

基于 45° 辐射倾斜光纤光栅的全光纤偏振相关器件

宋青果¹, 黄成俊¹, 闫志君^{1*}, 孙琪真¹, 刘德明¹, 张琳²

¹华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430030;

²华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430030;

³阿斯顿大学光子研究中心, 英国 伯明翰 B4 7ET

摘要 报道一种基于 45° 辐射倾斜光纤光栅(RTFG)的全光纤偏振相关器件。由于独特的偏振相关模式耦合特性, 其可作为一种理想的全光纤起偏器、偏振相关耦合器、全光纤衍射器。基于体电流法建立倾斜光纤光栅的偏振耦合理论, 从理论和实验角度系统地分析 45° RTFG 的偏振辐射耦合、衍射分光及偏振特性。仿真结果和实验结果表明, 45° RTFG 的透射和辐射有良好的偏振功能。一根长度为 24 mm 的 45° RTFG 在波长为 1550 nm 处的偏振消光比(PER)为 22 dB, 3 dB 带宽超过 300 nm。通过制备不同长度的 45° RTFG, 可以实现具有不同 PER 的光栅。光栅的辐射模沿角向呈准高斯分布, 沿轴向呈指数衰减分布, 并且其空间衍射角色散约为 0.054 (°)/nm。实验结果与理论结果完全匹配, 45° RTFG 具有潜在的应用前景。

关键词 光纤光学; 光纤器件; 倾斜光纤光栅; 光纤衍射器件; 光纤偏振器件

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2306003

All-Fiber Polarization-Dependent Device Based on 45° Radiated Tilted Fiber Grating

Song Qingguo¹, Huang Chengjun¹, Yan Zhijun^{1*}, Sun Qizhen¹, Liu Deming¹, Zhang Lin²

¹ School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430030, China;

² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430030, China;

³ Institute of Photonic Technologies, Aston University, Birmingham B4 7ET, UK

Abstract In this study, an all-fiber polarization-dependent device based on a 45° radiated tilted fiber grating (RTFG) is reported. Owing to its unique polarization-dependent mode coupling characteristics, this device can be used as an ideal all-fiber polarizer, polarization-dependent coupler, and all-fiber diffraction device. Based on the volume current method, the polarization coupling theory for tilted fiber gratings is established. The polarization radiation coupling, diffraction splitting, and polarization characteristics of the 45° RTFG are systematically analyzed theoretically and experimentally. Simulation and experimental results show that the transmission and radiation of the 45° RTFG exhibit good polarization function. The 45° RTFG with a length of 24 mm shows a polarization extinction ratio (PER) of 22 dB at a wavelength of 1550 nm, and the 3-dB bandwidth is more than 300 nm. Moreover, the grating with different PER can be prepared by changing the grating length. The radiation mode distribution of the 45° RTFG is measured, which indicates a quasi-Gaussian profile and exponential reduction along the azimuthal and axial directions, respectively. The spatial diffraction angular dispersion is approximately 0.054 (°)/nm, which is consistent with the simulation result. The 45° RTFG has potential application prospects.

Key words fiber optics; fiber device; tiled fiber grating; fiber diffracting device; fiber polarizing device

OCIS codes 060.3735; 050.1950; 230.1950

收稿日期: 2020-07-16; 修回日期: 2020-08-07; 录用日期: 2020-08-19

基金项目: 国家重点研究发展计划(2018YFB2100902)、湖北省技术创新专项重大项目(2019AAA053, 2019AAA059)、湖北省自然科学基金创新群体(2018AAA040)、中央高校基本研究基金(2019kfyRCPY095)

* E-mail: yanzhijun@gmail.com

1 引 言

光纤光栅是一种理想的全光纤器件,在众多应用中受到了广泛的关注。迄今为止,研究者们开发了多种基于光纤光栅的全光纤器件,其中包括光纤反射镜中的光纤布拉格光栅(FBG)^[1]、光纤色散补偿器件中的啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)^[2-3]、光纤带阻滤波器中的光纤长周期光栅(LPG)^[4-5]等,已经在光纤通信、光纤传感及激光领域有着广泛的应用。以上光纤光栅具有相同的特点,即光纤光栅栅面与纤轴垂直。随着光纤光栅理论和制备技术的不断提升,研究者们提出了一种新的光栅结构,其栅面与光纤纤轴有一定夹角,称为倾斜光纤光栅(TFG)^[6-7]。倾斜光纤光栅结构破坏了光纤的圆对称性,其可实现偏振相关的模式耦合特性,并且在不同倾角范围下其模式耦合特点不同。根据全内反射定律,当光纤光栅倾角小于 23.1° 时,其可实现前向传输纤芯模与后向传输包层模之间的耦合,并且拥有密集梳状偏振相关的包层共振模式,透射谱中仍然有布拉格反射存在,因此这种光栅称为倾斜光纤布拉格光栅(TFBG),目前主要应用于光纤生化传感领域^[8]。当光纤光栅倾角为 $23.1^\circ\sim 66.9^\circ$ 时,其可实现前向传输纤芯模与辐射模之间的耦合,由于光谱范围内没有布拉格反射峰,这种光栅称为辐射倾斜光纤光栅(RTFG)^[6]。其中当倾斜角为 45° ,即光纤光栅存在布儒斯特角时,RTFG可以实现单偏振态的模式耦合,即S偏振态的纤芯模以波长相关的辐射角辐射出光纤,P偏振态的纤芯模通过光栅以低损耗继续在光纤中传播。由于特殊的耦合特性, 45° RTFG可作为理想的光纤偏振相关器件。当光纤光栅倾角大于 66.9° ,其可实现前向传输纤芯模与前向传输包层模之间的耦合,这种光栅称为超角度倾斜光纤光栅(Ex-TFG)或倾斜长周期光栅(TLPG),由于光栅结构的倾斜性,其工作光谱拥有一系列偏振相关的包层共振双峰,目前主要应用于光纤生化传感、矢量传感及应变传感领域^[9-11]。

本文将主要针对 45° RTFG模式耦合特性进行系统研究报道。早在2001年,Westbrook等^[12]首次报道了 45° RTFG,主要利用 45° RTFG的单偏振分光特性实现了一种全光纤偏振分析仪。Zhou等^[13-18]利用 45° RTFG实现了一种具有较高偏振消光比(PER)的起偏器,并对 45° RTFG的偏振特性进行了系统研究,基于此,分析了关于全光纤偏振干涉滤波器和全光纤锁模激光器的应用研究。2019

年,Qin等^[19-20]基于体电流法系统地研究了 45° RTFG的辐射模特性,理论和实验分析了 45° RTFG的辐射模角向分布和轴向分布,并理论研究了 45° RTFG的分光衍射特性。Wang等^[21-22]利用 45° RTFG的衍射特性实现了光谱编码成像,其中 45° RTFG作为光纤衍射器件将光纤内的传输光衍射至自由空间中进行图像编码与成像,后来基于 45° RTFG衍射特性实现了无线光通信系统的应用。最近,本课题组^[23]根据 45° RTFG的衍射特性实现了光谱仪的应用。

本文将对 45° RTFG的辐射、衍射及偏振特性进行系统详细的理论研究和实验研究,基于体电流法建立了RTFG的模式耦合模型,理论研究其偏振相关辐射、衍射及起偏特性。实验上制备了 45° RTFG,并对其开展偏振相关性测试研究。

2 45° RTFG 理论模型

与其他光纤光栅不同,RTFG拥有更强的辐射模耦合效率。从光栅的透射传输角度分析,辐射模可以看作是一种传输损耗,并且具有很强的偏振依赖性,可以将不同光信号的S偏振态光辐射出光纤。基于这一特性, 45° RTFG可作为一种理想的全光纤偏振分光器和全光纤起偏器,同时不同波长辐射光拥有不同的衍射角,可作为一种理想的全光纤偏振相关衍射器件,如图1所示。因此 45° RTFG可用作全光纤偏振器件、光纤偏振分束器件及光纤衍射器件。

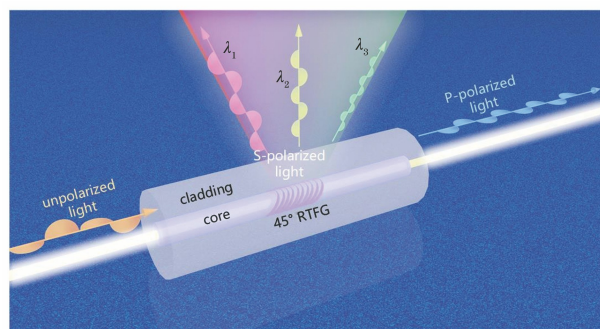


图1 45° RTFG特性示意图

Fig. 1 Characteristic diagram of 45° RTFG

目前,光纤光栅理论主要包括耦合模理论、体电流法等。其中耦合模理论^[24-25]主要用于研究波导的传输损耗和模式转换等问题,但无法详细分析RTFG辐射模场特性。体电流法^[26-27]是众多波导辐射问题的经典分析方法,它可以利用由波导扰动导出的矢量势来推导辐射场,非常适用于解释辐射模的角向分布和轴向分布^[28]。本文主要利用体电

流法构建 45° RTFG 辐射传输模型,系统地分析 45° RTFG 的偏振传输分布、辐射分布及衍射特性。

RTFG 具有连续辐射特性,纤芯中的光成比例地沿光栅耦合出光纤,在研究 RTFG 辐射模时,可以沿光纤轴将 RTFG 分为若干个具有相同结构的

子截面。根据体电流法理论,光栅微扰引起的场功率流密度矢量,即 45° RTFG 的坡印廷矢量^[24]可以表示出光栅的辐射场强度。该矢量描述 45° RTFG 在不同偏振态下入射光沿光纤圆周的能量辐射分布,坡印廷矢量大小表示为

$$S = \frac{\pi\epsilon_0 d^2 a^2}{4r} \left\{ \left(\beta - \frac{\pi^2}{2\Lambda} \right)^2 + \left[k_0^2 n_0^2 - \left(\beta - \frac{\pi^2}{2\Lambda} \right)^2 \right] \sin^2(\delta - \phi) \right\} \left[\frac{K_s J_0(ua) J_1(K_s a) - u J_1(ua) J_0(K_s a)}{K_s^2 - u^2} \right]^2, \quad (1)$$

式中: Λ 为光栅周期; a 为光纤芯径; r 为光纤半径; d 为光栅调制深度; β 为纵向传播常数; k_0 为传输光波矢大小; n_0 为纤芯折射率; δ 和 ϕ 分别为辐射光的偏振角和方位角; K_s 为光栅、入射光、出射光波矢量之间的匹配失常; c 为光速; u 为横向传播常数; $J_0(\cdot)$ 为 0 阶贝塞尔函数。

坡印廷矢量描述了单位长度 45° RTFG 在光纤

不同角向下的辐射能量,由于光纤是圆对称结构,根据(1)式,一定长度 45° RTFG 偏振相关辐射能量可以表示为坡印廷矢量角向和轴向的积分叠加:

$$I = \int \left(\oint S d\phi \right) dl = I_0 \exp(-\alpha l), \quad (2)$$

式中: I_0 为入射光强; l 为光栅长度; α 为 45° RTFG 的衰减系数,可以表示为

$$\alpha = \frac{\pi n_0^2 d^2 a^2 k_0^3}{2r} \oint \left[1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} - \delta \right) \right] \left[\frac{K_s J_0(ua) J_1(K_s a) - u J_1(ua) J_0(K_s a)}{K_s^2 - u^2} \right] d\delta, \quad (3)$$

式中: γ 为辐射光出射角,与入射光的波长相关。利用(2)式可以得到 45° RTFG 的不同偏振辐射损耗。

2.1 45° RTFG 辐射分布

由于 45° RTFG 的辐射可认为是一种辐射损耗,对于均匀强度的光栅来说,对应的辐射光场将呈

现不均匀能量分布,因此理论分析 45° RTFG 辐射模的轴向和角向空间分布特性。根据体电流法推导 45° RTFG 辐射能量,辐射能量与出射光方位角和光栅轴向长度相关,则 45° RTFG 沿角向和轴向的辐射场分布分别表示为

$$I(\phi) = \left[1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} - \phi \right) \right] \left[\frac{K_s J_0(ua) J_1(K_s a) - u J_1(ua) J_0(K_s a)}{K_s^2 - u^2} \right]^2, \quad (4)$$

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha z). \quad (5)$$

图 2 为 45° RTFG 的辐射模角向分布和轴向分布仿真结果,其辐射模角向为准高斯分布,方位角为 90° 时,辐射模功率最大。轴向为指数衰减分布,光功率随光栅长度增加而减小。

2.2 45° RTFG 衍射特性

RTFG 的空间辐射角与入射光波长相关,基于这一特性,45° RTFG 可以作为理想的全光纤衍射器件。入射光在 45° RTFG 的界面处耦合并且反射,基于矢量光学分析方法^[20]来研究 45° RTFG 的衍射特性。根据相位匹配条件,入射光波矢大小、衍射光波矢大小及光栅矢量大小满足

$$K_r = K_c + K_{G_x} + K_{G_y}, \quad (6)$$

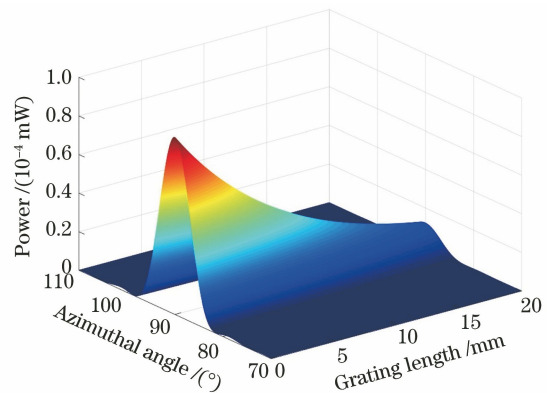


图 2 45° RTFG 辐射模角向分布和轴向分布仿真
Fig. 2 Simulation of 45° RTFG radiation mode angular distribution and axial distribution

式中： $K_c = K_r = 2\pi n/\lambda$ ， λ 为入射光波长， n 为光纤有效折射率； K_{G_x} 和 K_{G_y} 为光栅矢量在水平方向和垂直方向上的分量。由(6)式得到 45° RTFG 的衍射角，表示为

$$\gamma = \arcsin \frac{1 - \frac{\sqrt{2}n_0\Lambda}{\lambda}}{\sqrt{1 + \left(1 - \frac{\sqrt{2}n_0\Lambda}{\lambda}\right)^2}} \quad (7)$$

2.3 45° RTFG 偏振消光比

RTFG 辐射模实际上是纤芯中光信号的传输损耗，当光栅倾角为 45° 时，传输损耗表现出很强的偏振相关性，其中 S 偏振态的光全部被辐射出纤芯，而 P 偏振态的光低损耗地通过光栅区域，因此 45° RTFG 可以作为理想的全光纤 P 偏振态偏振器件。PER 是评价偏振特性的一个关键参数，它定义为正

交偏振态之间的光功率比，对于起偏器来说，PER 越高，将输入光变为线偏振光的能力就越强^[29]。由(2)式可获得 45° RTFG 的 S 偏振态和 P 偏振态光的传输损耗。 45° RTFG 的 PER 可以表示为

$$R_{PE} = 10 \times \log\{\exp[-(a_{\max} - a_{\min})l]\}, \quad (8)$$

式中： α_{\max} 和 α_{\min} 分别为 45° RTFG 中 S 偏振态和 P 偏振态透射光的衰减系数，其中它们的偏振角 δ 分别对应 0° 和 90° 。图 3(a) 为 45° RTFG 的 S 偏振态和 P 偏振态光透射谱仿真图，S 偏振态的光在 1550 nm 附近几乎全部损耗，而 P 偏振态的光几乎没有损耗。图 3(b) 为 45° RTFG 的 PER 仿真图，光栅长度设置为 24 mm，周期为 748 nm，折射率调制深度为 0.001，光纤纤芯折射率为 1.448，芯径为 $4 \mu\text{m}$ 。仿真结果表明，1550 nm 处的 PER 达到最大值约 21 dB，整个 PER 仿真光谱 3 dB 带宽约为 300 nm。

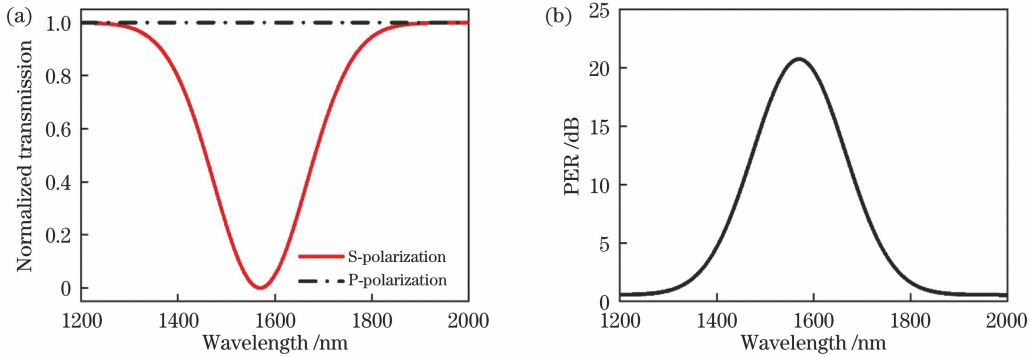


图 3 45° RTFG 参数仿真。(a) S 偏振态和 P 偏振态光的透射谱仿真；(b) PER 仿真

Fig. 3 Parameter simulation of 45° RTFG. (a) Transmission spectrum simulation of light with S and P polarization states; (b) PER simulation

3 45° RTFG 制备和偏振相关特性实验研究

3.1 45° RTFG 的制备

实验中采用相位掩模紫外曝光法实现 45° RTFG 制备。具体的制备方法已经在参考文献[11]报道。详细的制备系统构造如图 4(a) 所示，其中包括 248 nm 准分子激光器、光路准直系统、光束聚焦系统。聚焦紫外激光光束透过相位掩模板形成干涉条纹，在光纤纤芯处得到周期性的折射率调制。由于圆形光纤结构，制备过程中光纤纤芯内部光栅倾斜角与掩模板倾角的关系满足

$$\theta_G = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{1}{n_{UV} \tan \theta_M}\right), \quad (9)$$

式中： θ_G 为光栅倾斜角； θ_M 为掩模板倾斜角； n_{UV} 为紫外激光下的光纤折射率。当掩模板倾角为 33.7° 时，制备得到光栅倾角为 45° 的 RTFG。图

4(b) 为在普通单模光纤上制备得到的 45° RTFG 微观图，其中纤芯直径约为 $8.65 \mu\text{m}$ ，折射率调制条纹与纤芯呈 45° 夹角，10 个周期的光栅长度约为 $7.59 \mu\text{m}$ 。

3.2 45° RTFG 的辐射分布实验

为了进一步测量 RTFG 辐射模分布特征，搭建了 RTFG 辐射模测量平台，其主要包括可调谐激光器、偏振控制器、光束分析仪、光功率计及光纤旋转器，如图 5(a) 所示。实验中所用 45° RTFG 光栅周期为 759 nm，光栅长度为 10 mm。通过偏振控制器和光功率计，可以将传输光的偏振态调节为 P 偏振态或 S 偏振态，当将光功率计示数调节到最小时，传输光的偏振态为 S 偏振态，即大部分光能量都辐射出纤芯。通过调节光纤旋转器， 45° RTFG 辐射光准直入射到光束分析仪上，从而对辐射模轴向分布特性进行分析。实验中所用的光束分析仪的有效监

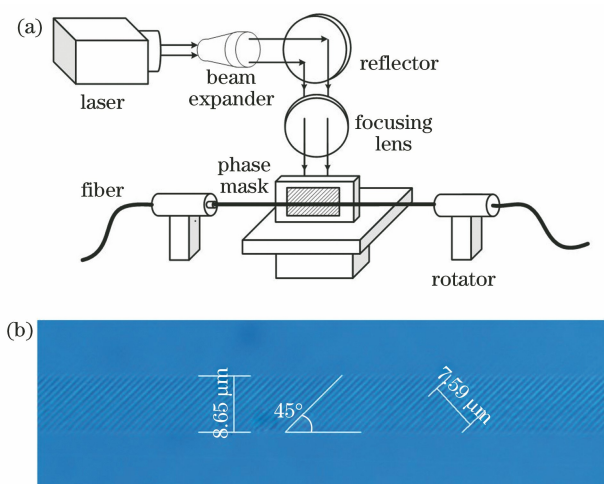


图 4 45° RTFG 制备。(a)光栅制备系统；
(b) 45° RTFG 微观结构

Fig. 4 Preparation of 45° RTFG. (a) Grating preparation system; (b) microstructure of 45° RTFG

测区域为 11 mm,其测试实验结果如图 5(b)、(c)所示,辐射模沿光纤角向的强度分布呈高斯分布,沿光纤轴向的强度分布呈指数衰减,轴向衰减速度取决于 RTFG 耦合强度,实验结果与仿真结果一致。

3.3 45° RTFG 的衍射特性实验

此外,由于光栅的衍射作用,不同波长光拥有不同的光束辐射角,RTFG 也是一种理想的全光纤衍射光栅。实验中需测量不同波长衍射光束的空间衍射角,具体测量平台如图 6(a)所示,45° RTFG 的衍射光被柱透镜准直,之后被光束分析仪接收,得到不同波长下的衍射角。利用 45° RTFG 的角色散实验来验证理论模型的正确性,入射光波长与衍射角呈线性关系,实验测量得角色散系数约为 0.054 (°)/nm,与仿真结果 0.053 (°)/nm 吻合,如图 6(b)所示。结果表明,45° RTFG 作为光纤色散器件具有良好的衍射特性。

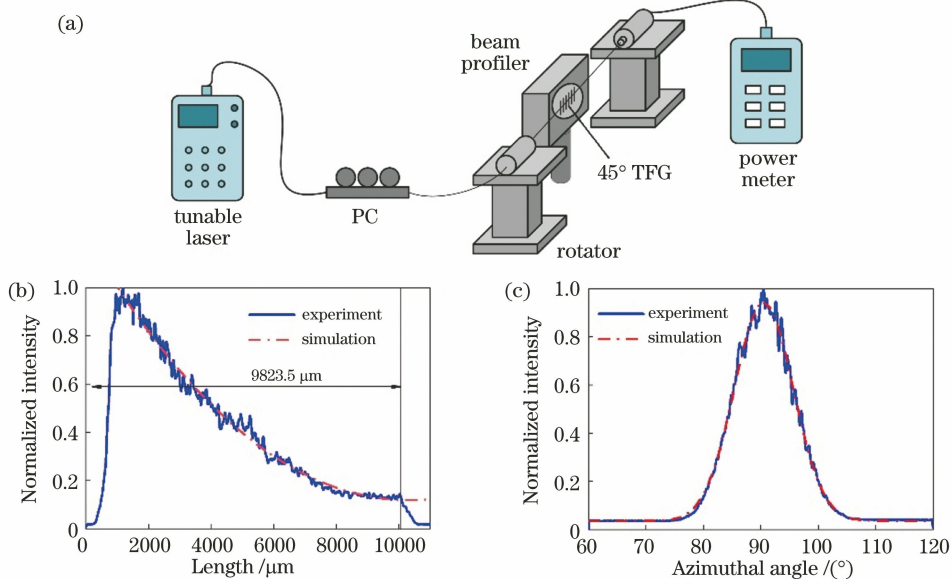


图 5 45° RTFG 辐射模分布实验。(a)实验装置;(b)辐射模沿角向分布的实验和仿真结果;
(c)辐射模沿轴向分布的实验和仿真结果

Fig. 5 Radiation mode distribution experiment of 45° RTFG. (a) Experimental setup; (b) experimental and simulation results of radiation mode distribution along azimuthal direction; (c) experimental and simulation results of radiation mode distribution along axial direction

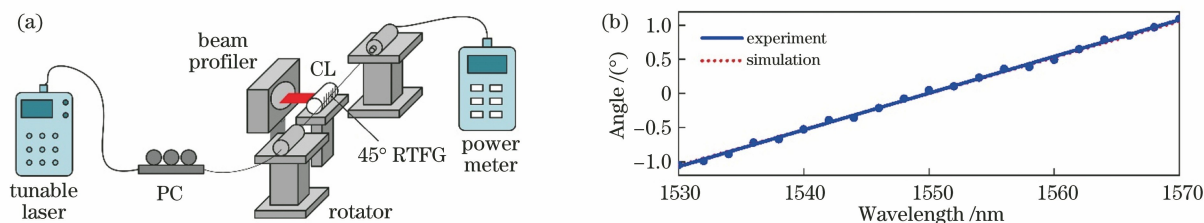


图 6 45° RTFG 的衍射特性。(a)测量装置;(b)衍射角随波长的变化

Fig. 6 Diffraction characteristics of 45° RTFG. (a) Experiment setup; (b) diffraction angle versus wavelength

3.4 45° RTFG 的偏振特性实验

与传统的 FBG 不同,45° RTFG 是一种偏振相关器件,PER 是评价其特性的一个重要参数,通过测量 PER,可以分析 45° RTFG 的偏振消光特性。实验中测量了周期约为 759 nm 的 45° RTFG 光栅的 PER,其工作中心波长为 1550 nm。当光栅长度为 24 mm 时,45° RTFG 在 1550 nm 中心波长处的 PER 约为 22 dB,如图 7(a) 所示。通过将 45° RTFG 的输入端以 10° 为增量从 0° 旋转至 360° 来测量单一波长下的偏振分布,该偏振分布呈“8”字形状,显示 45° RTFG 拥有很好的线偏振起偏特性,结

果如图 7(b) 所示。为了进一步测量 45° RTFG 的整个 PER 光谱轮廓,实验中利用超连续宽带光源和起偏器,通过测量不同波长位置处的 PER 实现 45° RTFG 全 PER 光谱测量,实验结果显示,其光谱轮廓呈近似高斯型,3 dB 带宽约为 300 nm,实验结果与仿真结果一致,如图 7(c) 所示。为了研究不同光栅长度对 PER 的影响,实验中还测量了不同长度、周期约为 759 nm 的 45° RTFG 的 PER,实验结果表明,45° RTFG 的 PER 与光栅长度线性相关,这与(8)式结论相符合,通过增加光栅长度可以进一步提高 45° RTFG 的 PER,如图 7(d) 所示。

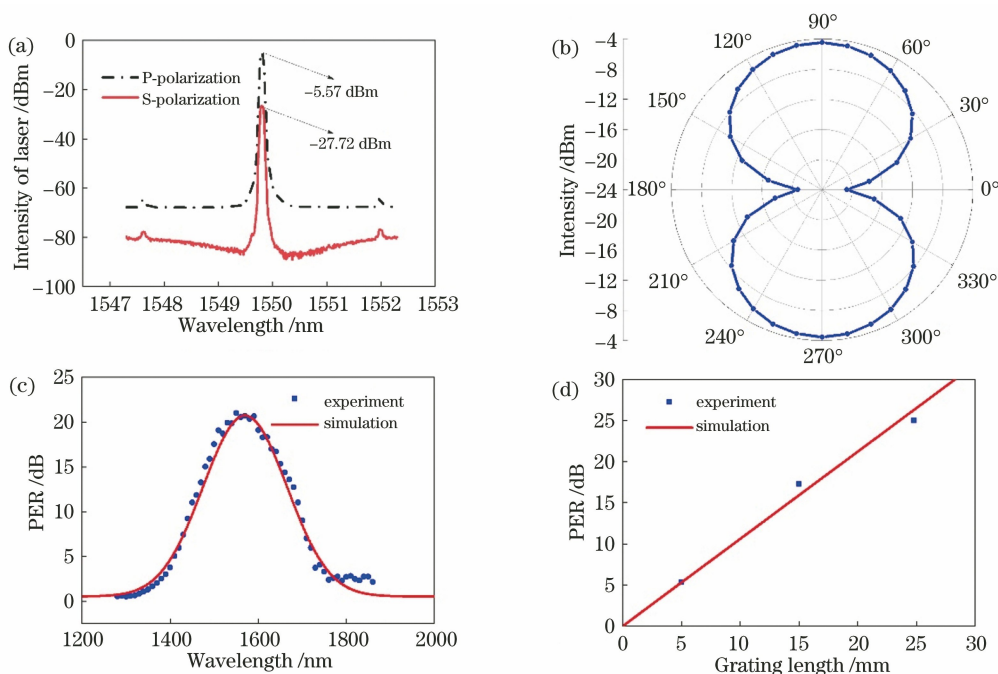


图 7 45° RTFG 的偏振特性。(a) 透射光谱;(b) 偏振分布;(c) PER 光谱轮廓;(d) PER 与光栅长度的关系
Fig. 7 Polarization characteristics of 45° RTFG. (a) Transmission spectra; (b) polarization distribution; (c) PER spectrum profile; (d) relationship between PER and grating length

4 结 论

展示了一种基于全光纤偏振器件的 45° RTFG,其可作为全光纤分光、色散及偏振器件。从光栅耦合理论、制备过程和实验角度,系统地分析了 45° RTFG 的辐射、衍射及偏振特性。通过倾斜相位掩模板和紫外曝光技术,在普通单模光纤上制备了光栅周期为 759 nm、倾斜角为 45° 的 RTFG,并且研究了光栅的辐射模分布、角色散及 PER 特性。实验结果显示:45° RTFG 的辐射模式沿角向呈高斯分布,沿轴向呈指数衰减分布;角色散为 0.054 (°)/nm,在通信 C 波段范围内具有线性衍射特性。最后测量了具有不同长度的 45° RTFG 的

PER,结果显示 PER 与光栅长度之间存在线性关系,这表明通过改变光栅长度可以实现任意 PER 的 45° RTFG;一根长度为 24 mm 的 45° RTFG 的 PER 在 1550 nm 中心波长处约为 22 dB,且具有 300 nm 左右 3 dB 带宽的 PER 响应,覆盖了较宽的波长范围。45° RTFG 是一种理想的全光纤偏振相关器件,利用其独特的偏振耦合模特性,可以实现光纤偏振分光、色散及偏振器件,在光通信、光传感及激光系统等领域中具有广泛的应用价值。

参 考 文 献

[1] Hill K O, 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.
- [2] Zhao Y C, Li T J, Jian S S, et al. Investigation of chirped fiber gratings on chromatic dispersion and time delay[J]. Acta Optica Sinica, 1997: 119-122.
赵玉成, 李唐军, 简水生, 等. 啁啾光栅色散及时延特性研究[J]. 光学学报, 1997: 119-122.
- [3] Zhang P K, Li Y L, Liu J Y, et al. Improvement to dispersion property of a linearly chirped grating by optimizing the distribution of coupling coefficient[J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(8): 696-700.
张培琨, 李育林, 刘家英, 等. 优化啁啾光栅耦合系数分布改善其色散特性[J]. 中国激光, 1999, 26(8): 696-700.
- [4] Liu L, Wang M, Xi X M, et al. Design and fabrication of low-loss long-period fiber gratings operating at 2 μm waveband[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0306002.
刘乐, 王蒙, 奚小明, 等. 2 μm 波段低损耗长周期光纤光栅设计与制作[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0306002.
- [5] Tao H, Mi Y A, Gu H, et al. Properties of vector mode coupling in mechanically induced microbend long-period fiber gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1206003.
陶洪, 牟月安, 古皓, 等. 机械微弯长周期光纤光栅矢量模耦合特性研究[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1206003.
- [6] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. In-fiber Bragg grating tap [C]//Optical Fiber Communication, January 22, 1990, San Francisco, California. Washington, D.C.: OSA, 1990: TUG1.
- [7] Erdogan T, Sipe J E. Tilted fiber phase gratings[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(2): 296-313.
- [8] Guo T, Liu F, Shao L Y. Tilted fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Applied Sciences, 2018, 36(1): 75-103.
郭团, 刘甫, 邵理阳. 倾斜光纤光栅传感器[J]. 应用科学学报, 2018, 36(1): 75-103.
- [9] Luo B B, Yan Z J, Sun Z Y, et al. Novel glucose sensor based on enzyme-immobilized 81° tilted fiber grating[J]. Optics Express, 2014, 22(25): 30571-30578.
- [10] Yan Z J, Sun Z Y, Zhou K M, 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.
- [11] Luo B B, Xie L, Wang Y J, et al. Performance optimization of excessively tilted fiber grating cantilever beam vibration sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0806006.
罗彬彬, 谢浪, 王亚杰, 等. 极大倾角光纤光栅悬臂梁振动传感器性能优化[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0806006.
- [12] Westbrook P S, Strasser T A, Erdogan T. In-line polarimeter using blazed fiber gratings [J]. Optics and Photonics News, 2001, 12(12): 50.
- [13] Zhou K M, Simpson G, Chen X F, et al. High extinction ratio in-fiber polarizers based on 45 degree tilted fiber Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2005, 30(11): 1285-1287.
- [14] Yan Z J, Mou C B, Zhou K M, et al. UV-inscription, polarization-dependent loss characteristics and applications of 45° tilted fiber gratings [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(18): 2715-2724.
- [15] Yan Z J, Mou C B, Wang H S, et al. All-fiber polarization interference filters based on 45°-tilted fiber gratings[J]. Optics Letters, 2012, 37(3): 353-355.
- [16] Mou C B, Zhou K M, Zhang L, et al. 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.
- [17] Wang T X, Yan Z J, Mou C B, et al. 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.
- [18] Lu B B, Zou C H, Huang Q Q, et al. Widely wavelength-tunable mode-locked fiber laser based on a 45°-tilted fiber grating and polarization maintaining fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(14): 3571-3578.
- [19] Qin H B, He Q Y, Xing Z K, et al. Numerical and experimental characterization of radiation mode of 45° tilted fiber grating [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(15): 3777-3783.
- [20] Qin H B, He Q Y, Xing Z K, et al. In-fiber single-polarization diffraction grating based on radiant tilted fiber grating [J]. Optics Letters, 2019, 44(17): 4407-4410.
- [21] Wang G Q, Wang C, Yan Z J, et al. Highly efficient spectrally encoded imaging using a 45° tilted fiber grating[J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2398-2401.
- [22] Wang G, Habib U, Yan Z, et al. Highly efficient optical beam steering using an in-fiber diffraction grating for full duplex indoor optical wireless communication [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4618-4625.

- [23] Qin H B, He Q Y, Moreno Y, et al. Compact linear polarization spectrometer based on radiation mode shaped in-fiber diffraction grating [J]. Optics Letters, 2019, 44(21): 5129.
- [24] Bouzid A, Abushagur M A G. Scattering analysis of slanted fiber gratings[J]. Applied Optics, 1997, 36(3): 558-562.
- [25] Erdogan T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters: errata[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2000, 17(11): 2113.
- [26] Li Y, Froggatt M, Erdogan T. Volume current method for analysis of tilted fiber gratings [J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(10): 1580-1591.
- [27] Walker R B, Mihailov S J, Lu P, et al. Shaping the radiation field of tilted fiber Bragg gratings [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2005, 22(5): 962-974.
- [28] Li Y, Brown T G. Radiation modes and tilted fiber gratings [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2006, 23(8): 1544-1555.
- [29] Guo X, Xing Z K, Qin H B, et al. Study on polarization spectrum and annealing properties of 45°-tilted fiber gratings [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(5): 050601.