

激光与光电子学进展

超角度倾斜光纤光栅的研究进展

孙玥真¹, 闫志君^{1*}, 孙琪真¹, 周凯明², 张琳²

¹华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

²阿斯顿大学光子研究中心, 英国 伯明翰 B4 7ET

摘要 超角度倾斜光纤光栅(Ex-TFG)是一种结构新颖的新型光纤光栅器件,具有正交偏振耦合、高折射率灵敏度、低温度灵敏度以及矢量传感响应等特点。近年来,得益于Ex-TFG对周围环境折射率敏感的特点,其在生化传感领域得到了广泛的研究和应用。同时,Ex-TFG的非圆对称倏逝场分布为矢量传感应用提供了可能。基于理论和实验研究,从光栅的基本耦合模理论、包层模式传输特性等方面,详细介绍了Ex-TFG的基本理论和传感特性研究进展。

关键词 光纤光学; 倾斜光纤光栅; 光纤传感; 矢量传感

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306013

Research Progress of Excessively Tilted Fiber Grating

Sun Yuezhen¹, Yan Zhijun^{1*}, Sun Qizhen¹, Zhou Kaiming², Zhang Lin²

¹School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

²Institute of Photonic Technologies, Aston University, Birmingham B4 7ET, UK

Abstract The excessively tilted fiber grating (Ex-TFG) is a novel fiber grating device with unique structure, which has the characteristics of orthogonal polarization coupling, high refractive index sensitivity, low temperature sensitivity and vector sensing response. Recent years, benefitting from the fact that Ex-TFG is sensitive to the surrounding environment refractive index, Ex-TFG has been widely investigated and applied in the field of biochemical sensing. Meanwhile, the non-circular symmetric evanescent field distribution of Ex-TFG provides the possibility for vector sensing applications. Based on the theoretical and experimental research, the basic theory and research progress of sensing characteristics of Ex-TFG are exhibited in detail in terms of basic coupled-mode theory of gratings and properties of transmitted cladding modes.

Key words fiber optics; tilted fiber grating; fiber sensing; vector sensing

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 280.4788

1 引言

近年来,光纤传感技术与其他技术的结合,使得光纤传感发展更加迅速^[1]。光纤传感已在军事国防^[2-3]、电力传输系统^[4-5]、土木工程^[6]等领域得到了

广泛的应用。光纤光栅可改变光纤中光的传输方式,具有对环境响应灵敏、抗电磁干扰以及易于复用等优点,受到了广泛关注。光纤布拉格光栅(FBG)^[7]与长周期光纤光栅(LPG)^[8]均为光栅栅面与光纤纤轴垂直的结构,已被应用于滤波器、生化

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-05-28; 录用日期: 2021-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(62075071)、国家优秀青年基金(61922033)

通信作者: *yanzhijun@hust.edu.cn

传感等领域。而倾斜光纤光栅(TFG)^[9]借助栅面的倾斜打破了光纤的圆对称性,具有一定的偏振相关特性。根据耦合特性的不同可分为三类。1) 小角度倾斜光纤光栅(TFBG):前向传输的纤芯模与后向传输的包层模耦合,主要应用于生化传感领域^[10-12]。2) 45° TFG:前向传输的纤芯模与辐射模耦合,主要应用于光谱仪等^[13-16]。3) 超角度倾斜光纤光栅(Ex-TFG):前向传输的纤芯模与前向传输的包层模耦合,具有高折射率灵敏度、低温度串扰以及矢量传感特性,是生化传感及矢量传感等领域的最佳选择之一^[17]。

本文主要介绍了近年来Ex-TFG的基础理论研究,从耦合理论以及包层模式的数值分析方面,结合相位匹配条件,详细分析了光栅的高折射率灵敏度、低温度串扰以及矢量传感的原理。2006年,Zhou等^[18]提出倾斜角度超过80°、周期为数十 μm 的光栅,光栅透射光谱中存在一系列的偏振相关双峰,并且在1.33左右的折射率区域拥有更灵敏的响应和更低的温度灵敏度。同年,Chen等^[19]提出基于Ex-TFG的扭曲矢量传感器,其灵敏度可达到 $14.3 \mu\text{W}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$,研究人员通过监测光栅两偏振态的变化可推测扭曲的方向和角度。2009年,Suo等^[20]将Ex-TFG应用于横向压力传感,可得 $2.04 \mu\text{W}/\text{kg}$ 的灵敏度。2013年,Mou等^[21]提出基于Ex-TFG的液位传感器,在3~10 mm的水位范围内,传感器表现出良好的线性度,其灵敏度达到13%/mm。2015年,Yan等^[22]对比了不同包层半径的Ex-TFG的折射率灵敏度,包层半径为40 μm 时,Ex-TFG的横磁(TM)模在折射率为1.345处的灵敏度最大值为1180 nm/RIU(Refractive index unit)。2016年,Yan等^[23-24]对Ex-TFG的基本特性进行了理论和实验分析,并系统地研究了折射率和温度传感特性。2016年,Jiang等^[25]对石墨烯涂覆的Ex-TFG的光栅光谱及折射率特性进行了研究,石墨烯涂覆层的存在使得Ex-TFG的TM模谐振波长变长,横电(TE)模的幅度变化变大。2021年,Sun等^[26]理论解释并实验验证了Ex-TFG具有矢量传感的特征。2014年,Luo等^[27]制备了基于Ex-TFG的葡萄糖传感器,其灵敏度可达到 $0.298 \text{ nm}/(\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1})$ 。2018年,Jiang等^[28]提出基于二维材料氧化石墨烯涂覆的Ex-TFG的葡萄糖传感器,其灵敏度得到大幅度提高,可达 $1.33 \text{ nm}/(\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1})$ 。同年,Liu等^[29]提出基于黑磷涂层的Ex-TFG的重金属离子传感器,其测

量铅离子灵敏度可达 $0.5\times 10^{-3} \text{ dB}/10^{-9}$ 。2019年,Lu等^[30]将Ex-TFG应用于磁场矢量传感,其灵敏度最高可达到 $2.45 \text{ nm}/\text{mT}$ 。同年,Xie等^[31]将Ex-TFG应用于加速度矢量传感,实现了 $74.14 \text{ mV}/g$ (g 表示重力加速度)的加速度灵敏度以及最高 $9.1 \text{ mV}/(^{\circ})$ 的方向灵敏度的测量,可应用于结构监测等领域。

迄今为止,基于Ex-TFG的光纤传感器的理论研究已较为成熟,且在国内外均得到了广泛的应用。本文将从Ex-TFG的耦合理论、制备方法和传感特性方面进行详细的综述。基于Ex-TFG的模式耦合和包层模式特征,理论研究了其光谱特性;基于相位匹配条件系统分析了折射率传感、矢量传感和温度传感机制;并介绍了Ex-TFG制备方法以及其传感相关特性的测试研究。

2 超角度倾斜光纤光栅特性分析

区别于其他类型的光栅,Ex-TFG最大的特点是光栅的栅面与光纤轴向倾斜,且其夹角大于 66.9° ,如图1所示。倾斜的光栅栅面破坏了光纤的圆对称性,使得光栅具有很强的偏振特性。根据光栅倾斜方向,光栅的快慢轴方向如图1所示。在前向传输的纤芯模与前向传输的包层模的耦合过程中,Ex-TFG的包层模谐振峰会分裂成两个偏振相关峰,理论和实验研究发现,偏振相关双峰分别对应着TM包层模和TE包层模^[32]。

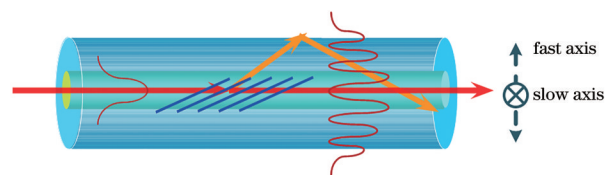


图1 Ex-TFG结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Ex-TFG structure

2.1 耦合模理论分析

Ex-TFG的超角度和较长周期的特点使得光栅中的模式耦合行为比LPG中更加复杂,模式之间的耦合发生在纤芯模和更高阶包层模之间。光栅中传输的包层模式能量和耦合行为的变化主要取决于光栅的耦合系数。因此,在弱波导近似条件下,透射式倾斜光栅的耦合主要发生在前向传输的纤芯模和非零角向阶数包层模之间,其耦合系数的表达式^[33-34]为

$$C_{lm-01}^{cl} = A^{cl} \int_0^a r dr J_{l-1}(2rK_g \sin \theta) \times J_{l-1}(u_{lm}r) J_0(u_0r), \quad (1)$$

式中: J 为贝塞尔函数; A^{cl} 为包层模的振幅; cl 表示包层模; a 为光栅纤芯半径; K_g 为光栅的波数; g 为 TFG 的法向参数; $lm-01$ 表示第 l 阶角向下的第 m 阶包层模和纤芯基模的耦合; u_0 和 u_{lm} 分别为纤芯基模和第 l 阶角向下的第 m 阶包层模的横向波导常数; θ 为光栅的倾斜角度。

根据(1)式, 仿真计算获得不同方位角阶数下 Ex-TFG 的纤芯基模和包层模的耦合系数变化, 结果如图 2(a) 所示。结果显示, 随着方位角阶数的增大, 光栅耦合系数的范围逐渐向高阶模方向移动且强度逐渐减小。由于实验中制备的 Ex-TFG 的周期

通常约为数十 μm , 根据相位匹配条件, 光栅中传输的包层模主要集中在前 40 阶模式。因此, 在 Ex-TFG 中主要的模式耦合行为发生在纤芯基模 LP_{01} 模和包层 LP_{1m} 模之间^[26]。对于 LP_{1m} 模, 其模场在角向的分布存在两个零场强, 呈现出图 2(b) 所示的分布特点, 这两个零场强沿慢轴分布, 这种非对称的光场分布使得光栅对外界环境可产生非对称的响应。以上分析基于弱波导近似, 虽然存在较大的分析误差, 但极大简化了模式耦合分析, 同时模式间的耦合趋势与实际耦合行为是一致的, 因此不影响现象和结果的理论分析。

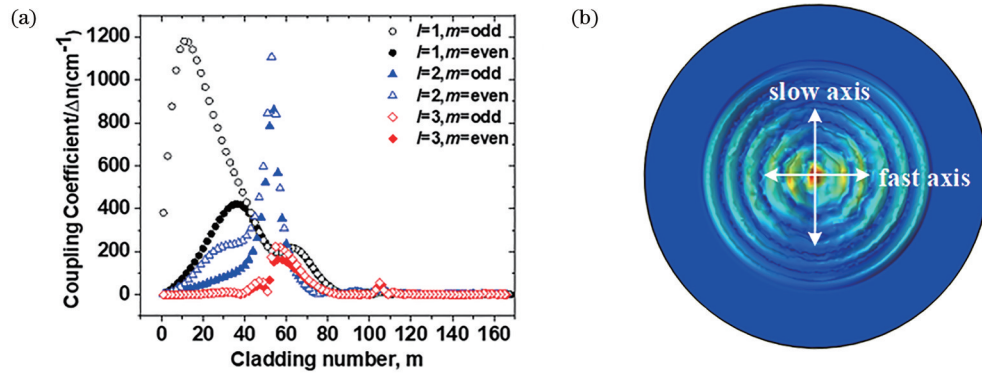


图 2 Ex-TFG 模式耦合仿真结果。(a) Ex-TFG 中 $l=1, 2, 3$ 时的不同包层模的耦合系数^[26]; (b) Ex-TFG 的包层模场分布
Fig. 2 Mode coupling simulation results of Ex-TFG. (a) Coupling coefficients of different cladding modes with $l=1, 2, 3$ in Ex-TFG^[26]; (b) field distribution in Ex-TFG cladding mode

2.2 超角度倾斜光纤光栅的相位匹配数值分析

Ex-TFG 的传感特性依赖于包层模式的特性变化。根据 Maxwell 特征方程, TM_{0m} 和 TE_{0m} 的本征值表达式^[23]为

$$\frac{J_1(u)}{uJ_0(u)} + (1 - 2\Delta n) \frac{K_1(w)}{wK_0(w)} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{J_1(u)}{uJ_0(u)} + \frac{K_1(w)}{wK_0(w)} = 0, \quad (3)$$

式中: J_1 和 J_0 分别为第 1 阶和第 0 阶贝塞尔函数; K_1 和 K_0 分别为第 1 阶和第 0 阶汉开尔函数; $u = 2\pi r_{cl} / \lambda \sqrt{n_{cl}^2 - (n_{eff}^{cl-m})^2}$, $w = 2\pi r_{cl} / \lambda \sqrt{(n_{eff}^{cl-m})^2 - n_{air}^2}$, 其中, r_{cl} 为包层半径, n_{cl} , n_{eff}^{cl-m} 和 n_{air} 分别为光纤的包层模折射率、包层模的有效折射率和空气折射率; Δn 为包层模和空气折射率之差。

为了简化分析, 仿真中采用两层波导模型, 即有限尺寸的圆柱波导层和无限尺寸的空气层。通过计算机仿真, 计算得到的 Ex-TFG 中 TM 模和 TE 模的

包层模有效折射率和波长的关系如图 3 所示。TM 模和 TE 模是 LP_{1m} 的一对简并模式, 其变化趋势相同。在同一模式阶数下, 包层模的有效折射率随着波长的增大而减小; 在同一波长下, 包层模的有效折射率随着模式阶数的增大而减小。其中, 在相同的

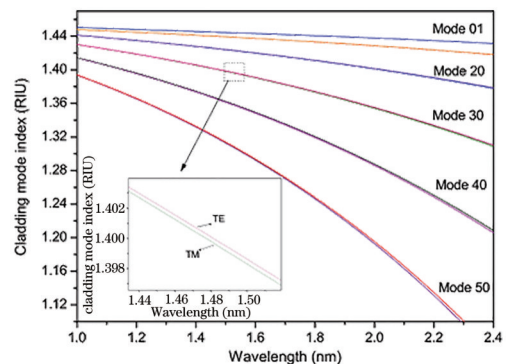


图 3 TE 模和 TM 模的包层模有效折射率^[21]
Fig. 3 Cladding mode effective indexes of TE and TM modes^[21]

条件下,TE 模的有效折射率略高于 TM 模^[23]。

Ex-TFG 的相位匹配条件^[24]可表示为

$$\lambda = \Lambda \left(n_{\text{eff}}^{\text{co-01}} - n_{i,\text{eff}}^{\text{cl-}m} \right) = \frac{\Lambda_G}{\cos \theta} \left(n_{\text{eff}}^{\text{co-01}} - n_{i,\text{eff}}^{\text{cl-}m} \right), \quad (4)$$

式中: i 表示 TM 或者 TE 模; λ 为谐振波长; $n_{\text{eff}}^{\text{co-01}}$ 为光栅纤芯基模的有效折射率 (co-01 为纤芯基模); $n_{i,\text{eff}}^{\text{cl-}m}$ 为光栅第 m 阶 TM/TE 包层模的有效折射率 (cl- m 为第 m 阶包层模); Λ 、 Λ_G 和 θ 分别为光栅轴向周期、光栅法向周期和倾斜角度。由 (4) 式可知, 倾斜光栅模式耦合主要取决于纤芯和包层模的有效折射率差以及光栅的轴向周期。

根据 (4) 式, 可以获得 Ex-TFG 不同包层模阶数下 TM 模和 TE 模的光栅周期和谐振波长的关系, 结果如图 4 所示。与 LPG 一致, 所有前向耦合包层模均存在一个转折点, 且转折点对应的谐振波长随着包层模式阶数的增大而减小。在转折点之前, 光栅 TM 模的谐振波长大于 TE 模; 在转折点之后, 光栅 TM 模的谐振波长小于 TE 模^[23]。通常实验所用 Ex-TFG 的光栅周期一般为几十 μm , 主要对应于光栅的高阶包层模, 如图 4(d) 所示, 光栅中传输的包层模 TM 模的谐振波长都小于 TE 模的结论得到了验证。

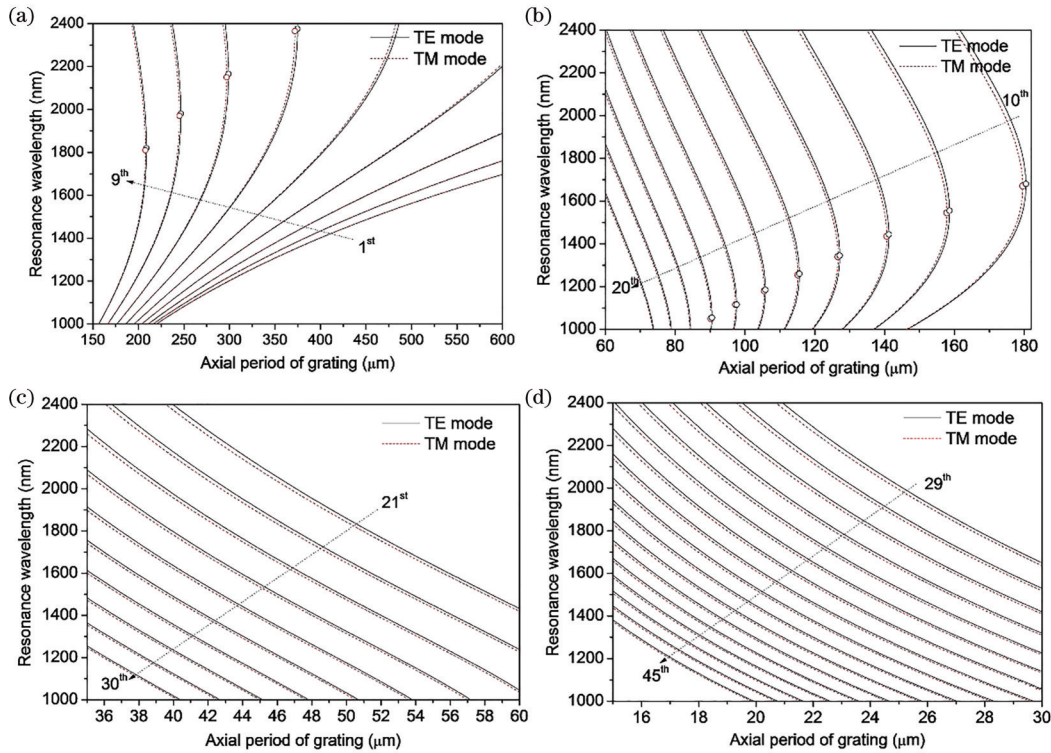


图 4 Ex-TFG 不同包层模阶数下 TE 模 (实线) 和 TM 模 (虚线) 的轴向周期和谐振波长的关系^[23]。(a) m 在 1~9 范围内; (b) m 在 10~20 范围内; (c) m 在 21~30 范围内; (d) m 在 29~45 范围内

Fig. 4 Resonance wavelengths versus axial periods of Ex-TFG with TE (solid line) and TM (dash line) modes for different orders^[23]. (a) m is in the range of 1~9; (b) m is in the range of 10~20; (c) m is in the range of 21~30; (d) m is in the range of 29~45

2.3 倾斜光纤光栅环境变化灵敏度分析

在相位匹配条件中, Ex-TFG 的谐振波长由光栅周期、倾角、纤芯模的有效折射率及包层模的有效折

射率决定。当光栅受到外界环境扰动时, 如折射率、温度、应变等, 光栅的谐振波长也会随外界环境的变化发生相应的改变, 其环境扰动后的谐振波长^[24]为

$$\lambda' = \left[n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda') - n_{\text{eff}}^{\text{cl-}m}(\lambda') \right] \frac{\Lambda_G}{\cos \theta} + \left(\delta_{n_{\text{eff}}^{\text{co}}} - \delta_{n_{\text{eff}}^{\text{cl-}m}} \right) \frac{\Lambda_G}{\cos \theta} + \frac{n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda') - n_{\text{eff}}^{\text{cl-}m}(\lambda')}{\cos \theta} \delta_{\Lambda_G}, \quad (5)$$

式中: λ' 是受环境扰动后的谐振波长; $n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda')$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl-}m}(\lambda')$ 分别是该谐振波长下的纤芯模有效折射率

和包层模有效折射率; $\delta_{n_{\text{eff}}^{\text{co}}}$ 、 $\delta_{n_{\text{eff}}^{\text{cl-}m}}$ 、 δ_{Λ_G} 是环境扰动后各参量的变化值。

通常光栅的谐振波长漂移量可表征其对应的环境参量的响应灵敏度。对(5)式中的 λ' 进行泰勒展开并保留前两项,可得

$$\lambda' = \left[n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}(\lambda) + \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{d\lambda}(\lambda' - \lambda) - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}}{d\lambda}(\lambda' - \lambda) \right] \frac{\Lambda_G}{\cos \theta} + (\delta_{n_{\text{eff}}^{\text{co}}} - \delta_{n_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}}) \frac{\Lambda_G}{\cos \theta} + \frac{n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}(\lambda) + \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{d\lambda}(\lambda' - \lambda) - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}}{d\lambda}(\lambda' - \lambda)}{\cos \theta} \delta_{\Lambda_G}, \quad (6)$$

因此,Ex-TFG的环境参量的灵敏度为

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{1}{1 - \left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{d\lambda} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}}{d\lambda} \right) \frac{\Lambda_G}{\cos \theta}} \left(\frac{\delta_{n_{\text{eff}}^{\text{co}}} - \delta_{n_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}(\lambda)} + \frac{\delta_{\Lambda_G}}{\Lambda_G} \right) \lambda, \quad (7)$$

简化可得

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \gamma(\Gamma + \alpha)\lambda, \quad (8)$$

式中： $\gamma = 1 / \left[1 - \left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{d\lambda} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}}{d\lambda} \right) \left(\frac{\Lambda_G}{\cos \theta} \right) \right]$

为波导色散因子； $\Gamma = \left(\delta_{n_{\text{eff}}^{\text{co}}} - \delta_{n_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}} \right) \times \left[n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}(\lambda) \right]^{-1}$ 为环境参量依赖系数； $\alpha = \delta_{\Lambda_G} / \Lambda_G$ 为材料的热膨胀系数。

由(8)式可知,光栅对外界环境的传感响应主要与波导色散因子 γ 、环境参量依赖系数 Γ 以及光纤材料的热膨胀系数 α 有关。其中,环境参量依赖系数 Γ 和光纤材料的热膨胀系数 α 与环境参量相关。

图5展示了光栅的 γ 与不同包层模阶数和不同包层直径的关系^[22]。对于同一包层模直径的Ex-TFG,在低阶包层模(约10阶左右)中存在一个色散转折点,该转折点对应于相位匹配图中曲线斜率无穷大时的模式。 γ 由色散转折点前的正值变为负值,其在拐点处绝对值达到最大,光栅对外界的传感响应灵敏度也达到最灵敏状态。一般Ex-TFG的包层模传输模式在30阶左右,远离色散转折点,且随着包层模阶数的增大而缓慢变化,因此 γ 对光栅的传感响应影响很小。对于不同包层直径的光栅,其色散转折点对应的包层模阶数随着包层模直径的减小向低阶方向移动。当光栅包层模式阶数大于30时,其不同包层直径的 γ 差别很小,因此光栅包层半径对 γ 的影响较低。

2.4 超角度倾斜光纤光栅制备及光谱特征

Ex-TFG具有较大的倾斜角度,因此一般的光栅刻写方法(逐点扫描法和相位掩模板法)并不适用。实验中采用幅度掩模板法刻写光栅,一般将幅度掩模板倾斜一定的角度放置在光纤的正前方,紫外(UV)光束经过掩模板后,0阶衍射光束照射光

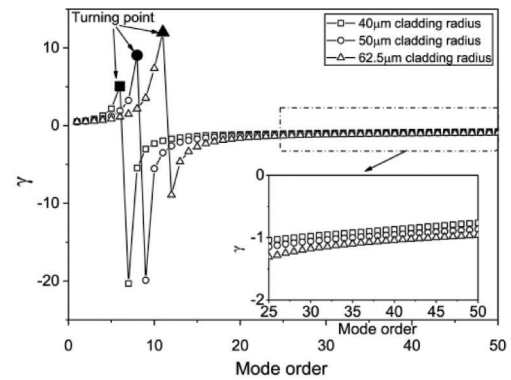


图5 1550 nm处Ex-TFG不同包层模阶数及不同包层半径下的波导色散因子 γ ^[22]

Fig. 5 Waveguide dispersion factors γ under different cladding mode orders and different cladding radius of Ex-TFG at 1550 nm^[22]

纤,在纤芯中引入周期性折射率调制,如图6所示^[23]。光纤纤芯内部光栅倾角与掩模板倾角的关系满足

$$\theta_{\text{int}} = \frac{\pi}{2} - \arctan \left[\frac{1}{n_{\text{UV}} \tan(\theta_{\text{ext}})} \right], \quad (9)$$

式中： n_{UV} 为UV激光下的光纤折射率； θ_{ext} 为掩模板倾角； θ_{int} 为光栅倾角。

通常采用幅度掩模板法倾斜刻写Ex-TFG。图7所示为光栅倾斜角度为 81° 、轴向周期为 $28 \mu\text{m}$ 的Ex-TFG光谱图。在 $1300 \sim 1700 \text{ nm}$ 波长范围内,Ex-TFG存在一系列的双峰。通过旋转光栅改变入射光的偏振态,可发现其中一个谐振峰强度逐渐减小,另一谐振峰强度逐渐增大,如图7(b)所示。

为了验证Ex-TFG谐振峰为正交线偏振峰,实验中利用空间耦合的方式,如图8(a)所示,将线偏振光耦合进Ex-TFG中,并旋转 360° ,实验结果显示,当不同偏振角线偏振光进入光栅时,光栅透射

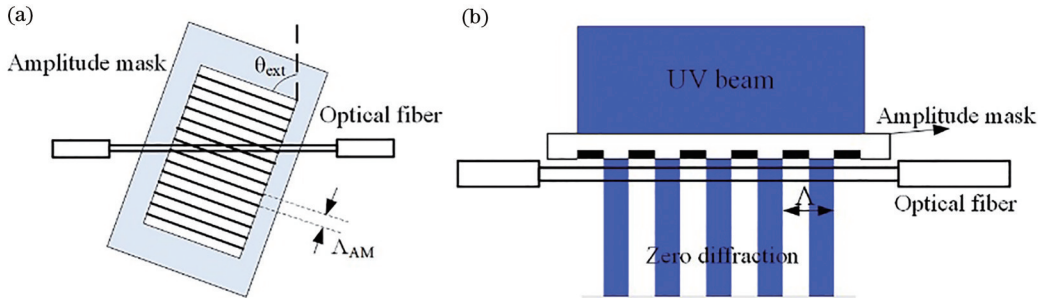


图 6 Ex-TFG 刻写示意图^[23]。(a) 正视图; (b) 纤芯内有 0 阶衍射的幅度掩模和光纤的俯视图

Fig. 6 Schematic diagrams of Ex-TFG inscription^[23]. (a) Front view; (b) top view of amplitude mask and fiber with 0 order diffraction inside fiber core

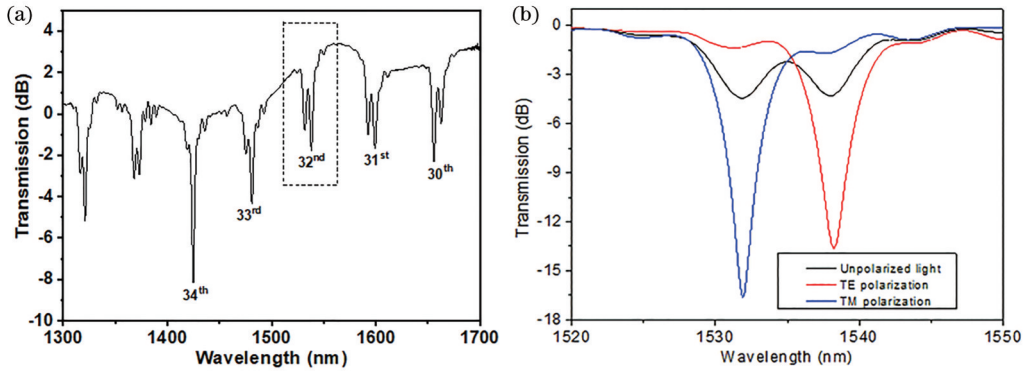


图 7 81°倾斜角 Ex-TFG 的透射光谱^[23]。(a) 1300~1700 nm 范围内存在一系列双峰共振; (b) 不同方位角线偏振光测量的一对双峰

Fig. 7 Transmission spectra of Ex-TFG with 81° tilt angle^[23]. (a) A series of dual-peak resonances in 1300–1700 nm; (b) one pair of dual-peaks measured by linear polarization light with different azimuth angles

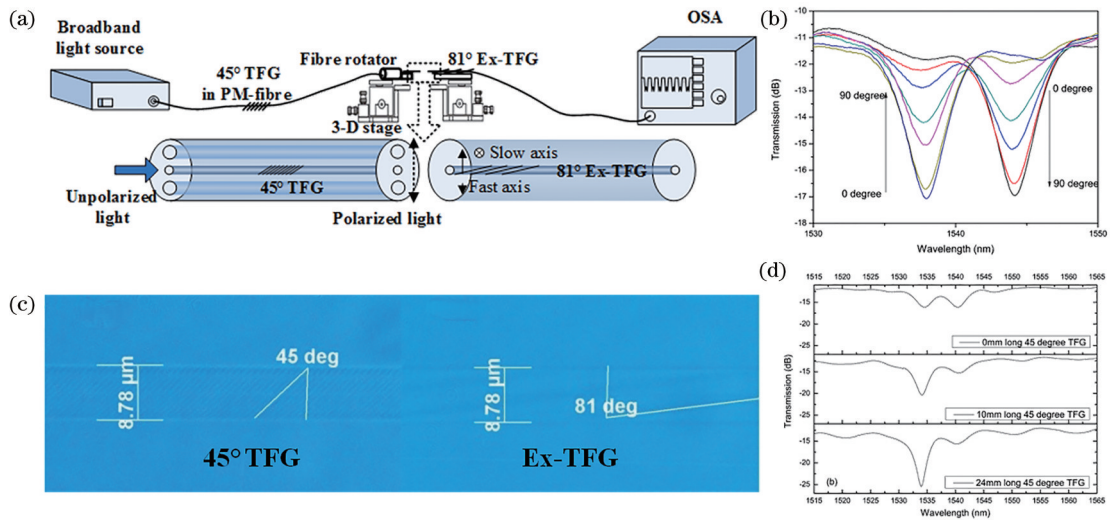


图 8 集成 TFG 光谱测量。(a) Ex-TFG 不同线偏振透射谱测量装置^[23]; (b) 相对于光栅快轴耦合具有不同方位角的线性偏振光时测得的 81°-TFG 的透射光谱^[23]; (c) 混合 45° TFG 和 81° TFG 的显微图^[35]; (d) 混合 45° TFG 和 81° TFG 的透射光谱^[35]

Fig. 8 Spectra measurement of integrated TFG. (a) Experimental setup for Ex-TFG transmission spectra measurement with different linear polarizations^[23]; (b) transmission spectra of 81°-TFG measured by coupling a linear polarization light with different azimuth angles with respect to fast axis of grating^[23]; (c) microscopy images of hybrid 45°-TFG and 81°-TFG^[35]; (d) transmission spectra of hybrid 45°-TFG and 81°-TFG^[35]

光谱中交替出现双峰。定义透射双峰中短波长最大时对应 0° 偏振角, 当偏振角以 15° 为间隔从 0° 变化到 90° 时, 透射双峰长波长峰的强度变为最大, 而短波长峰消失, 如图 8(b) 所示, 实验结果验证了 Ex-TFG 的透射双峰为正交线偏振峰^[19]。进一步, 利用 45° 倾斜角 TFG 的 TM 偏振起偏功能, 通过 UV 刻写技术将 45° TFG 和 Ex-TFG 沿快轴集成, 如图 8(c) 所示^[35], 实现了集成 TFG。其透射光谱显示, 在 Ex-TFG 透射双峰中, 长波长的透射峰消失, 短波长透射峰最强, 如图 8(d) 所示。结果表明, Ex-TFG 透射双峰中的短波长峰为 TM 偏振, 长波长峰为 TE 偏振, 该实验结果与前期理论分析吻合较好。

3 超角度倾斜光纤光栅传感特性研究

Ex-TFG 的传感特性主要与波导色散因子 γ 、环境参量依赖系数 Γ 以及光纤材料的热膨胀系数 α 有关。2.3 节中已经分析了光栅的波导色散因子 γ 对光栅传感响应的影响, 即在低阶包层模处存在转折点, 光栅在此处的传感响应最灵敏, 而通常实验所用的 Ex-TFG 在 1550 nm 波长附近为 30 阶左右的高阶包层模, 远离色散转折点, 因此模式变化及包层半径对光栅的传感响应影响极小。本节中将对 Ex-TFG 的折射率传感特性、矢量传感特性以及温度传感特性进行详细的研究。

3.1 超角度倾斜光纤光栅的折射率传感特性

Ex-TFG 中高阶包层模的传输使得光栅对外界折射率的变化十分敏感。当外界折射率变化时, 光纤的纤芯和材料并未受到影响, 仅包层模的有效折射率会发生改变, 因此其折射率依赖系数 Γ_{SRI} 表达

式^[24]可表示为

$$\Gamma_{SRI} = - \frac{u_m^2 \lambda^2 \Delta_G n_{sur}}{8\pi^3 r_{cl}^3 n_{eff}^{cl-m} (n_{cl}^2 - n_{sur}^2)^{3/2} \cos \theta}, \quad (10)$$

式中: n_{sur} 为环境折射率; u_m 为 0 阶贝塞尔方程的第 m 个根。Ex-TFG 的折射率灵敏度与波导色散因子、环境折射率依赖系数以及谐振波长有关, 这种相关性的本质是外界折射率的变化诱导包层模式的有效折射率发生变化, 进而引起谐振波长漂移; 另一方面, 由 (10) 式可知, 光纤包层尺寸越小, 环境折射率依赖系数越大, 其本质为包层尺寸越小其包层模有效折射率随外界环境折射率变化的收敛速度越快, 因此选择小包层直径光纤, 有助于实现高折射率灵敏度。

图 9 显示了不同包层半径及不同模式阶数下的折射率响应。TM 模和 TE 模为一对简并模式, 其对外界折射率的响应趋势一致, 呈非线性趋势, 但是 TM 模的折射率灵敏度略大于 TE 模。由 (10) 式可知, Ex-TFG 环境折射率依赖系数与光纤包层尺寸和包层模有效折射率成反比。实验中对比了包层模直径分别为 80 μm 和 125 μm 的 Ex-TFG 的折射率灵敏度, 结果显示, 前者的折射率灵敏度明显高于后者, 如图 9(a) 所示, 在折射率为 1.345 处其 TM 模的灵敏度分别为 1180 nm/RIU 和 200 nm/RIU^[22]。同时, 通过调整幅度掩模板倾角, 利用同一周期 (6.6 μm) 的掩模板分别制备 72°、75°、79° 和 83° 的 Ex-TFG, 其在 1550 nm 波长附近处拥有不同阶数的包层模, 分别为 43 阶、40 阶、35 阶、28 阶, 如表 1 所示。折射率传感实验显示, 折射率灵敏度随着包层模阶数的增加而增加, 如图 9(b) 所示, 其主要原因是光栅的包层模阶数越高, 光栅的有效折射率越低。由图 9(b) 可

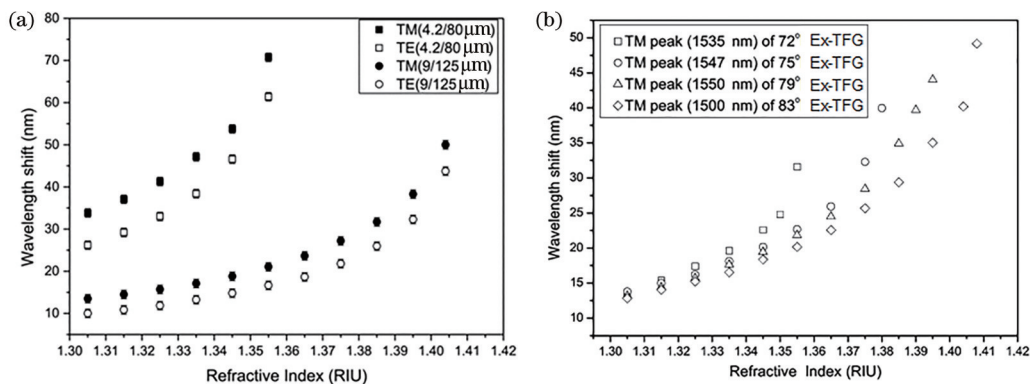


图 9 Ex-TFG 折射率传感实验。(a) 不同包层半径的 TE 模和 TM 模的折射率灵敏度^[22]; (b) 不同包层模阶数的 TM 模的折射率灵敏度^[24]

Fig. 9 Refractive index sensing experiment of Ex-TFG. (a) Refractive index sensitivities for TE and TM modes with different cladding radii^[22]; (b) refractive index sensitivities for TM modes with different cladding mode orders^[24]

表1 不同倾斜角度 Ex-TFG 的 TM 模的有效折射率和折射率灵敏度

Table 1 Effective refractive indexes and refractive index sensitivities for TM modes of Ex-TFG with different tilt angles

Tilt angle of Ex-TFG	Mode order	Effective refractive index	Refractive index sensitivity at ~1550 nm
83°	28th	1.40716	2250 nm/RIU at 1.408
79°	35th	1.37635	864 nm/RIU at 1.395
75°	40th	1.35962	1536 nm/RIU at 1.380
72°	43rd	1.34311	1360 nm/RIU at 1.355

看出,43阶 Ex-TFG 的灵敏度在折射率为 1.355 时约为 1360 nm/RIU。2015 年, Luo 等^[36]基于包层模直径为 80 μm 的细芯 Ex-TFG 实现了高灵敏度葡萄

糖浓度测量,相比于 125 μm 包层直径的 Ex-TFG,其灵敏度提高约 5 倍,达到 1.514 nm/(mg·mL⁻¹)。

3.2 超角度倾斜光纤光栅的矢量传感特性

光纤折射率传感的本质是光栅包层模的倏逝场与周围介质的相互作用,因此光纤光栅包层模周围倏逝场分布的特点决定了光栅的折射率灵敏度。根据 Ex-TFG 的耦合理论,光栅中主要传输的包层模是 TE/TM 模,弱波导近似下其为 LP_{1m} 模。LP_{1m} 模的光场分布为非圆对称分布,其在角向 π/2 和 3π/2 处拥有两个零强度位置,为镜面对称分布。观察 Ex-TFG 的近场光场分布,结果如图 10(a) 所示,近场光场分布在光栅的快轴两侧,沿慢轴分布的是光场暗斑^[26]。

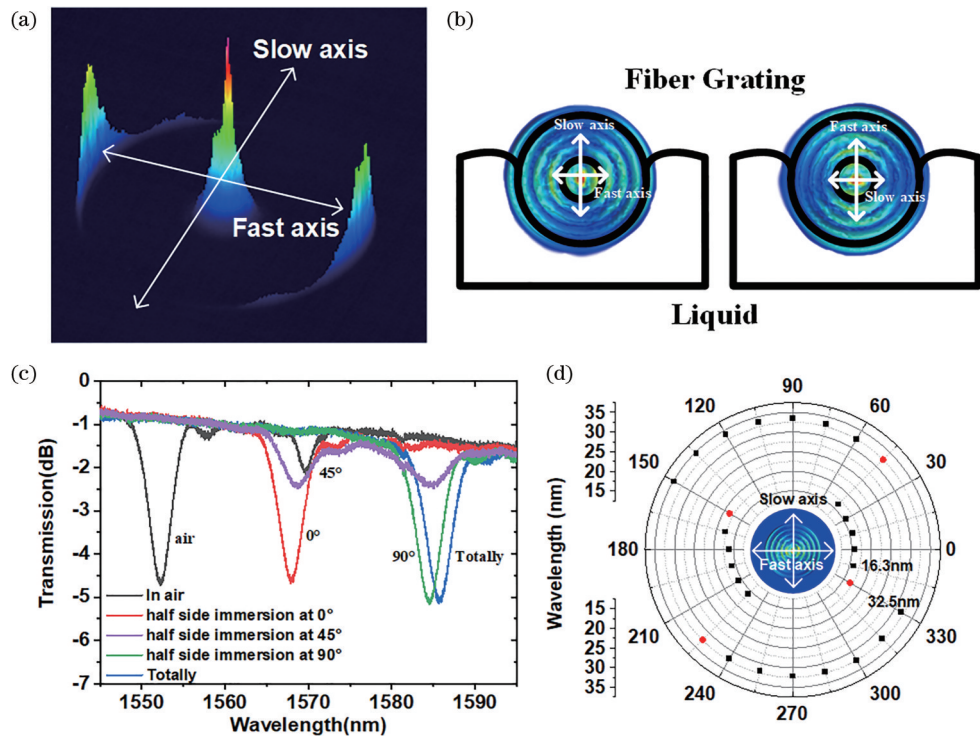


图 10 Ex-TFG 矢量传感实验^[26]。(a) Ex-TFG 的近场光场分布图; (b) Ex-TFG 单侧浸没示意图; (c) Ex-TFG 单侧浸没和完全浸没时 TM 模的透射光谱响应; (d) TM 包层模沿不同浸没角的波长漂移

Fig. 10 Vector sensing experiment of Ex-TFG^[26]. (a) Near field light field distribution of Ex-TFG; (b) schematic diagram of Ex-TFG by sidely immersing; (c) transmission spectral responses for TM mode of Ex-TFG by sidely immersing and totally immersing; (d) wavelength shifts for TM cladding mode along different immersion angles

由光栅折射率传感的本质可知,只有当光场倏逝场与周围介质发生交叠时,光栅才能实现折射率感知。Ex-TFG 具有非对称的倏逝场分布,因此可以预测其具有方向性的折射率传感特点。2021 年, Sun 等^[26]利用单侧浸没法验证了 Ex-TFG 的折射率矢量传感特性。图 10(b) 显示,当光栅沿慢轴单侧浸没时,折射率溶液与光栅倏逝场发生完全作用;

当光栅沿快轴浸没时,仅半边倏逝场与折射率溶液发生相互作用。由 3.1 节可知, Ex-TFG 的折射率灵敏度随着外界环境折射率的增大而增大,因此,在实验测量中使用折射率为 1.39 的折射率匹配液。单侧浸没实验显示,当光栅沿慢轴浸没时,其谐振波长的变化与光栅完全浸没时完全相同。而当光栅沿快轴单侧浸没时,由于折射率溶液只可与其中

一侧光场发生相互作用,其谐振波长的变化仅为完全浸没时的一半,如图 10(c)所示。图 10(d)展示了光栅旋转一周的波长变化,验证了光栅具有正交矢量折射率传感特性^[26]。基于 Ex-TFG 的矢量传感特性,Lu 等^[30]通过测量磁场下磁流体的双折射,实现了磁场矢量测量,其灵敏度为 2.45 nm/mT。

3.3 超角度倾斜光纤光栅的温度传感特性

传感器的温度串扰是表征传感器质量的指标之一。在热光效应的作用下,外界温度的变化一方面影响光栅的有效折射率,另一方面影响光栅材料的热膨胀系数。温度依赖系数 Γ_{Tem} 的表达式^[24]为

$$\Gamma_{\text{Tem}} = \frac{\xi_{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \xi_{\text{cl}} n_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{cl-m}}(\lambda)}, \quad (11)$$

式中: ξ_{co} 和 ξ_{cl} 分别是纤芯和包层材料的热光系数。一般来说,不同材料的热光系数是不同的。普通单模光纤的 ξ_{co} 大约为 $7.07 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, ξ_{cl} 大约为 $7.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

由(11)式可知,Ex-TFG 的温度依赖系数与材料的热膨胀系数以及包层和纤芯模的有效折射率有关,不同阶数包层模具有不同的温度依赖系数,最终将导致温度灵敏度随模式发生变化。实验中利用不同倾斜角度的 Ex-TFG (75° 、 79° 、 81° 和 83°) 在 1550 nm 附近处分别实现不同阶数的包层模,即 40 阶、35 阶、31 阶、28 阶,并分别测量其相应的温度灵敏度,如图 11 所示。表 2 所示为不同倾斜角度 Ex-TFG 的 TM 模的有效折射率和温度灵敏度。由表 2 可知,高阶包层模具有更低的温度灵敏度。其中,光栅 40 阶包层模的温度灵敏度为 $4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 28 阶包层模的温度灵敏度为 $9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ^[24]。Ex-TFG 的温度灵敏度一般比其他光栅更小,因此其更适用于可能受温度串扰影响的生化传感、折射率传感应用。

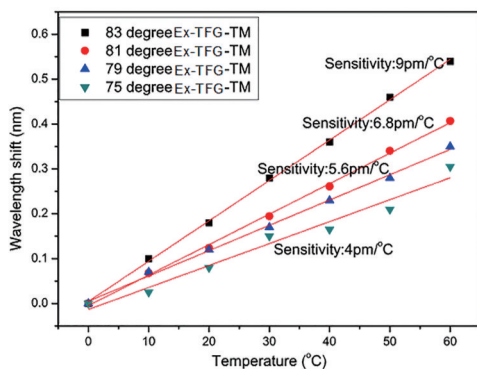


图 11 不同包层模阶数 Ex-TFG 的温度灵敏度^[24]

Fig. 11 Temperature sensitivities of Ex-TFG with different cladding mode orders^[24]

表 2 不同倾斜角度 Ex-TFG 的 TM 模的有效折射率和温度灵敏度

Table 2 Effective refractive indexes and temperature sensitivities for TM modes of Ex-TFG with different tilt angles

Tilt angle of Ex-TFG	Mode order	Effective refractive index	Temperature sensitivity at $\sim 1550 \text{ nm}$
83°	28th	1.40716	$9 \text{ pm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$
81°	32nd	1.39029	$6.8 \text{ pm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$
79°	35th	1.37635	$5.6 \text{ pm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$
75°	40th	1.35962	$4 \text{ pm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$

同时,通过设计光栅结构,调控包层模,可实现温度灵敏度近零的高灵敏度折射率传感器。

4 结 论

Ex-TFG 独特的栅面倾斜结构使得其具有可直接感知外界折射率环境变化以及低温度串扰的特点。由于 Ex-TFG 具有前向包层耦合的传感特点,Ex-TFG 的折射率灵敏度与包层模阶数及包层半径大小相关,包层模阶数越高、光栅包层半径越小,其折射率灵敏度越大。与折射率灵敏度类似,Ex-TFG 的温度灵敏度随着包层模阶数的增大而减小。通过设计光栅的结构及调控光栅中模式的传输,可在保证传感器的高折射率灵敏度的同时,降低温度灵敏度,甚至实现近零的温度灵敏度。Ex-TFG 低温度交叉灵敏度和高折射率灵敏度的特点使得其为生化传感领域提供了更优的选择。同时,Ex-TFG 倾斜结构的特点使其具有优异的矢量传感特性,其在矢量物理场领域中具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Giallorenzi T G, Bucaro J A, Dandridge A, et al. Optical fiber sensor technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982, 30(4): 472-511.
- [2] Bergh R A, Culshaw B, Cutler C C, et al. Source statistics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscopes [J]. Optics Letters, 1982, 7(11): 563-565.
- [3] Bucaro J A, Dardy H D, Carome E F. Fiber-optic hydrophone[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1977, 62(5): 1302-1304.
- [4] Koo K P, Sigel G H, Jr. An electric field sensor utilizing a piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVF₂) film in a single-mode fiber interferometer[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(4): 670-675.
- [5] Deeter M N. Fiber-optic Faraday-effect magnetic-

- field sensor based on flux concentrators[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(1): 154-157.
- [6] Ohno H, Naruse H, Kihara M, et al. Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor [J]. *Optical Fiber Technology*, 2001, 7(1): 45-64.
- [7] Littler I C M, Rochette M, Eggleton B J. Adjustable bandwidth dispersionless bandpass FBG optical filter [J]. *Optics Express*, 2005, 13(9): 3397-3407.
- [8] James S W, Tatam R P. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application[J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(5): R49-R61.
- [9] Erdogan T, Sipe J E. Tilted fiber phase gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(2): 296-313.
- [10] Cai S S, Liu F, Wang R L, et al. Narrow bandwidth fiber-optic spectral combs for renewable hydrogen detection[J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 63(12): 1-9.
- [11] Guo T. Review on plasmonic optical fiber grating biosensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328006. 郭团. 等离子体共振光纤光栅生物传感器综述[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328006.
- [12] Zhong J H, Feng Y, Zhang H, et al. Influence of refractive index on spectral characteristics of tilted fiber gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1105003. 钟建辉, 冯艳, 张华, 等. 折射率对倾斜光纤光栅光谱特性的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(11): 1105003.
- [13] Song Q G, Huang C J, Yan Z J, et al. All-fiber polarization-dependent device based on 45° radiated tilted fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2306003. 宋青果, 黄成俊, 闫志君, 等. 基于 45° 辐射倾斜光纤光栅的全光纤偏振相关器件[J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2306003.
- [14] Yang J M, Lin Y L, Huang Q Q, et al. Wavelength-tunable linearly polarized Yb-doped fiber laser based on tilted fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0314003. 杨锦民, 林彦吕, 黄千千, 等. 基于倾斜光栅的可调谐线偏振掺镱光纤激光器[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0314003.
- [15] Xing Z K, Song Q G, Mou C B, et al. Linear polarized tunable fiber laser based on radiation mode of 45°-tilted fiber grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1201007. 邢志坤, 宋青果, 牟成博, 等. 基于 45° 倾斜光纤光栅辐射模的线偏振调谐光纤激光器[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1201007.
- [16] Tian X, Wang M, Wang Z F. Stimulated Brillouin scattering filters based on tilted fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1006002. 田鑫, 王蒙, 王泽锋. 基于倾斜光纤 Bragg 光栅的受激布里渊散射滤波器[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1006002.
- [17] Mou C B, Yan Z J, Zhou K M, et al. Optical fibre sensors based on UV inscribed excessively tilted fibre grating[M]//Yasin M, Harun S W, Arof H. *New developments and practical applications*. London: IntechOpen, 2014: 23-46.
- [18] Zhou K M, Zhang L, Chen X F, et al. Optic sensors of high refractive-index responsivity and low thermal cross sensitivity that use fiber Bragg gratings of >80° tilted structures[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(9): 1193-1195.
- [19] Chen X, Zhou K, Zhang L, et al. In-fiber twist sensor based on a fiber Bragg grating with 81° tilted structure[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(24): 2596-2598.
- [20] Suo R, Chen X F, Zhou K M, et al. In-fibre directional transverse loading sensor based on excessively tilted fibre Bragg gratings[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(3): 034015.
- [21] Mou C B, Zhou K M, Yan Z J, et al. Liquid level sensor based on an excessively tilted fibre grating[J]. *Optics Communications*, 2013, 305: 271-275.
- [22] 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.
- [23] Yan Z J, Wang H S, Wang C L, et al. Theoretical and experimental analysis of excessively tilted fiber gratings[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12107-12115.
- [24] Yan Z, Sun Q, Wang C, et al. Refractive index and temperature sensitivity characterization of excessively tilted fiber grating[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3336-3346.
- [25] Jiang B Q, Yin G L, Zhou K M, et al. Graphene-induced unique polarization tuning properties of excessively tilted fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(23): 5450-5453.
- [26] Sun Y Z, Lu T A, Moreno Y, et al. Theoretical and experimental analysis of the directional RI sensing property of tilted fiber grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(2): 674-681.

- [27] 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.
- [28] Jiang B Q, Zhou K M, Wang C L, 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.
- [29] Liu C, Sun Z, Zhang L, et al. Black phosphorus integrated tilted fiber grating for ultrasensitive heavy metal sensing[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 257: 1093-1098.
- [30] Lu T A, Sun Y Z, Moreno Y, et al. Excessively tilted fiber grating-based vector magnetometer[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2494-2497.
- [31] Xie L, Luo B B, Zhao M F, et al. Orientation-dependent optic-fiber accelerometer based on excessively tilted fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2019, 45(1): 125-128.
- [32] Zhou K M, Zhang L, Chen X F, et al. Low thermal sensitivity grating devices based on Ex- 45° tilting structure capable of forward-propagating cladding modes coupling[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 5087-5094.
- [33] Erdogan T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, 14(8): 1760-1773.
- [34] Lee K S, Erdogan T. Fiber mode coupling in transmissive and reflective tilted fiber gratings[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(9): 1394-1404.
- [35] Yan Z J, Mou C B, Sun Z Y, et al. Hybrid tilted fiber grating based refractive index and liquid level sensing system[J]. *Optics Communications*, 2015, 351: 144-148.
- [36] Luo B B, Yan Z J, Sun Z Y, et al. Biosensor based on excessively tilted fiber grating in thin-cladding optical fiber for sensitive and selective detection of low glucose concentration[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32429-32440.