

高频 CO₂ 激光脉冲写制的倾斜长周期光纤光栅 光谱特性研究

魏石磊 张伟刚 范弘建 耿鹏程 尚佳彬 殷丽梅 薛晓琳

(南开大学现代光学所光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 利用高频 CO₂ 激光脉冲写制了倾斜长周期光纤光栅 (TLPPFG), 运用改造的耦合模理论对基于高频 CO₂ 激光脉冲写制的 TLPPFG 进行了理论分析, 实验研究了倾斜折射率调制对 TLPPFG 光谱特性的影响, 分析了倾斜角度对 TLPPFG 模式耦合特性的影响。实验结果表明, 利用高频 CO₂ 激光脉冲写制的 TLPPFG 具有新颖的耦合特性, 低阶次包层模的耦合系数大于高阶次包层模, 倾斜折射率调制不仅可以提高纤芯基模与包层模的耦合系数, 还可以激励纤芯基模向高阶包层模式耦合, 且随着倾斜角的增大可以明显提高光栅的写制效率。

关键词 光纤光学; 长周期光纤光栅; 倾斜光纤光栅; 高频二氧化碳激光; 耦合模理论

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0806006

Study on Spectral Properties of Tilted Long-Period Fiber Grating Written by High-Frequency CO₂ Laser Pulses

Wei Shilei Zhang Weigang Fan Hongjian Geng Pengcheng Shang Jiabin
Yin Limei Xue Xiaolin

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education,
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract A novel tilted long-period fiber grating (TLPPFG) written by high-frequency CO₂ laser pulses was experimentally demonstrated. The coupled-mode theory was modified in order to theoretically analyze the TLPPFG. The effects of tilted refractive index modulation on the spectral properties of the TLPPFG were studied. The influence of tilted angle on the modes coupling of TLPPFG was analyzed. Theoretical analysis is in accord with experimental results. The experimental results show that the TLPPFG written by high-frequency CO₂ laser pulses has many novel properties. The coupling coefficient of low-order cladding modes is higher than that of high-order ones, and tilted refractive index modulation not only can enhance the coupling coefficient between the core fundamental mode and cladding modes, but also can stimulate the coupling between core fundamental and high-order cladding modes. The written efficiency can be dramatically improved by increasing the tilt angle.

Key words fiber optics; long-period fiber grating; tilted fiber grating; high-frequency CO₂ laser; coupled-mode theory

OCIS codes 060.2280; 060.4005; 260.1440

1 引 言

倾斜光纤光栅 (TFG) 是一种特殊的光纤光栅, 它与传统光纤光栅的不同之处在于光栅成栅平面的

波矢方向与光纤轴线方向有一定的夹角。通过改变夹角, 即倾斜角, 可以控制光纤内部传播的不同波长的光波以不同的角度耦合到光纤包层。所以与传统

收稿日期: 2011-03-14; 收到修改稿日期: 2011-04-21

基金项目: 国家自然科学基金 (10974100, 10674075, 60577018) 和天津市应用基础与前沿技术研究计划 (10JCZDJC24300) 资助课题。

作者简介: 魏石磊 (1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤光栅方面的研究。E-mail: weishilei906@163.com

导师简介: 张伟刚 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光子技术与现代光传感和新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

光纤光栅相比,TFG 具有很多独特的特性,因而成为近年来的研究热点。与普通光纤光栅相比,TFG 具有很多独特的优点,如能够激励纤芯基模向一系列同向或反向传输的高阶包层模或辐射模耦合,具有新颖的偏振相关特性,能够提高对外界响应的灵敏度等^[1,2]。传统意义上的光纤光栅因其光栅平面波矢方向与光纤轴向一致使其结构和功能受到很大限制;而 TFG 由于倾斜角可根据需要进行设计,使其折射率调制的空间分布灵活多变,丰富了光栅结构设计,可实现优异光学特性,为新型光纤光栅功能器件研制拓展了更宽的研究领域^[3~8]。

光纤光栅的发展是与其写制方法和技术密切相关的,自 Davis 等^[9]提出利用 CO₂ 激光脉冲轴向写制长周期光纤光栅(LPFG)以来,由于其写制方法的灵活方便以及其写制机理的新颖性,使得 CO₂ 激光写制法成为一种备受关注的 LPFG 写制方法。Rao 等^[10]将 CO₂ 激光的调制频率改为几千赫兹,利用高频脉冲能量集中、加热时间短的特性,提高了加热的效率,因此提高了光栅的写制效率。Wiggeren 等^[11]计算了单侧 CO₂ 激光曝光的光纤横截面能量分布。曝光侧能量较大,背光侧激光能量极小。为此,Rao 等^[10]进行双侧曝光,当 LPFG 损耗峰达到一定深度后,把光纤绕轴线旋转 180°,对另一侧曝光,直到达到需要的损耗峰深度。于清旭等^[12]提出一种由柱面镜、两个平面镜构成的互成 120°的光学聚焦系统,用 CO₂ 激光对光纤进行圆周均匀曝光,写制了均匀折射率调制 LPFG。

高频 CO₂ 激光脉冲写制法以其写制机理的独特性和写制技术的灵活性,成为新一代长周期和超长周期光纤光栅写制的首选,并且极大地促进了光纤光栅的发展,为新一代光纤光栅器件的研制开辟了更为广阔的空间^[13~15],这就决定了利用高频 CO₂ 激光脉冲写制的倾斜长周期光纤光栅(TLPG)具有许多独特的潜力,因此对基于高频 CO₂ 激光脉冲写制的 TLPG 进行光谱特性研究具有十分重要的意义。本文利用高频 CO₂ 激光脉冲写制了 TLPG,运用改造的耦合模理论对基于高频 CO₂ 激光脉冲写制的 TLPG 进行了理论分析,实验研究了倾斜折射率调制对 LPFG 光谱特性的影响,分析了倾斜角度对 TLPG 模式耦合特性的影响,并将 TLPG 与普通 LPFG 进行了比较。

2 理论分析

光纤光栅作为一种重要的光学无源器件,已广

泛应用于光通信和传感领域。用于分析光纤光栅光谱特性的理论主要有耦合模理论、傅里叶变换理论和传输矩阵法等。其中耦合模理论可以精确地分析光纤光栅中各种模式间的耦合特性,是分析光纤光栅模式耦合特性的有力工具,Erdogan^[16]成功地将耦合模理论用于紫外曝光法写制的光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅的研究;通过对耦合模理论的改造,进而又对紫外曝光法写制的倾斜长周期光纤光栅进行了研究。但对于不同类型的光纤光栅及不同写制方法写制的光纤光栅,须对耦合模理论进行改造才能将其应用于具体的光栅分析。本文借鉴了其中的一些思路和方法,对耦合模理论进行了改造,对高频 CO₂ 激光脉冲写制的 TLPG 进行了初步的理论研究,分析了倾斜折射率调制对 TLPG 耦合特性的影响。

2.1 TLPG 模式耦合

对于紫外曝光写制的光纤光栅,主要利用光纤的光敏效应。光敏光纤的光敏性与锗硅玻璃中的缺陷中心有关,这些缺陷中心使得光敏光纤对 240~250 nm 波段的紫外光有强烈的吸收,人们认为锗氧空位缺陷是引起光致折变的主要原因。在写制机理方面,紫外曝光法的特点是仅对纤芯折射率进行调制且调制分布均匀,对包层折射率则没有影响,其折射率调制如图 1 所示。在写制技术方面,该方法有以下不足而应用受限:1) 光栅只能在光敏光纤上写制,而且需要相位模板或振幅模板,写制系统较为复杂;2) 制备的光纤光栅热稳定性差、成本高、效率低;3) 写制的光栅局限于纤芯,在非光敏的包层不能写制光栅。与紫外曝光写制方法相比,高频 CO₂ 激光脉冲写制法具有很多特点和优势^[17]:在写制机理方面,CO₂ 脉冲激光器主要利用热冲击效应实现对光纤的折射率调制,其写制机理包括残余应力应变释放、非弹性应变冻结、粘弹性冻结、光纤表面刻蚀等,CO₂ 激光脉冲写制法的特点是写制过程为单侧曝光,折射率调制区域主要位于光纤包层曝光一

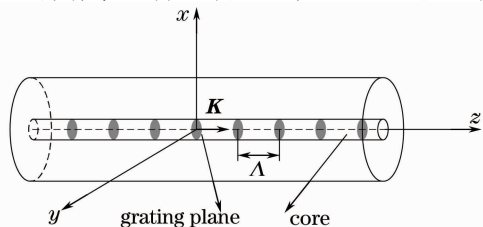


图 1 紫外曝光法写制的光纤光栅折射率调制示意图

Fig. 1 Refractive index modulation of fiber grating written by ultraviolet exposure

侧,对纤芯的折射率扰动较小,单侧曝光导致折射率调制具有不对称性,而倾斜不仅加大了折射率调制的不对称性,而且改变了纤芯基模向各阶包层模的耦合强度;在写制技术方面^[18],CO₂ 激光脉冲写制法更加灵活和方便,不需要振幅模板,由计算机控制可以方便地写制各种复杂形状的光纤光栅,对光纤的种类没有要求,可以在任意光纤上写制 LPPFG,写制效率高,所制备光纤光栅具有热稳定性好等优点。因此利用高频 CO₂ 激光脉冲写制 TLPPFG,并对其进行分析。对于高频 CO₂ 激光脉冲写制的 TLPPFG,其折射率调制主要位于包层曝光一侧,且其写制过程为单侧曝光,其折射率调制如图 2 所示,其中 θ 为倾斜角($0^\circ < \theta < 90^\circ$),即波矢 \mathbf{K} 与光纤 z 轴的夹角, Λ 为光栅周期。

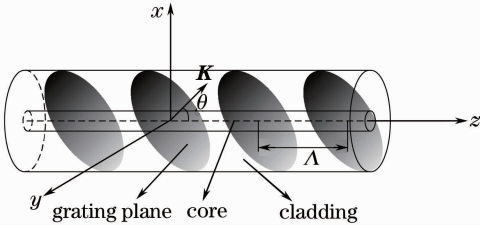


图 2 高频 CO₂ 激光脉冲写制的 TLPPFG 折射率调制示意图
Fig. 2 Refractive index modulation of TLPPFG written by high-frequency CO₂ laser pulses

建立 TLPPFG 理论分析的方法和步骤如下。首先,将折射率调制加在光纤的包层上,并假设对纤芯折射率扰动很小,可忽略不计;其次,考虑高频 CO₂ 激光脉冲的写制特点,探索并建立倾斜角与包层模耦合系数的关系式;进而,从光纤包层单侧曝光入手,分析仅由倾斜角引起的包层折射率倾斜调制分布对包层模耦合系数的影响。

借鉴耦合模理论,可将周期性折射率改变视为一种微扰。于是,对 CO₂ 激光脉冲曝光一侧的光纤包层折射率扰动表示为

$$\Delta n_{cl} = n_{cl} \frac{\sigma(z')}{\cos \theta} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\Lambda_T} z' \right) \right], \quad (1)$$

式中 $\Lambda_T = \Lambda \cos \theta$, 坐标变换为 $z' = z \cos \theta - x \sin \theta$; $\sigma(z')$ 为折射率调制的慢变包络。而对于未曝光的光纤一侧,假设其包层折射率未受到调制,根据光纤三层介质模型,可得到光纤折射率的分布形式为

$$n(z) = \begin{cases} n_0, & r \leq a_1 \\ n_{cl} + \Delta n_{cl}, & a_1 < r \leq a_2 \\ n_3, & r > a_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 n_0 为纤芯折射率, n_{cl} 为包层折射率, n_3 为环境折射率, Δn_{cl} 为包层折射率扰动; a_1 为纤芯半径, a_2

为包层半径。

在包层引入折射率扰动后,光纤中的纤芯模式和包层模式在满足相位匹配条件时会发生耦合。鉴于耦合模理论不能直接用于光纤折射率空间倾斜调制的分析,因此对不同的空间折射率调制分布,须对包括耦合模理论的重叠积分等方面进行改造,以适用于对 TLPPFG 的理论分析。

为简化并不失一般性,首先考虑纤芯基模与同向传输的某一阶包层模的耦合。因轴向耦合系数很小,故可忽略轴向耦合系数对耦合强度的影响。于是,简化后的耦合模方程为

$$\begin{aligned} \frac{dE_{01}}{dz} &= iK_{01-01}^{co-co} A_{01} + iK_{01-lv}^{co-cl} A_{lv} \exp(-2i\delta z), \\ \frac{dE_{lv}}{dz} &= iK_{01-lv}^{co-cl} A_{01} \exp(2i\delta z), \end{aligned} \quad (3)$$

方程中 E_{01} 为纤芯基模(LP₀₁)的电场振幅, E_{lv} 表示 LP_{lv} 包层模的电场振幅, δ 为长周期光纤光栅模式间相位匹配的失谐量,即

$$\delta = (\beta_{01} - \beta_{lv})/2 - (\pi/\Lambda), \quad (4)$$

式中 β_{01} 为纤芯基模(LP₀₁)的传播常数, β_{lv} 为 LP_{lv} 包层模的传播常数, Λ 为光栅周期。 K_{01-01}^{co-co} , K_{01-lv}^{co-cl} 分别表示自耦合系数和交叉耦合系数:

$$K_{01-01}^{co-co} = (\omega \epsilon_0 n \Delta n / 2) \int_0^\pi d\varphi \times \int_{a_1}^{a_2} \mathbf{E}_{01}(r) \cdot \mathbf{E}_{01}^*(r) r dr, \quad (5)$$

$$K_{01-lv}^{co-cl} = (\omega \epsilon_0 n \Delta n / 2) \int_0^\pi d\varphi \times \int_{a_1}^{a_2} \exp\left(i \frac{2\pi}{\Lambda} r \cos \varphi \tan \theta\right) \mathbf{E}_{lv}(r, \varphi) \cdot \mathbf{E}_{01}^*(r) r dr, \quad (6)$$

式中 ω 为圆频率, ϵ_0 为真空介电常数, n 为纤芯折射率, Δn 为周期性的折射率扰动。在计算自耦合系数和交叉耦合系数时,将方位角 φ 的积分区间设定为 $0 \sim \pi$,使之更符合单侧曝光的情况;将径向积分区间设定为 $a_1 \sim a_2$,即只有包层受到折射率扰动。经对上述关系式分析可知,耦合强度可用耦合系数表征,通过计算两个模式间的重叠积分与折射率微扰的乘积,即可计算出模式间的耦合系数。

2.2 TLPPFG 耦合系数计算

利用上述改造的耦合模理论,对基于高频 CO₂ 激光脉冲在单模光纤(Corning, SMF-28)上写制的 TLPPFG 的耦合系数进行了数值模拟和理论分析。光纤参数为:纤芯折射率 $n_1 = 1.4505$,纤芯半径 $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$,包层折射率 $n_2 = 1.4453$,包层半径

$a_2 = 62.6 \mu\text{m}$, 环境折射率 $n_3 = 1$, 光栅周期 $\Lambda = 500 \mu\text{m}$, 周期数 $N = 60$ 。

首先, 对紫外曝光在单模光纤上写制的 TLPPFG 的耦合系数进行了模拟, 将方位角积分区间设定为 $0 \sim 2\pi$, 径向积分区间设定为 $0 \sim a_1$, 图 3 为纤芯基模 (LP_{01}) 向一阶奇次包层模 (LP_{0v} , $v = 3, 5, 7, 9, 11$) 的耦合系数, 从图 3 可以看出, 对于紫外曝光法写制的 TLPPFG, 倾斜角 θ 对一阶包层模耦合系数影响不大, 只有当倾斜角接近 90° 时才会产生明显影响, 且高阶次包层模比低阶次包层模的耦合系数大; 当倾斜角 θ 接近 90° 时, 耦合系数急剧下降。对 CO_2 激光脉冲在单模光纤上单侧曝光写制的 TLPPFG 进行了模拟。单侧曝光一侧的包层折射率扰动大, 而纤芯及未曝光一侧包层的折射率扰动很小, 可忽略不计, 因此将方位角积分区间应设定为 $0 \sim \pi$, 径向积分区间应设定为 $a_1 \sim a_2$ 。图 4 为纤芯基模 (LP_{01}) 向一阶的奇次包层模 (LP_{0v} , $v = 3, 5, 7, 9, 11$) 的耦合系数, 从图 4 可以看出, 对于基于高频 CO_2 激光脉冲写制的 TLPPFG, 随着倾斜角 θ 的增加, 可以提高包层模的耦合系数; 且低阶次包层模比高阶次包层模的耦合系数大。由理论分析及数值模

拟可知, 基于高频 CO_2 激光脉冲写制的 TLPPFG, 随着倾斜角的增大可以显著地提高光栅的写制效率。

3 实验结果与分析

在单模光纤上设计并利用高频 CO_2 激光脉冲写制了具有不同倾斜角度的 TLPPFG。图 5 为高频 CO_2 激光脉冲写制 TLPPFG 的实验装置。其中, 激光器为 HAN'S LASER 生产的 CO_2 -H10 型二氧化碳气体激光器, 输出波长为 $10.6 \mu\text{m}$, 最大输出功率为 10 W, 光束经 ZnSe 透镜聚焦后光斑为 $50 \mu\text{m}$, 实验采用二维振镜线性扫描标记法打标。

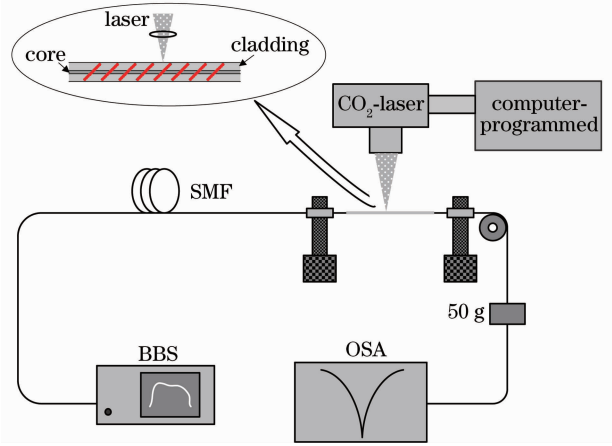


图 5 高频 CO_2 激光脉冲写制 TLPPFG 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup for writing TLPPFG by high-frequency CO_2 laser pulses

TLPPFG 的写制步骤为: 1) 将光纤一端与宽带光源 (BBS) 连接在一起, 另一端通过活动接头与光纤光谱仪 (OSA) 相连。2) 将光纤待曝光区域 (剥掉涂覆层部分) 置于两个光纤支架中间, 光纤的一端固定, 另一端通过滑轮支架加一个重 50 g 的砝码, 使光纤在写制过程中处于平直状态且保持恒定的轴向应力。3) 利用“HAN'S LASER Marking System”打标软件将光栅结构设计成图, 设置 CO_2 激光器打标参数。4) 通过计算机控制激光打标过程, 在线完成 TLPPFG 的写制。利用图 5 所示的实验装置, 对单模光纤进行了 TLPPFG 的写制研究。经过多次探索和反复实验, 成功写制出高质量的 TLPPFG。图 6 为光学显微

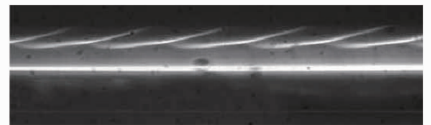


图 6 TLPPFG 的折射率调制实物图

Fig. 6 Refractive index modulation of TLPPFG written by high-frequency CO_2 laser pulses

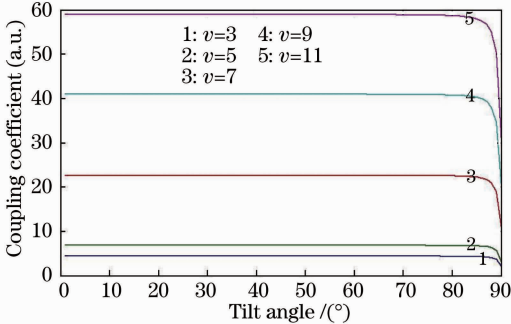


图 3 紫外曝光法写制的 TLPPFG 包层模耦合系数
Fig. 3 Coupling coefficient of the cladding mode of TLPPFG written by ultraviolet exposure

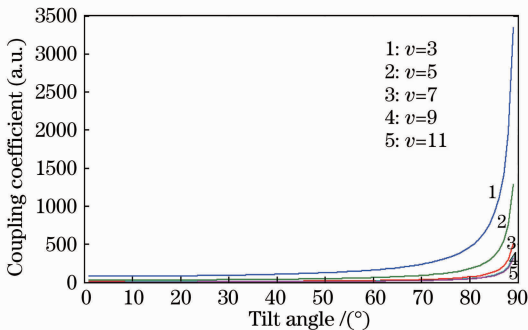


图 4 高频 CO_2 激光脉冲写制的 TLPPFG 包层模耦合系数
Fig. 4 Coupling coefficient of the cladding mode of TLPPFG written by high-frequency CO_2 laser pulses

镜下放大 100 倍的 TLPFG 显微照片,其中的倾斜条纹为光纤包层折射率在 CO₂ 激光脉冲扫描后留下的调制结构。

实验写制的 TLPFG 的光栅周期为 $\Lambda=480\ \mu\text{m}$, 光栅周期数 $N=100$, 即光栅长度为 4.8 cm。图 7 为在相同写制条件下不同倾斜角度的 TLPFG 的透射谱,CO₂ 脉冲激光器的 Q 释放时间为 50 μs , 打标次数为 2, 其中图 7(a)~(e) 中 θ 分别为 0°, 20°, 40°, 60°, 80°。实验发现,在相同的写制条件下,随着倾斜角 θ 的增加,TLPFG 写制效率明显提高;且低阶包层模的耦合强度大于高阶包层模,这与上述高频 CO₂ 激光脉冲写制的 TLPFG 耦合特性理论分析相吻合;且在 1520 和 1590 nm 附近出现了新的谐振峰,根据相位匹配条件,计算了位于 1400 nm 处谐振峰为纤芯基模(LP₀₁)向 LP₀₇ 包层模的耦合,位于 1460 nm 附近谐振峰为纤芯基模(LP₀₁)向 LP₀₉ 包层模的耦合,位于 1520 nm 处的谐振峰为纤芯基模(LP₀₁)向二阶一次 LP₁₁ 包层模的耦合,位于 1590 nm 附近谐振峰为纤芯基模(LP₀₁)向 LP₁₃ 包层模的耦合,如图 7(e) 所示。由此可见,折射率倾斜调制不仅提高了光栅写制效率,而且能够激励高阶非对称包层模的耦合。为了研究倾斜角对光纤光栅写制效

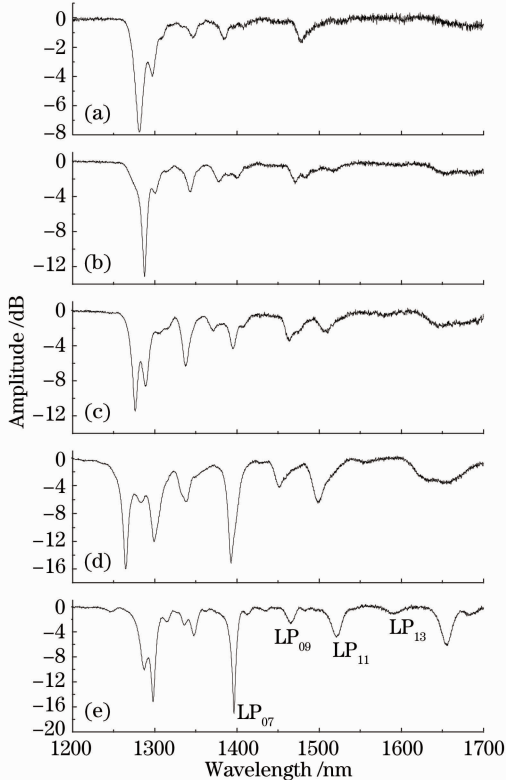


图 7 相同写制条件不同倾斜角度下 TLPFG 的透射谱
Fig. 7 Transmission spectra of TLPFG under the same writing condition at the different tilt angles

率的影响,固定其他因素,写制得到了不同倾斜角度长周期光纤光栅在不同打标次数下的光谱图,图 8 为追踪其中 1460 nm 附近的谐振峰深度随打标次数的变化。由图 8 可见,随着倾斜角 θ 的增大,光栅写制效率明显提高。

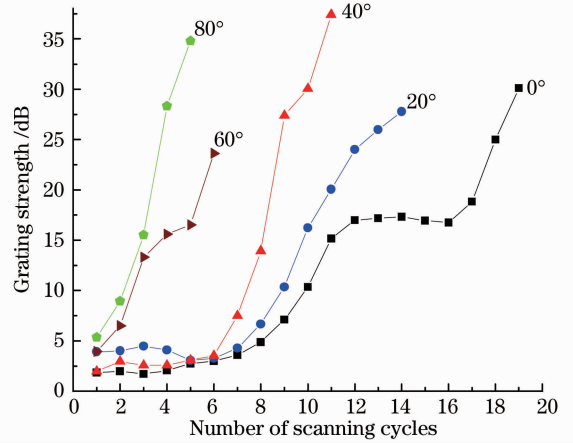


图 8 TLPFG 写制效率随倾斜角度的变化曲线
Fig. 8 Relation between the writing efficiency of TLPFG and the tilt angle

通过对基于高频 CO₂ 激光脉冲写制 TLPFG 的理论分析和实验研究,可以发现高频 CO₂ 激光脉冲写制的 TLPFG 模式耦合特性不同于紫外曝光法:1) 包层倾斜折射率调制可以明显改变纤芯基模与包层模的耦合系数;2) 随着倾斜角的增大,光栅的写制效率明显提高;3) 与紫外曝光相比,高频 CO₂ 激光脉冲写制的 TLPFG,低阶次包层模比高阶次包层模的耦合系数大;4) 对于普通 LPFG,其模式耦合主要是纤芯基模(LP₀₁)和一阶奇次包层模之间的耦合(LP_{0 ν} , $\nu=1, 3, 5, \dots$),而 TLPFG 可以激励纤芯基模向高阶非对称包层模的耦合。

由于包层折射率调制及倾斜折射率调制可以增强光波与外界环境的相互作用,增强其传感的灵敏度,所以预期 TLPFG 在弯曲、折射率、扭转等外界参量传感方面有更高的灵敏度;其新颖的折射率调制分布也使得其具有独特的偏振相关和色散特性。由以上分析可知,基于高频 CO₂ 激光脉冲写制的 TLPFG 具有很多新颖的特性,因此对 TLPFG 的特性分析及应用研究还有广阔的探索空间,对于设计特种光纤光栅、研制新型的光栅器件以及拓宽光纤光栅在光纤通信与传感领域的应用具有重要的意义。

4 结 论

利用高频 CO₂ 激光脉冲写制了 TLPFG;通过

对耦合模理论进行改造,使其适用于分析单侧倾斜包层折射率调制的 TLPG,并将其与普通 LPFG 和紫外曝光法写制的 TLPG 进行了对比分析。通过理论分析和实验研究发现,利用高频 CO₂ 激光脉冲写制的 TLPG 具有很多优异的特性:低阶包层模比高阶包层模的耦合系数大;倾斜折射率调制可以改变包层模的耦合系数,且随着倾斜角的增大可以明显提高光栅的写制效率;倾斜折射率调制可以激励纤芯基模向高阶非对称包层模的耦合等。

单侧包层倾斜折射率调制引起的空间折射率调制分布非对称,突破了以往仅靠倾斜角改变纤芯折射率调制分布的限制,丰富了光栅结构,使得光栅结构设计更具灵活性,其光波控制功能愈加丰富,涉及的 TLPG 偏振相关特性、色散特性、传感与滤波特性以及调控功能等还有待进一步的认识与挖掘。

参 考 文 献

- 1 Yunqi Liu, Qing Liu, Kin Seng Chiang. Optical coupling between a long-period fiber grating and a parallel tilted fiber Bragg grating[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(11): 1726~1728
- 2 T. Guo, H. Y. Tam, P. A. Krug *et al.*. Reflective tilted fiber Bragg grating refractometer based on strong cladding to core recoupling[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5736~5742
- 3 K. Zhou, G. Simpson, Xian-Feng Chen *et al.*. High extinction ratio in-fiber polarizers based on 45° tilted fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1285~1287
- 4 Yin-ping Miao, Bo Liu, Weihua Zhang *et al.*. Dynamic temperature compensating interrogation technique for strain sensors with tilted fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(16): 1393~1395
- 5 Yin-ping Miao, Bo Liu, Hao Zhang *et al.*. Relative humidity sensor based on tilted fiber Bragg grating with polyvinyl alcohol coating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(7): 441~443
- 6 Yu-Feng Li, T. G. Brown. Radiation modes and tilted fiber gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(8): 1544~1555
- 7 K. S. Lee, T. Erdogan. Fiber mode coupling in transmissive and reflective tilted fiber grating [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9): 1394~1404
- 8 K. S. Lee, T. Erdogan. Fiber mode conversion with tilted gratings in an optical fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(5): 1176~1185
- 9 D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis *et al.*. Long-period fiber grating fabrication with focused CO₂ laser pulses [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(3): 302~303
- 10 Yun-Jiang Rao, Yi-Ping Wang, Zeng-Ling Ran *et al.*. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5): 1320~1327
- 11 G. D. van Wiggeren, T. K. Gaylord, D. D. Davis *et al.*. Axial rotation dependence of resonances in curved CO₂-laser-induced long-period fibre gratings [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(16): 1354~1355
- 12 Yu Qingxu, Song Shide, Zhang Guiju *et al.*. A new method for fabrication of long period fiber grating with CO₂ laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(11): 1372~1375
于清旭, 宋世德, 张桂菊等. CO₂ 激光对称烧写长周期光纤光栅的方法研究 [J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(11): 1372~1375
- 13 Fan Hongjian, Zhang Weigang, Yan Aidong *et al.*. Spectrum analysis for non-uniform ultra-long-period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1547~1552
范弘建, 张伟刚, 颜爱东等. 非均匀超长周期光纤光栅的频谱分析 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1547~1552
- 14 Yan Aidong, Zhang Weigang, Jiang Meng *et al.*. Numerical simulation calculation on spectrum properties of ultra long period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 672~676
颜爱东, 张伟刚, 姜 萌等. 超长周期光纤光栅光谱特性的数值模拟 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 672~676
- 15 Jiang Meng, Zhang Weigang, Jin Long *et al.*. Wavelength tunable band pass filter based on chirped fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 874~878
姜 萌, 张伟刚, 金 龙等. 基于啁啾光纤光栅的波长可调谐带通滤波器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 874~878
- 16 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 17 B. H. Kim, Y. Park, T.-J. Ahn *et al.*. Residual stress relaxation in the core of optical fiber by CO₂ laser irradiation [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1657~1659
- 18 Y. Liu, K. S. Chiang. Recent development on CO₂-laser written long-period fiber gratings [C]. *SPIE*, 2008, **7134**: 713437