如图1所示,倾角的出现导致了复杂多样的模式耦合。

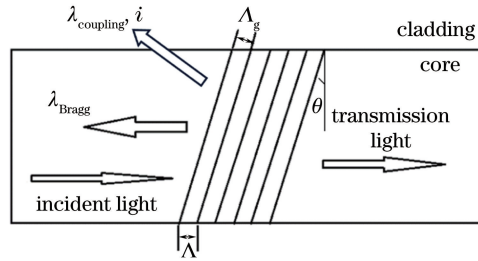


图1 倾斜光纤光栅结构图

Fig. 1 Structure diagram of a TFBG

倾斜角度的存在,打破了原有的圆对称结构,TFBG除了存在前向与后向传输的纤芯模间的耦合之外,还有纤芯模与包层模的耦合:如前向传输的纤芯模与后向传输的包层模间的耦合,或是假设包层直径无限大的情况下,前向传输的纤芯模与后向传输的辐射模间的耦合。当光纤暴露在空气中时,包层将不再是如同纤芯中的近似弱波导结构,在倾斜光纤光栅的透射光谱中短波区域会出现许多分立的谐振峰,这就是纤芯模与包层模间的耦合现象,而且纤芯模与低阶包层模间的耦合会导致透射光谱上出现“ghost模”谐振峰,如图2所示。

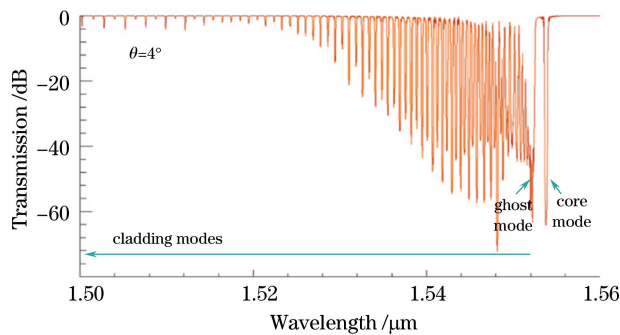


图2 仿真计算得到的4°倾斜光纤光栅透射光谱图

Fig. 2 Simulating calculated transmission spectrum of TFBG with tilt angle of 4°

这些现象都可以用布拉格衍射理论来解释。入射光进入光栅后只有满足动量守恒即相位匹配条件才能有效地衍射,这就需要满足衍射光波矢量等于入射光波矢量与光栅矢量之和。纤芯模或是包层模波矢量可表示为 $\beta_i = 2\pi n_{\text{eff},i} / \lambda$, $n_{\text{eff},i}$ 为第*i*阶模在波长 λ 下的有效折射率。相似的,光栅的波矢量为 $\beta_g = 2\pi / \Lambda$, $\Lambda = \Lambda_g / \cos \theta$, Λ_g 为沿光纤轴向方向的光栅周期, Λ_g 为垂直于光栅平面方向的周期。因此两种模式耦合的相位匹配条件可以表示为 $\beta_m + \beta_i = \beta_g$,即数值上满足 $2\pi n_{\text{eff}} / \lambda + 2\pi n_{\text{eff},i} / \lambda = 2\pi \cos \theta / \Lambda_g$ 。如图3(a)所示,当布拉格光栅的光栅平面垂直于光纤轴向时,只存在前向传输的纤芯模与后向传输的纤芯模间的耦合,此时在某一特定波长,只有当 β_g 为纤芯模波矢量 β_{01} 幅度的二倍时才满足相位匹配条件,所以在普通布拉格光纤光栅的透射谱中仅有一布拉格谐振峰。如图3(b)所示,对于更短的波长情况,布拉格反射无法满足相位匹配条件,但由于包层模的有效折射率小,可能出现耦合至包层模的情况,这些包层模由于强烈的损耗而在包层的边界处被散射或吸收,因此在透射谱的短波区域会出现一系列损耗峰。图3(c)则展示了倾斜角度过大,从而出现类似于长周期光栅(LPG)的情况。

根据光栅参数,谐振波长可由耦合模方程求得,但是更加简便的方式是表示为类似于布拉格光纤光栅的谐振条件。对于普通的布拉格光纤光栅,满足布拉格衍射条件的谐振波长可以表示为: $\lambda_{\text{Bragg}} = (n_{\text{eff}}^{\text{core}} + n_{\text{eff}}^{\text{core}}) \Lambda_g$, $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 是纤芯模的有效折射率,该谐振条件描述的是前向传输的纤芯模与后向传输的纤芯模间的耦合。对于倾斜光纤光栅,光栅平面有一定倾角,此时沿光纤轴向的光栅周期为 $\Lambda = \Lambda_g / \cos \theta$,因此其布拉格谐振表达式为 $\lambda_{\text{Bragg}} = (n_{\text{eff}}^{\text{core}} + n_{\text{eff}}^{\text{core}}) \Lambda_g / \cos \theta$ 。由于倾角的存在,会有部分前向传输的纤芯模耦合到反向传输的包层模中,谐振波长由 $\lambda_{\text{cl},i} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} + n_{\text{eff},i}^{\text{cl}}) \Lambda_g / \cos \theta$ 给出, $n_{\text{eff},i}^{\text{cl}}$ 是第*i*阶包层模的有效折射率。

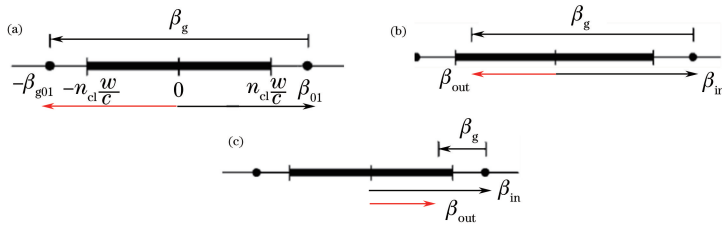


图3 三种光栅模式耦合原理示意图。(a) 前向传输纤芯模与后向传输纤芯模的耦合；

(b) 前向传输纤芯模与后向传输辐射模的耦合；(c) 前向传输纤芯模与前向传输辐射模的耦合

Fig. 3 Schematic illustration of three grating mode coupling. (a) Forward core mode to backward core mode coupling; (b) forward core mode to backward radiation-mode coupling; (c) forward core mode to forward radiation-mode coupling

3 倾斜光纤光栅理论研究进展

自倾斜光纤光栅概念被提出以来,研究人员就一直致力于采用更全面、更准确的理论来解释它的模式耦合及光谱特性。到目前为止,出现了耦合模理论、远场天线理论、体电流法和近场模型4种已被广泛接受的理论模型,如表1所示。

表1 4种倾斜光纤光栅理论模型对比

Table 1 Comparison of four TFBG theoretical mode

Year	Approaches for analysis	Characteristics
1996	Coupled mode theory ^[4]	An intuitive and effective method for analysis of mode couplings
1999	Antenna theory ^[9]	It's based on far-field approximation and cannot be directly used to calculate the radiation field around fiber
2001	Volume current method ^[10]	It's suited to analyze the external coupling of the fiber gratings with uniform refractive index modulation
2003	Near-field model ^[11]	Overcome the disadvantage of the antenna theory

早在光纤光栅诞生之时,耦合模理论就已被用于解释平面波导光栅,这些理论经适当修改可用于TFBG的特性分析。1996年,Erdogan T等^[4]采用耦合模理论初步研究了倾斜光纤光栅的光谱特性以及其中纤芯模与辐射模间的耦合,这些理论计算与实验结果非常吻合。耦合模理论也同样适用于长周期光栅或其他特殊结构的光栅。而后,相继有很多研究人员对耦合模理论进行了研究与完善^[5-8],其中Erdogan T^[6-7]基于三层介质光纤模型,提出了更具有普适性的耦合模理论。1999年,Holmes等^[9]采用天线理论成功地解释了倾斜光纤光栅光谱的一些特性,该理论模型假设光栅平面无限大。2001年,Li等^[10]在耦合模理论的基础上提出了基于圆柱坐标系的体电流法,能够很好地解释倾斜光纤光栅的相位匹配条件、谐振波长、偏振依赖等特性。实验结果证实,在良好近似和均匀折射率调制的光纤环境下,体电流法与耦合模有相似的分析结果,但引入啁啾量等其他调制特性后,该理论存在一定的局限性。2003年,Jáuregui等^[11]提出了近场模型,将光栅部分假设为电流源,弥补了远场天线理论不可解算光纤附近辐射模场的不足。与耦合模理论相比,后三种模型更适用于分析非近轴的散射,如倾角为45°时的情况。

以上4种理论分析都是将波导的边界条件忽略,不适于分析极端倾斜角度,如接近0°或90°的情况。并且对于辐射模场的分析都是基于弱波导结构、包层半径无限大的近似情况。2010年,Lu等^[12]在耦合模理论的基础上提出了更加完善的全矢量多模式耦合理论,该理论不仅仅停留在解算两个模式间的耦合,而能够解释更加复杂的、失去弱波导近似的双包层光纤中的情况。在完美反射边界近似的基础上,计算辐射模时,可像导模一样将其离散化,这样降低了解算的复杂程度,并且不影响计算精度。

4 倾斜光纤光栅的制作技术

1993年,Kashyap等^[13]首次采用如图4所示的双光束干涉法在掺铒光纤中制出了倾斜光纤光栅,这种

C波段的倾斜光纤光栅在放大器中实现了增益平坦。

相位掩模板法具有工艺简单、参数改变灵活等特点,是目前被广泛采用的制备方法,其刻写系统构成如图5所示。由准分子激光器出射的紫外激光经两面平面高反镜后通过柱透镜聚焦在相位掩模板上发生衍射,±1级衍射光在紧邻的光纤上形成干涉条纹,在纤芯中实现周期性折射率调制完成光栅的刻写。实现倾斜角度刻写的方法有两种,分别如图6(a)、(b)所示。图6(a)中,相位掩模板平面与紫外入射光保持垂直,光纤与相位掩模板平面平行但其轴向旋转一定角度 θ ,这样刻写在纤芯中的光栅平面倾角为 θ_T ,两角度间的关系表达式为^[14] $\theta_T = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{1}{n_{uv} \tan \theta}\right)$ 。图6(b)中,相位掩模板与光纤保持平行且无相对旋转,制备时将两者组成的整体相对于原来垂直于紫外入射光的平面旋转一定角度 φ ,此时还要同时旋转聚焦的柱透镜,这样刻写在纤芯中的光栅平面倾角为 φ_T ,经简单推导可以得到两角度间的关系表达式为 $\varphi_T = \frac{1}{2} \left\{ \arcsin \left[\frac{1}{n_{uv}} \left(\sin \varphi + \frac{\lambda_{uv}}{\Lambda_m} \right) \right] + \arcsin \left[\frac{1}{n_{uv}} \left(\sin \varphi - \frac{\lambda_{uv}}{\Lambda_m} \right) \right] \right\}$,其中 Λ_m 为相位掩模板的周期。当 $\varphi = 30^\circ$ 时,+1级衍射光的能量只有-1级的90%,当 $\varphi = 45^\circ$ 时,+1级衍射光的能量只有-1级的24%。因此为了不影响光栅刻写的调制深度,一般只有在 $\varphi < 30^\circ$ 的情况下采用此方法。

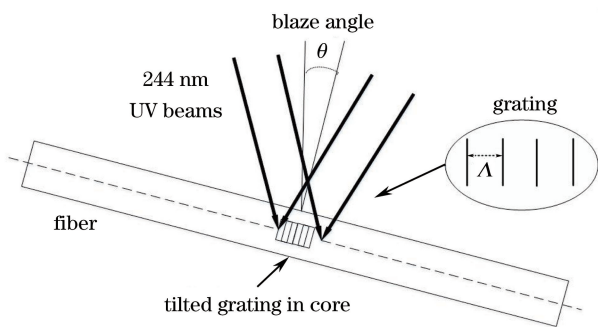


图4 双光束干涉法刻写倾斜光栅

Fig. 4 TFBG etched by dual beam interference

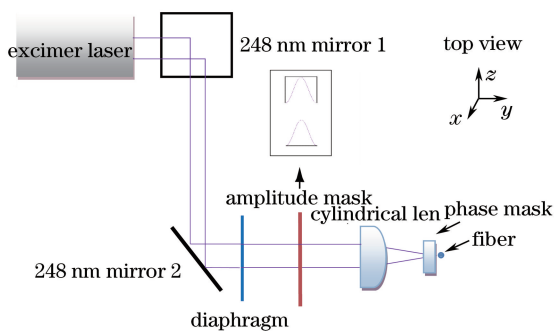


图5 相位掩模板法刻写系统示意图

Fig. 5 Fabrication system diagram of phase mask

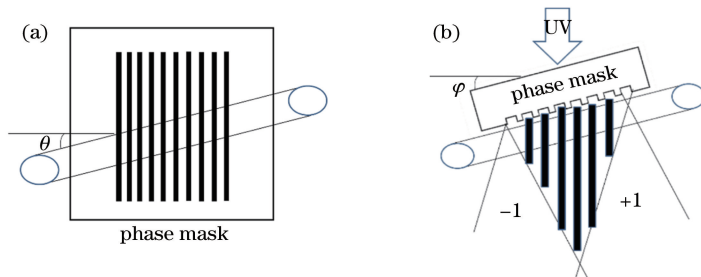


图6 旋转刻写在光纤中的光栅平面示意图。(a)垂直;(b)平行

Fig. 6 Configurations used to "tilt" the grating planes inside the fiber. (a) Vertical; (b) parallel

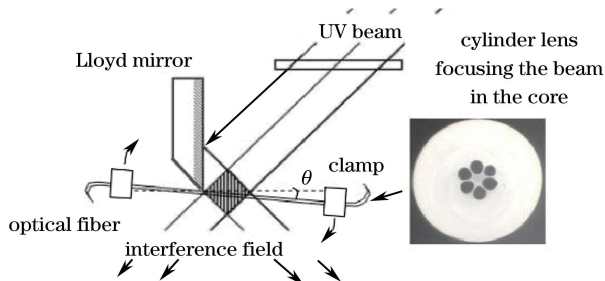


图7 劳埃德镜用于干涉法刻写 TFBG

Fig. 7 TFBG made by Lloyd mirror with interference

2006年, Huy等^[15]采用图7中的方法在光子晶体光纤中成功刻写了倾斜光栅。他们将光纤放入 1.5×10^4 kPa高压、25 °C的环境中一周进行载氢处理以增加掺锗纤芯的光敏性。刻写系统借助劳埃德镜形成干涉条纹, 倾斜角度由光纤两侧的夹具旋转决定。与刻写在普通单模光纤中的倾斜光栅相比, 光子晶体光纤中的倾斜光栅有更少的模式谐振, 并且其高阶模对注入到空气孔中液体折射率变化非常敏感。

5 倾斜光纤光栅应用

5.1 基本性质应用

目前在光纤通信领域, 倾斜光纤光栅可以用作掺铒放大器的增益平坦器^[13,16-17]、波分复用器(WDM)^[18-22]、滤波器、色散补偿器以及偏振相关器件^[14,23-26]。作为滤波器是其最基本的特性, 当与啁啾光栅相结合时, 可用作宽带带阻滤波器^[27]。啁啾光栅是纤芯折射率沿轴向渐变分布的一种光栅, 对于不同的波长反射时延不同, 在透射光谱中表现出一个很宽的损耗峰。Liu等^[27]采用如图8所示的系统制出了带宽达150 nm的带阻滤波器, 旋转方式采用图6(b)中的方法, 并换上啁啾相位掩模板。制作采用康宁公司的SMF-28单模光纤, 193 nm紫外曝光。不同倾斜角度的啁啾倾斜光栅(CTFBG)的透射光谱和反射光谱如图9所示, 该光栅回波损耗低, 对于入射光的偏振态、外界的温度、轴向应力、环境折射率的变化均不敏感, 是一种稳定的宽带带阻滤波器。

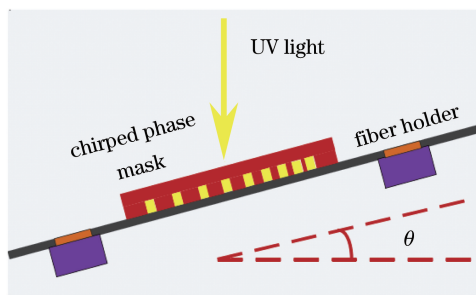


图8 啁啾倾斜光栅刻写系统图

Fig. 8 Experimental setup of CTFBG inscription system

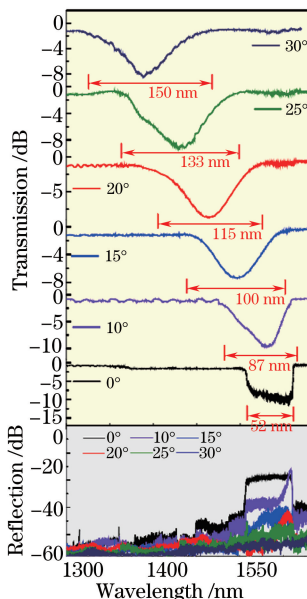


图9 不同倾斜角度的啁啾倾斜光栅光谱

Fig. 9 Spectral trimming of CTFBG with different tilt angles

倾斜光纤光栅同时也是偏振敏感器件, 从透射损耗光谱图看, 当角度大于 6.5° 时, S偏振光和P偏振光呈现明显的差异^[4]。利用偏振依赖损耗做成均衡器是一项非常热门的应用^[14], 在某些特殊的角度如 45° 时,

P 偏振光几乎全部泄露到纤芯外,这时光栅可以作为起偏器使用^[26]。

5.2 单参量传感应用

自倾斜光栅被发明后,人们就一直在研究各个参数如温度、应力、弯曲等因素对模式耦合的影响。Chen 等^[28]分析了不同包层厚度情况下,倾斜光栅的应力传感特性。模式耦合同样受到弯曲因素的影响。2002 年,Baek 等^[29]通过监测 LP₁₁ 模的功率和透射光谱,实现了可以同时监测弯曲方向和大小的微弯传感器。2005 年,Caucheteur 等^[30]实现了温度和弯曲同时测量。Chen 等^[31-32]于 2008 年提出了基于倾斜光栅的震动传感器并通过实验研究了其特性。包层模谐振波长和模式耦合对于外界环境折射率具有高敏感性,随着外界环境折射率的增加,越来越多的高阶包层模谐振消失,在透射光谱中体现为一系列连续辐射模的损耗曲线,如图 10 所示。

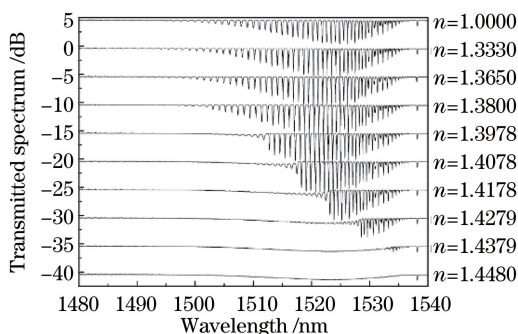


图 10 增加包层外侧介质折射率对 TFBG 光谱图的影响

Fig. 10 Effect of increasing the refractive index of the medium external to the fiber cladding on the transmission spectrum of a TFBG

2001 年,Laffont 等^[33]研究了环境折射率对于倾斜光栅光谱的影响,并且通过计算归一化包层模光谱的积分面积得到周围环境折射率的数值。2006 年,Zhou 等^[34]发现了大角度倾斜光栅对折射率高敏感而对温度低敏感的特性。2008 年,Caucheteur 等^[35]基于光时域反射技术利用倾斜光栅做出了准分布式环境折射率测量仪。2014 年,Zheng 等^[36]将倾斜光栅与啁啾光栅串联实现了更高精度的环境折射率测量仪。

倾斜光纤光栅与其他种类的模式耦合器混合使用同样可以用于单参量的测量,如图 11 所示^[3,37-38]。其中,图 11(a)是光纤末端镀了宽带反射镜;图 11(b)是将两个光纤进行错位链接;图 11(c)是倾斜光栅与拉锥光纤结合,光纤外侧用金属套固定,在不同的条件下耦合回纤芯的模式不同,各个谐振峰的深度也不同,例如利用 4°ghost 模谐振可以做成加速度计;图 11(d)是倾斜光栅与长周期光栅的结合,利用长周期光栅能够实现同向传输的纤芯模与包层模间的耦合;图 11(e)是在光纤中加入由一小段多模光纤作为失配模块的组合结构。倾斜光栅外侧的包层模能够通过这些模式耦合器重新耦合到纤芯中,这样只需要观测反射谱,减少了很多附加损耗,使得倾斜光栅可以作为使用范围更广的单端传感器;图 11(f)是将倾斜光栅与 D 型光纤结合,另一端连接多模光纤,这样反向传输的包层模光波进入 D 型光纤后再耦合到多模光纤中与纤芯模一同传输回终端。

5.3 全光纤波长解调技术

2003 年,Zhou 等^[39]实验上证实了当倾斜光栅浸没在折射率接近包层折射率的溶液中时,包层模将不再存在于光纤中,而是耦合到辐射模,从此倾斜光纤光栅的辐射模引起了更多研究人员的兴趣。

2004 年,Zhou^[40]进一步发现不同波长的辐射模传播的方向角不同,如图 12 所示,倾斜光栅浸泡在折射率匹配液中,在辐射区放置柱透镜,并在其后侧设置线阵 CCD,这样辐射光波经柱透镜后聚焦于线阵 CCD 上,再通过不同位置解算其方向角,进行波长解调。图示中 G1、G2 是用于传感的光栅,这套系统可以实现多点、不同参数的实时传感监控,并且插入损耗低。目前,这项技术已被应用于光纤光谱仪中^[41-42]。

5.4 功能性涂覆应用

在倾斜光纤光栅表面涂覆新型材料为其拓展了新的应用领域。2006 年,Chechura^[43]报道了纳米级超薄涂覆对倾斜光栅包层模谐振的影响。2008 年,Maguis^[44]将生物功能型材料涂覆于倾斜光栅外,展现了它对

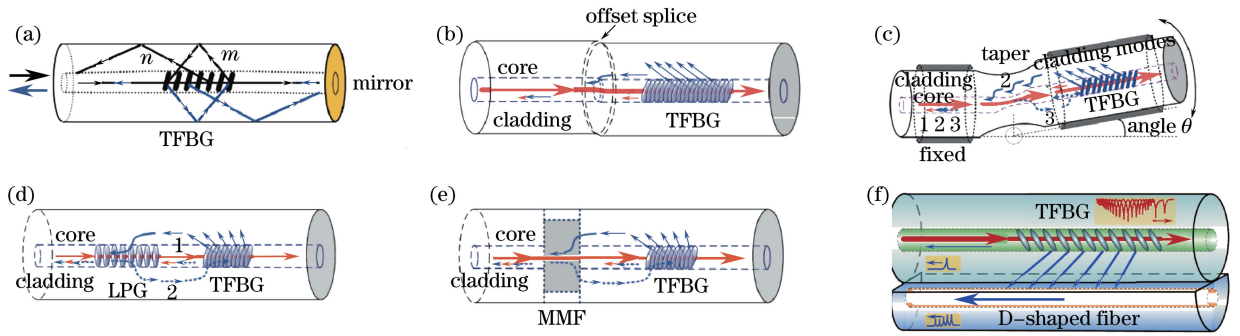


图 11 TFBG 与不同的上下行模式耦合器的组合。(a) 反射镜；(b) 错位链接；

(c) 拉锥光纤；(d) 长周期光栅；(e) 纤芯失配光纤；(f) D 型光纤

Fig. 11 Schematic diagram of TFBGs coupled with upstream or downstream mode couplers. (a) Mirror;

(b) offset splices; (c) tapers; (d) LPGs; (e) core diameter mismatched fibers; (f) D-shaped fiber

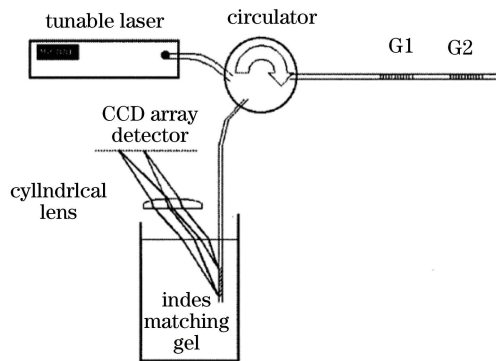


图 12 基于倾斜光纤光栅的 CCD 边探测解调系统

Fig. 12 Interrogation system using CCD side detection with TFBG

于抗体和抗原传感的潜力。外侧涂覆金属的倾斜光纤光栅是基于表面等离子体谐振 (SPR) 原理。2007 年, Yanina Y 等^[45]首次提出了涂覆金的倾斜光纤光栅传感器。2008 年, Allsop 等^[46]报道了倾斜光栅的红外表面等离子体谐振现象。通过监测由外界折射率改变而引起的谐振波长漂移, 可以高精度地探测 DNA、病毒分子等。2013 年, 山东大学 Jiang 等^[47]实验证实了表面涂覆金的倾斜光栅环境折射率传感器灵敏度较裸倾斜光栅传感器提高了 200~300 倍。2014 年, 有报道基于表面涂覆金的倾斜光栅转动传感器^[44], 其工作原理如图 13 所示。研究人员通过检测等离子体谐振波长附近的透射光功率来解算光纤转动的角度, 其灵敏度可达裸倾斜光栅传感器的 7 倍。

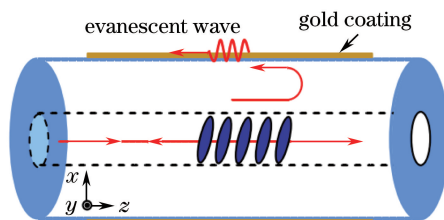


图 13 涂覆金的倾斜光纤光栅光波传播侧面示意图

Fig. 13 Side view of the light propagating through the Au-coated TFBG

2014 年, Yang Dexing^[48]在倾斜光纤光栅外侧涂覆纳米磁流体, 实现了一种磁场强度传感器, 其传感器结构如图 14 所示。纳米磁流体的折射率决定于磁场的方向和强度, 磁场方向垂直于光纤。纳米磁流体的折射率随磁场强度的增加而减小, 高阶模的谐振波长会受到相应的影响而发生漂移, 进而可以通过测量波长漂移量进而解算出磁场的强度, 其原理类似于环境折射率的测量。

2015 年, Jiang 等^[49]提出外侧加装碳纳米管结构的环境折射率传感器, 与裸倾斜光栅传感器相比, 该传

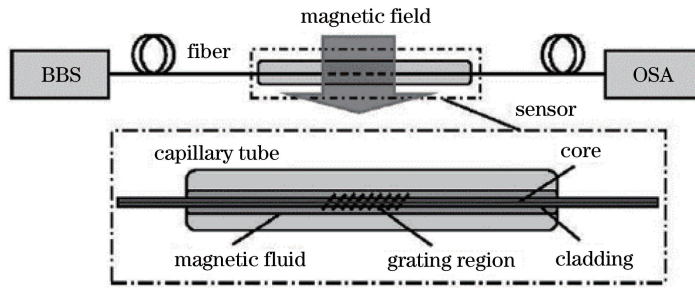


图 14 磁场传感实验设计图

Fig. 14 Experimental setup for the magnetic field sensing

感器在低环境折射率区域灵敏度更高,并且测量范围扩大了近 7 倍(1~1.428)。由于具备优越的性能,各种材料涂覆的倾斜光纤光栅传感器近年来一直是研究热点^[50-52]。

6 结束语

由于倾斜光纤光栅具有许多特殊的性能,在光学滤波、光纤传感、光纤通信等方面具有重要的应用价值,是目前光纤光栅领域研究的热点。虽然倾斜光纤光栅特性的相关分析理论很多,但是耦合模理论仍是最主要的理论模型。相较于普通布拉格光栅的刻写,倾斜光栅的刻写方式较单一,随着相关技术的发展,会有更加便捷高效的刻写方式被推广,如飞秒激光直接刻写的方法。目前,倾斜光栅的应用热点集中在传感领域,因为相对于布拉格光栅或长周期光栅,倾斜光栅具有精度高、非交叉敏感、多样性等优势。鉴于倾斜光纤光栅特殊的模式耦合特性,可以用作大功率光纤激光中的拉曼滤除器,将后向传输的受激拉曼散射光耦合至包层中而损耗掉,避免对系统造成严重的影响。相信随着人们对于倾斜光纤光栅认识的不断深入,其应用范围会越来越广泛。

参 考 文 献

- Hill K O, Fuji Y, Johnson D C, *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication[J]. *Appl Phys Lett*, 1978, 32(10): 647-649.
- Meltz G, Morey W W, Glenn W H. In-fibre Bragg grating tap[C]. *OFC*, 1990.
- Albert J, Shao L Y, Caucheteur C. Tilted fiber Bragg grating sensors[J]. *Laser & Photonics Review*, 2013, 7(1): 83-108.
- Erdogan T, Sipe J E. Tilted fiber phase gratings[J]. *J Opt Soc Am A*, 1996, 13(2): 296-313.
- Bouzid A, Abushagur M A G. Scattering analysis of slanted fiber gratings[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(3): 558-562.
- Erdogan T. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(8): 1760-1773.
- Lee K S, Erdogan T. Transmissive tilted gratings for LP_{01} -to- LP_{11} mode coupling[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, 11(10): 1286-1288.
- Li Y, Brown T G. Radiation modes and tilted fiber gratings[J]. *J Opt Soc Am B*, 2006, 23(8): 1544-1555.
- Holmes M J, Kashyap R, Wyatt R. Physical properties of optical fiber sidetap grating filters: free-space model[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5(5): 1353-1365.
- Li Y, Froggatt M, Erdogan T. Volume current method for analysis of tilted fiber gratings [J]. *IEEE J Lightwave Technology*, 2001, 19(10): 1580-1591.
- Jáuregui C, López-Higuera J M. Near-field theoretical model of radiation from a uniform-tilted fiber-Bragg grating[J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2003, 37(2), 124-127.
- Lu Y C, Huang W P, Jian S S. Full vector complex coupled mode theory for tilted fiber gratings[J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 713-726.
- Kashyap R, Wyatt R, Campbell R J. Wideband gain flattened erbium fiber amplifier using a photosensitive fiber blazed grating[J]. *Electron Lett*, 1993, 29(2): 154-156.

- 14 Mihailov S J, Walker R B, Lu P, *et al.*. UV-induced polarisation-dependent loss (PDL) in tilted fiber Bragg gratings: application of a PDL equaliser[J]. IEEE Proceedings, 2002, 149(56): 211-216.
- 15 Huy M C P, Laffont G, Dewynter V, *et al.*. Tilted fiber Bragg grating photo written in microstructured optical fiber for improved refractive index measurement[J]. Opt Express, 2006, 14(22): 10359-10370.
- 16 Kashyap R, Wyatt R, Mckee P F. Wave length flattened saturated erbium amplifier using multipleside-tip Bragg gratings [J]. Electron Lett, 1993, 29(11): 1025-1026.
- 17 Kerrinckx E, Hidayat A, Niay P. Suppression of discrete cladding mode resonances in fiber slanted Bragg gratings for gain equalisation[J]. Opt Express, 2006, 14(4): 1388-1394.
- 18 Haggans C W, Singh H, Varner W F, *et al.*. Narrow-band rejection filters with negligible backreflection using tilted photoinduced gratings in single-mode fibers[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1998, 10(5): 690-692.
- 19 Liu Y, Zhang L, Bennion I. Fabricating fibre edge filters with arbitrary spectral response based on tilted chirped grating structures[J]. Measurement Sci Technol, 1999, 10(1): L1-L3.
- 20 Westbrook R S, Feder K S, Reyes P I, *et al.*. Application of fibre Bragg grating filter/tap module to a wavelength-locked low-chirp directly-modulated 10 GB/s RZ transmitter[C]. OFC, 2002.
- 21 Gaff K W, Ladouceur F, Love J D. Two-wavelength planar add/drop WDM filter employing a three-mode coupling Bragg grating[J]. Electron Lett, 2000, 36(13): 1142-1144.
- 22 Marin E, Ghosh R, Meunier J P, *et al.*. Bragg gratings in 2×2 symmetric fused fibre couplers: influence of the tilt on the wavelength response[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1999, 11(11): 1434-1436.
- 23 Zhou K, Chen X, Simpson A G, *et al.*. High extinction ratio in-fiber polarizer based on 45° tilted fiber Bragg gratings[J]. Opt Lett, 2005, 30(11): 1285-1287.
- 24 Caucheteur C, Bette S, Chen C, *et al.*. Tilted fiber Bragg grating refractometer using polarization-dependent loss measurement[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(24): 2153-2155.
- 25 Suo R, Chen X, Zhou K, *et al.*. In-fibre directional transverse loading sensor based on excessively tilted fibre Bragg gratings[J]. Measurement Sci Technol, 2009, 20(3): 034015.
- 26 Fu Shenggui, Liu Xiaojuan. Polarization-dependent loss characteristic of 45° tilted fiber Bragg gratings [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(s2): 151-154
付圣贵, 刘晓娟. 45° 倾斜光纤光栅及其偏振依赖损耗特性研究[J]. 中国激光, 2008, 35(s2): 151-154.
- 27 Liu F, Guo T, Wu C, *et al.*. Wideband-adjustable reflection-suppressed rejection filters using chirped and tilted fiber gratings[J]. Opt Express, 2014, 22(20): 24430-24438.
- 28 Chen C, Caucheteur C, Mégret P, *et al.*. The sensitivity characteristics of tilted fiber Bragg grating sensors with different cladding thickness[J]. Measurement Sci Technol, 2007, 18(10): 3117-3122.
- 29 Baek S, Jeong Y, Lee B. Characteristics of short-period blazed fibre Bragg gratings for use as macro-bending sensors[J]. Appl Opt, 2002, 41(4): 631-636.
- 30 Caucheteur C, Chah K, Lhommé F, *et al.*. Simultaneous bend and temperature sensor using tilted FBG [C]. 17th International Conference, 2005.
- 31 Chen C, Albert J. Strain-optic coefficients of individual cladding modes of single mode fiber: theory and experiment[J]. Electron Lett, 2006, 42(18): 1027-1028.
- 32 Guo T, Ivanov A, Chen C, *et al.*. Temperature-independent tilted fiber grating vibration sensor based on cladding-core recoupling[J]. Opt Lett, 2008, 33(9): 1004-1006.
- 33 Laffont G, Ferdinand P. Sensitivity of slanted fibre Bragg gratings to external refractive index higher than that of silica [J]. Electron Lett, 2001, 7(5): 289-291.
- 34 Zhou K, Zhang L, Chen X, *et al.*. Optic sensors of high refractive-index responsivity and low thermal cross sensitivity that use fiber Bragg gratings of $>80^\circ$ tilted structures[J]. Opt Lett, 2006, 31(9): 1193-1195.
- 35 Caucheteur C, Wuilpart M, Chen C, *et al.*. Quasi-distributed refractometer using tilted Bragg gratings and time domain reflectometry[J]. Opt Express, 2008, 16(22): 17882-17890.
- 36 Zheng Jie, Dong Xinyong, Ji Junhua, *et al.*. Power-referenced refractometer with tilted fiber Bragg grating cascaded by chirped grating[J]. Optics Communications, 2014, 312: 106-109.
- 37 Cai Zhongyue, Liu Fu, Guan Baiou. Evanescently coupled optical fiber refractometer based a tilted fiber Bragg grating and

- a D-shaped fiber[J]. *Opt Express*, 2015, 23(16): 20971-20976.
- 38 Guo Chenxi, Chen Debao, Shen Changyu. Optical inclinometer based on a tilted fiber Bragg grating with a fused taper[J]. *Optics Communications*, 2015, 24: 30-33.
- 39 Zhou K, Simpson A G, Zhang L, *et al.*. Side detection of strong radiation-mode out-coupling from blazed FBGs in single-mode and multimode fibers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(7): 936-938.
- 40 Zhou K, Simpson A G, Chen X, *et al.*. Fiber Bragg grating sensor interrogation system using a CCD side detection method with superimposed blazed gratings[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(6): 1549-1551.
- 41 Feder K S, Westbrook P S, Ging J, *et al.*. In-fiber spectrometer using tilted fibre gratings[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(7): 933-935.
- 42 Jáuregui C, Quintela A, López-Higuera J M. Interrogation unit for fiber Bragg grating sensors that uses a slanted fiber grating[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(7): 676-678.
- 43 Chechura E, Murphy R P, James S W, *et al.*. Tilted fiber Bragg gratings with nano-structured overlays[C]. *Optical Fiber Sensors*, 2006.
- 44 Maguis S, Laffont G, Ferdinand P, *et al.*. Biofunctionalized tilted fiber Bragg gratings for label-free immunosensing[J]. *Opt Express*, 2008, 16(23): 19049-19062.
- 45 Yanina Y, Shevchenko Y, Albert J. Plasmon resonances in gold-coated tilted fiber Bragg gratings[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(3): 211-213.
- 46 Allsop T, Neal R, Rehman S, *et al.*. Characterization of infrared surface plasmon resonances generated from a fiber-optical sensor utilizing tilted Bragg gratings[J]. *J Opt Soc Am B*, 2008, 25(4): 481-490.
- 47 Jiang Qi, Lü Dandan, Yu Minghao, *et al.*. The experiment research on solution refractive index sensor based on tilted fiber Bragg grating[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(12): 3425-3431
蒋 奇, 吕丹丹, 于明浩. 倾斜光纤光栅溶液折射率传感器的实验研究[J]. *光谱学与光谱分析*. 2013, 33(12): 3425-3431.
- 48 Yang Dexing, Du Lei, Xu Zengqi. Magnetic field sensing based on tilted fiber Bragg grating coated with nanoparticle magnetic fluid[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 104(6): 061903.
- 49 Jiang Biqiang, Lu Xin, Mao Dong, *et al.*. Carbon nanotube-deposited tilted fiber Bragg grating for refractive index and temperature sensing[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2015, 28(9): 994-997.
- 50 Jiang Biqiang, Lu Xin, Gan Xuetao. Graphene-coated tilted fiber-Bragg grating for enhanced sensing in low-refractive-index region[J]. *Opt Lett*, 2015, 40(17): 3994-3997.
- 51 Mohamad Diaa Baiad, Raman Kashyap. Concatenation of surface plasmon resonance sensors in a single optical fiber using tilted fiber Bragg gratings[J]. *Opt Lett*, 2015, 40(1): 115-118.
- 52 Shen Changyu, Zhang Yang, Zhou Wenjun, *et al.*. Au-coated tilted fiber Bragg grating twist sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 104(7): 071106.