

强调制少模长周期光纤光栅的传输谱特性分析

肖荣莉¹, 邱润洲¹, 吴国伟¹, 张斌², 刘伟平¹, 高社成^{1*}

¹暨南大学信息科学技术学院, 广东 广州 510632;

²中山大学电子与信息工程学院, 广东 广州 510275

摘要 本文从局域耦合模理论出发,对基于 CO₂激光器刻写的强调制少模长周期光纤光栅建立模型,实现了少模光栅调制区域纤芯传导模式间的耦合过程分析。该模型通过引入非对称与角向折射率调制,表征了光栅调制中较强且呈角向的折射率变化,从而获得了更准确的模式耦合系数及传播常数;将模式耦合系数及传播常数代入基模与三阶角向模式之间的耦合方程进行求解,实现了对光栅传输谱的仿真,且仿真结果与实验结果相匹配。最后,通过改变光栅模型的参数(光栅周期、周期数、调制深度),研究了传输谱的变化规律,为设计与制作更高阶模式的强调制少模长周期光纤光栅提供了参考。相比于其他模型,该模型能更准确地分析基于局部高强度激光照射、热处理的强调制长周期光纤光栅的传输谱特性。

关键词 光栅;长周期光纤光栅;折射率调制;少模光纤;传输谱

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221354

1 引言

空分复用作为下一代大容量光纤通信的关键技术^[1],通过将不同的空间维度进行复用,有效提高了通信系统的传输容量。少模光纤中的复用技术作为提升空分复用光纤系统空分容量的基础和重要方法已得到系统验证^[2-3],同时,少模光纤中模式的选择过滤及调控等也得到广泛关注^[4-5]。在弱导少模光纤中,纤芯的传导模可表示为 LP_{mn}(LP)模式,其中 m, n 分别指角向、径向指数。LP_{mn}模式在光纤中独立传输,互不干涉,可作为传输信道,快速提升光纤通信系统的容量。由于高阶模式与基模之间的模场差异较大,少模光纤中的高阶模式耦合具有很大的挑战性。作为一种在光纤轴向具有周期性折射率调制的光学无源器件,少模长周期光纤光栅(LPFG)可实现在满足相位匹配条件下同向传输的基模与高阶模之间的耦合。目前已出现了多种用于制备 LPFG 的方法,如 CO₂激光照射法^[6-7]、紫外激光曝光法^[8]、飞秒激光曝光法^[9]、电弧放电法^[10]、机械微弯法^[11]。具有不同特性的光栅可被广泛应用于通信^[12]、传感^[13]等相关领域。

目前,研究人员^[14-17]已基于传统的耦合模理论对 LPFG 传输谱进行了仿真分析。LPFG 是弱调制光栅,弱调制只会对纤芯区域的折射率产生微扰,并不会导致光纤结构发生形变。实际上,不引起光纤结

构形变的 LPFG 一般只能激发低阶角向模式,很难激发出高阶模式。要想产生高阶模式,就需要对 LPFG 进行强调制。强调制会使光纤结构发生较大的非对称形变,此时纤芯的折射率也会发生较大改变。强调制少模 LPFG 具有较强的角向折射率调制^[18-19]及模场分布被明显修正的特点,因此,传统的耦合模理论已不能用于准确分析其强调制区域中纤芯传导模式之间的耦合过程。2003年,Anemogiannis 等^[19]针对具有任意角向/径向折射率变化的 LPFG,提出了一种用于分析其传输谱的方法,并对光栅中 LP₀₁模式与高阶角向包层模式之间的耦合过程进行研究。2010年, Jin 等^[20]提出了一种仿真强调制 LPFG 传输谱的方法,并基于局域耦合模理论对纤芯模与包层模之间的耦合方程进行了分析。上述两种方法分析的模式耦合过程被限制在单模 LPFG 的基模与包层模之间。2020年,本课题组成员何晓东等^[21]先基于局域耦合模理论推导出了强调制少模 LPFG 中纤芯导模之间的耦合方程,而后对光栅截面的耦合系数进行计算,求解出了光栅的传输谱;但他们在仿真模型中没有考虑强调制下纤芯中角向折射率变化的问题,易导致仿真光谱与实际光谱不匹配。鉴于此,笔者先基于局域耦合模理论分析了光栅中纤芯基模与高阶角向模式之间的耦合过程,接着建立强调制少模 LPFG 模型,并在模型中引入非对称与角向调制参数,实现了光栅的传输谱仿真。仿真结果

收稿日期: 2022-10-21; 修回日期: 2022-12-06; 录用日期: 2022-12-16; 网络首发日期: 2022-12-26

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801003)、国家自然科学基金(61875076)、广东省自然科学基金(2021A1515011837)

通信作者: *gaosc825@163.com

与已有实验结果相符。最后进一步分析了仿真模型中光栅参数的变化对传输谱的影响,这为分析调制少模 LPFG 中纤芯传导模式之间的耦合过程提供了可行方法,同时为制备不同需求的光栅提供了参考。

2 仿真模型

2.1 理论分析

目前,耦合模理论主要用于分析传统的折射率受到微弱调制的光栅中纤芯导模与包层模式之间的耦合过程,而弱调制 LPFG 通常只能产生较低阶的角向模式,在高阶角向模式的产生上面临较大挑战。通过引入强折射率调制,LPFG 可以实现低阶角向模式向高阶角向模式的转换^[18,21]。对于光栅区域内具有较强折射率调制的 LPFG 来说,若光栅中的模场扰动在波长标度上可以视为缓慢变化,则可以采用局域耦合模理论进行分析^[22]。以下将从局域耦合模理论出发,表征光栅中传输的纤芯模式间的耦合过程,进而推导出模式的耦合方程。

当光通过光栅的未调制区域时,横向电场与磁场可以表示为本征模式的叠加,即

$$E_t(x, y, z) = \sum_j E_{t,j}(x, y, z) = \sum_j \{b_j(z) + b_{-j}(z)\} \hat{e}_{t,j}(x, y, z), \quad (1)$$

$$H_t(x, y, z) = \sum_j H_{t,j}(x, y, z) = \sum_j \{b_j(z) + b_{-j}(z)\} \hat{h}_{t,j}(x, y, z), \quad (2)$$

其中,

$$b_j(z) = a_j(z) \exp \left\{ i \int_0^z \beta_j(z) dz \right\}, \quad (3)$$

$$\hat{e}_t = \frac{E_{t,j}}{\sqrt{\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} E_{t,j} \times H_{t,j}^* dA}}, \quad (4)$$

$$\hat{h}_t = \frac{H_{t,j}}{\sqrt{\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} E_{t,j} \times H_{t,j}^* dA}}, \quad (5)$$

式中: $\beta_j(z)$ 表示模式的传播常数; $a_j(z)$ 表示 j 阶模的振幅; $H_{t,j}^*$ 表示磁场强度的大小; $b_j(z)$ 和 $b_{-j}(z)$ 中包含了本征模式的振幅与相位信息,下标的正负分别指前向传输与后向传输; \hat{e}_t 和 \hat{h}_t 分别表示归一化后的横电模与横磁模。

当光通过光栅的调制区域时,纤芯模式之间会发生能量转换。单个局域纤芯模不是麦克斯韦方程的精确解,因此,对于 LPFG 这种随机变化的光纤,局域纤芯模之间的耦合过程^[20]可用局域耦合模理论描述为

$$\begin{cases} \frac{db_j}{dz} - i\beta_j(z)b_j = \sum_l \{C_{jl}(z)b_l + C_{j-l}b_{-l}\} \\ \frac{db_{-j}}{dz} + i\beta_j(z)b_{-j} = -\sum_l \{C_{-jl}(z)b_l + C_{-j-l}b_{-l}\} \end{cases} \quad (6)$$

考虑纤芯中 LP₀₁ 与高阶角向模式 LP_{*m*1} 之间的耦合时,耦合方程^[21]可以写为

$$\begin{cases} \frac{da_{01}}{dz} = C(z) \cdot a_{m1} \cdot \exp \left\{ i \int_0^z [\beta_{m1}(z) - \beta_{01}(z)] dz \right\} \\ \frac{da_{m1}}{dz} = C(z) \cdot a_{01} \cdot \exp \left\{ i \int_0^z [\beta_{01}(z) - \beta_{m1}(z)] dz \right\} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: a_{01} 和 a_{m1} 分别表示 LP₀₁ 和 LP_{*m*1} 模式的电场振幅; $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ 为传播常数; $C(z)$ 表示耦合系数。耦合系数用于量化模式耦合效率,其表达式为

$$C(z) = \frac{1}{4} \left\{ \hat{h}_{t,j} \times \frac{\partial \hat{e}_{t,l}}{\partial z} - \hat{e}_{t,j} \times \frac{\partial \hat{h}_{t,l}}{\partial z} \right\} \cdot \hat{z} ds, \quad j \neq l, \quad (8)$$

式中: $\hat{e}_{t,l}$ 和 $\hat{h}_{t,l}$ 分别代表归一化的横向电场和磁场。将耦合系数 $C(z)$ 用傅里叶级数展开为

$$C(z) = f_N \exp \left(i \frac{2N\pi}{\Lambda} z \right), \quad (9)$$

式中: f_N 是第 N 次谐波分量的幅值; Λ 表示光纤周期。因此,式(7)右侧的相位项可以表示为

$$\Delta\phi = \int_0^z [\beta_{m1}(z) - \beta_{01}(z)] + \frac{2N\pi}{\Lambda} dz. \quad (10)$$

结合式(7)~(10)可知,当满足相位匹配条件 $\Lambda = \lambda_{\text{res}}/(n_{01} - n_{m1})$ (λ_{res} 表示谐振波长),且耦合系数不是无穷小时,基模 LP₀₁ 与高阶角向模式 LP_{*m*1} 之间发生耦合。本文重点考虑 $m=3$ 时的耦合关系,即纤芯中 LP₀₁ 与高阶角向模式 LP₃₁ 之间的耦合关系。LP₀₁ 是模场分布为圆对称的径向模式,其与角向模式之间的模场重叠区域很小,因此模式耦合系数很小。此时需要引入角向折射率调制,在角向引起光场变化,使两个模式之间的模场重叠面积增加,从而使耦合系数增大。

采用如下步骤对强调制少模 LPFG 的模式耦合过程及传输谱进行仿真:1) 建立调制区域几何结构和材料折射率变化的模型;2) 加入非对称与角向折射率调制,采用有限元法(FEM)对模型进行求解,得到模式的场分布及传播常数,然后将其代入式(8)计算出耦合系数;3) 将耦合系数代入式(7)求解耦合方程,计算沿着光纤的相关模式功率,再计算不同波长下的相关模式功率得到光栅的传输谱。

2.2 模型的建立

利用上一节描述的局域耦合模理论对 CO₂ 激光器刻写的强调制少模 LPFG 进行仿真。采用 CO₂ 激光器在七模光纤上制备光栅,光纤参数如下:凹陷层半径 $a_1=1.5 \mu\text{m}$,纤芯层半径 $a_2=8.95 \mu\text{m}$,包层半径 $a_3=$

62.5 μm , 凹陷层折射率 $n_1=1.4566$, 纤芯层折射率 $n_2=1.4576$, 包层折射率 $n_3=1.444$, 光栅周期 $\Lambda=228 \mu\text{m}$, 周期数 $N=100$ 。光栅调制区域任意一点的端面图和侧视图如图 1 所示, 可以看出光栅具有明显的结构变化。聚焦的 CO_2 激光束沿着七模光纤进行横向多次扫描, 不同的激光功率与扫描速度对七模光纤刻蚀量与

折射率调制的影响不同。所用光栅制备方法通过残余应力释放、结构变化、几何变形等机制向光纤中引入折射率调制^[23]。该 LPFG 传输谱的测量结果如图 2 所示, 这是经过 100 个扫描周期刻写的结果。可见, 在 1556 nm 波长处出现了谐振峰, 实现了 LP_{01} 与 LP_{31} 模式间的能量转换。

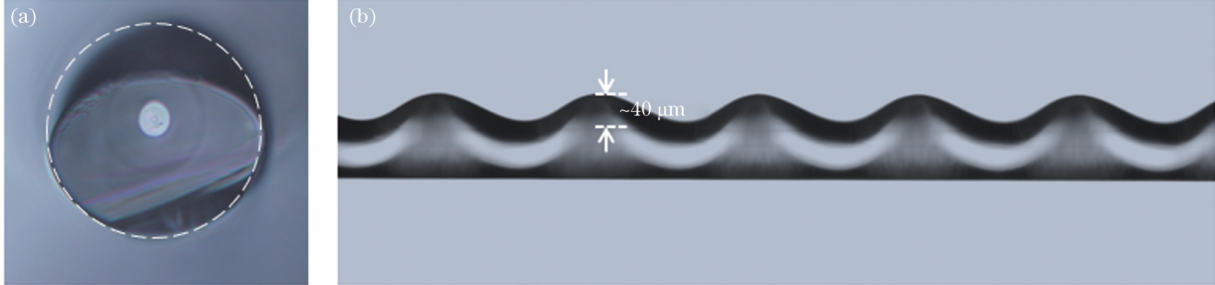


图 1 光栅区域任意一点在显微镜下的形貌。(a)横截面图;(b)侧边图

Fig. 1 Images of a position in the grating region captured by microscopy. (a) Cross-section; (b) side view

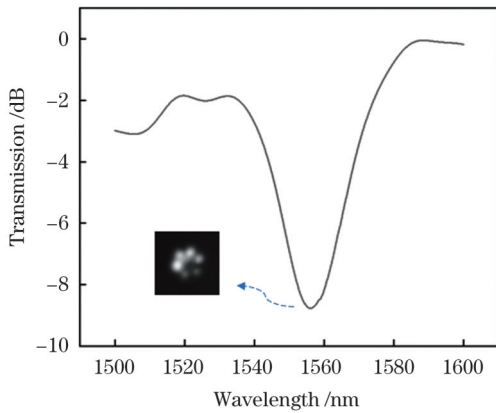


图 2 LPFG 的实验传输谱, 插图为 LP_{31} 模式的模场分布

Fig. 2 Experimental transmission spectrum of the LPFG, where the inset is mode field distribution of LP_{31} mode

建立 LPFG 横截面及侧面的理想模型, 以尽可能逼近于实际光栅的调制区域, 如图 3 所示。光栅周期区域模拟结果如图 3(a) 所示, 将其中一个调制区域分

成三部分: AB 段、 BC 段和 CD 段。假设 BC 段光纤的几何形状与折射率未改变, 则耦合系数为 0^[21]。 AB 段与 CD 段对称, 故而只选择其中一段进行仿真即可。本文选择 AB 段进行仿真。将 AB 段划分为 6 小段, AB 段的高度与实际塌陷高度 40 μm 一致, 将每一小段的截面分别标记为 A 、 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 、 B , 建立的光栅截面模型如图 3(b) 所示。除了图中包层的几何结构发生变化外, 纤芯折射率也发生了变化。由于 CO_2 激光束是单边照射的, 因此光纤沿着入射方向的折射率变化是不对称的, 而且纤芯调制区域的折射率变化具有角向依赖性。在进行折射率调制仿真时, 将纤芯分为 4 个区域, 上方部分对应的圆心角为 60° , 左右两侧对应的圆心角为 90° , 底部对应的圆心角为 120° , 如图 3(c) 所示。因此, 仿真时在纤芯与包层部分分别引入非对称调制衰减因子 α , 在纤芯区域的上方部分与左右两侧引入角向变化因子 $1 + \sin(\phi)$, 其中 ϕ 为方位角。引入角向变化因子之后, 光纤中心区域尤其是纤

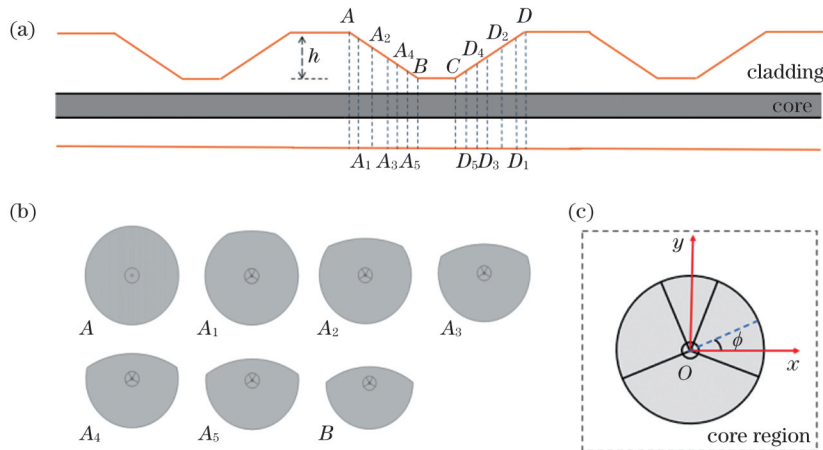


图 3 强调制 LPFG 区域的理想模型图。(a)光栅区域侧边图;(b)单个光栅区域的横截面结构;(c)纤芯区域的折射率调制

Fig. 3 Ideal model diagrams of the strongly modulated LPFG regions. (a) Side view of the grating region; (b) cross-section structures of a grating region; (c) refractive index modulation in the core region

芯部分的圆对称性遭到破坏,模式沿着角向发生形变。底部因背对激光束,故仅引入线性衰减因子 α 进行折射率调制。

在七模光纤中, LP_{01} 与 LP_{31} 模式之间的折射率差值较大,为 $\Delta=0.0067$,且模式的模场之间重叠面积较小,因为 LP_{01} 与 LP_{31} 模式难以发生耦合。在光栅中引入较强且呈角向的折射率调制对于实现 LP_{01} 与 LP_{31} 模式的转换具有重要作用。在模型中设置线性衰减因子 α 从截面 A 到 B 呈梯度增加,分别为 $0, 0.4 \times 10^{-6}, 1 \times 10^{-6}, 6 \times 10^{-6}, 1 \times 10^{-5}, 1.6 \times 10^{-5}, 2.8 \times 10^{-5}$, 线性衰减因子 α 增加的趋势与实际情况相符(塌陷越深的位置,受到的折射率调制越强)。图 4 展示了模场调制前后的对比图,可见,调制后,模场分布被明显修正,增大了模式之间的模场重叠面积,从而增强了模式之间的

耦合。图 4 所示结果验证了角向调制的必要性。在未调制区域,耦合系数设为 $0^{[20]}$,对应每个截面之间的耦合系数分别为 $0, 1.63 \times 10^{-4}, 2.93 \times 10^{-5}, 1.08 \times 10^{-4}, 7.26 \times 10^{-5}, 1.15 \times 10^{-4}, 2.48 \times 10^{-4}$ 。根据每个截面之间的耦合系数与折射率差值,可以求解相应的局域耦合模方程。通过计算不同波长下沿着光纤的相关模式功率实现了光栅传输谱的仿真,图 5 所示为仿真数据与实验数据的对比图。可见,光栅的仿真参数与实验参数一致,实验得到的谐振峰的形状、深度以及谐振波长与仿真结果基本吻合。实际制备光栅时会受到环境等因素的影响,当施加于光纤的应力不合适或者功率较大时,光纤易出现微弯,导致下一次扫描时出现周期不均一的问题,从而导致光栅光谱展宽,因此实验得到的带宽略宽于仿真结果。

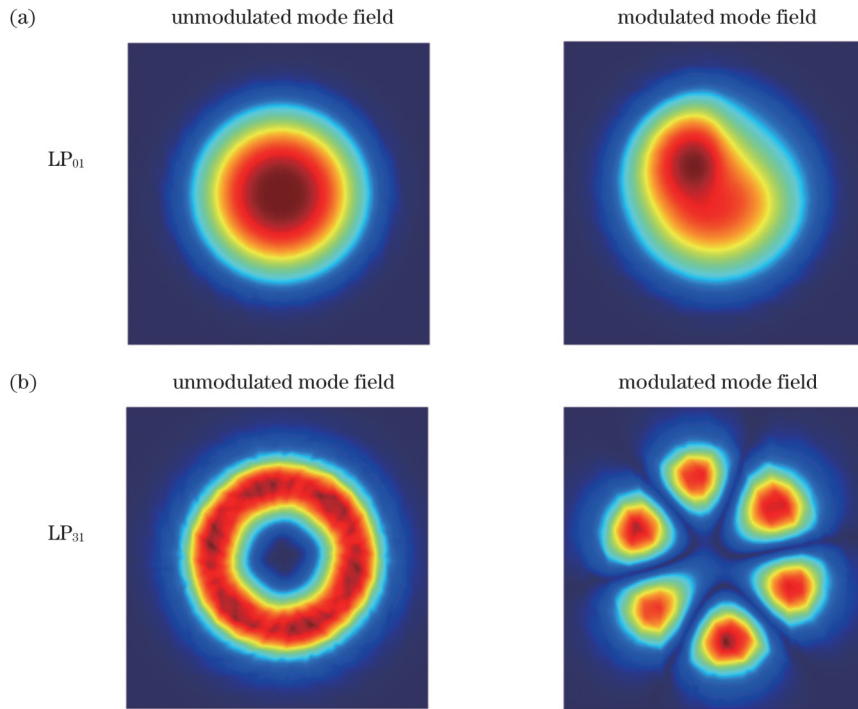


图 4 未调制模场和调制模场的对比。(a) LP_{01} 模式;(b) LP_{31} 模式

Fig. 4 Comparison of unmodulated and modulated mode fields. (a) LP_{01} mode; (b) LP_{31} mode

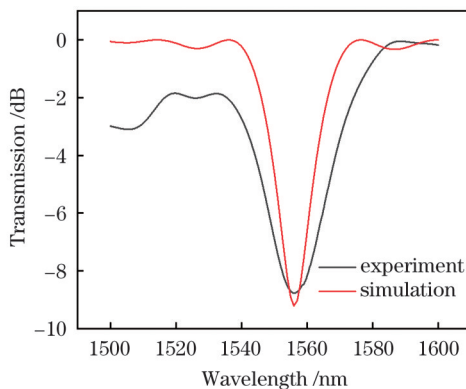


图 5 实验与仿真传输谱的对比

Fig. 5 Comparison of experimental and simulated transmission spectra

3 数值分析

上一节通过在光栅调制区域的截面中引入折射率调制引起了截面中模式的模场变化,而模场变化的快慢决定了耦合系数的大小,从而将会对两个模式的直接耦合产生间接影响。基于该仿真模型可以表征强调制光栅区域纤芯导模之间的耦合过程。接下来通过改变光栅仿真模型中的光栅周期、周期数、调制深度来观察对应传输谱的变化,为实验制备不同需求的强调制少模 LPFG 提供参考。

3.1 光栅周期 Λ 的影响

保持其他参数不变仅改变光栅周期,分析光栅传输谱与光栅周期之间的关系。选取 4 个不同的光栅周

期(227、228、229、230 μm)进行仿真,得到了光栅传输谱在不同光栅周期下的变化曲线,如图 6 所示。可以看出,随着光栅周期减小,光栅传输谱的谐振波长向长波方向移动,波长漂移的速度高于光栅周期变化的速度。这说明 LP_{31} 模式的谐振波长对光栅周期具有敏感

性。进一步仿真得到了不同波长下 LP_{01} 与 LP_{31} 模式的有效折射率差。根据相位匹配条件,绘制了光栅周期随谐振波长的变化曲线,如图 7 所示。可见,随着谐振波长增大,光栅周期逐渐减小。图 6 与图 7 的变化规律一致。

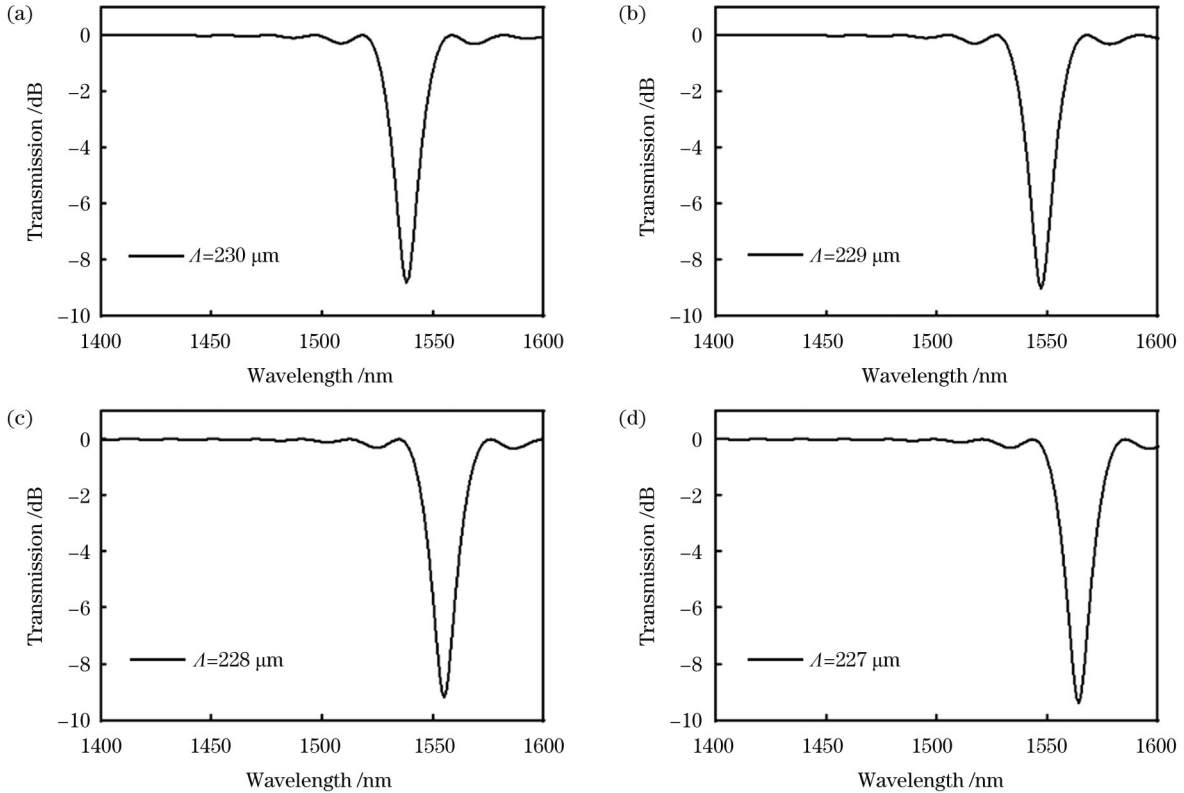


图 6 传输谱在不同光栅周期下的变化曲线

Fig. 6 Variation of transmission spectra for different grating periods

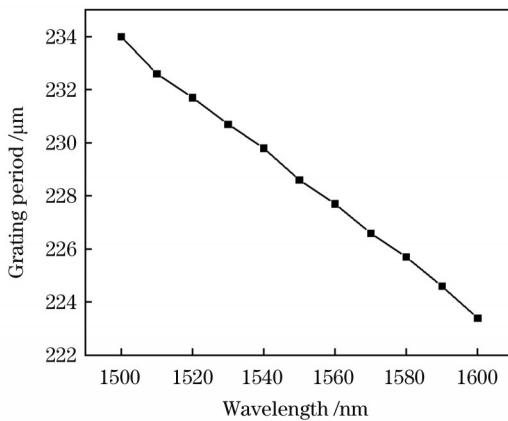


图 7 光栅周期随谐振波长变化的曲线

Fig. 7 Variation of grating period with resonance wavelength

3.2 周期数 N 的影响

保持光栅周期 $\Lambda=228 \mu\text{m}$ 不变,研究光栅周期数 N 对传输谱的影响。分别选取光栅周期数 N 为 80、100、120、140、160、180、200,仿真得到了不同光栅周期数下的传输谱,如图 8 所示。可以发现图 8 所示的谐振波长没有明显漂移,而且谐振峰的带宽逐渐变窄。这是由于随着周期数增加, LP_{01} 与 LP_{31} 模式间的耦合不

断增强。当光栅周期数为 160 时,光栅出现过耦合现象,谐振峰深度低于 140 周期数下的谐振峰深度;周期数越大,谐振峰幅值越小。可见,选择合适的光栅周期数可以实现较高的模式转换效率。

3.3 调制深度 α 的影响

调制区域中截面的调制深度影响截面的折射率变化以及模场变化,进而影响截面之间的耦合系数。在保持其他参数不变的情况下,研究调制深度 α 对光栅传输谱的影响。选取 4 组不同的调制深度(如表 1 所示),仿真不同调制作用下光栅传输谱的变化,仿真结果如图 9 所示。由图 9 可以看出,每个截面的调制深度影响截面之间的耦合系数以及模式的折射率差,从而使得光栅传输谱的带宽、深度以及谐振波长的位置发生变化。

以上通过改变所建立模型的参数(如光栅周期、周期数、调制深度),分析了光栅传输谱特性的变化规律。除此之外,所建仿真模型还可应用于不同的光纤上,对于设计与制备不同需求的光栅具有一定的指导意义。

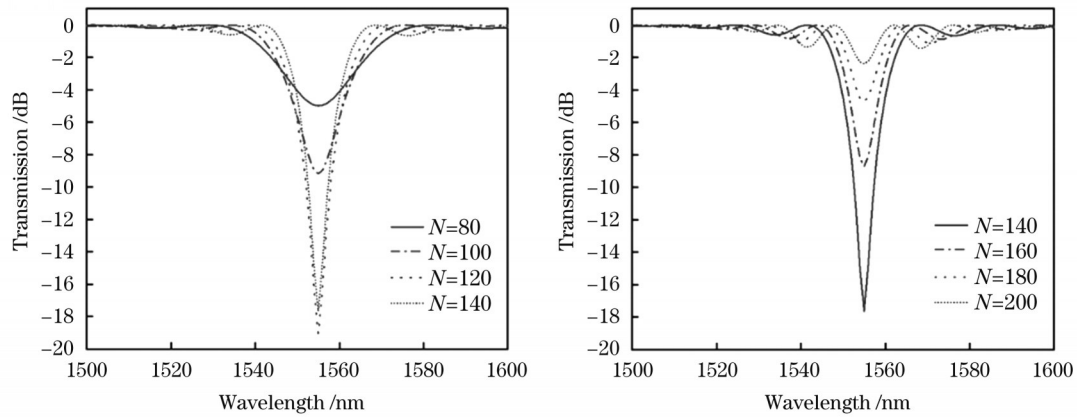


图 8 不同光栅周期数下的传输谱

Fig. 8 Transmission spectra for different numbers of grating periods

表 1 4组调制深度

Table 1 Four sets of modulation depths

No.	Modulation depth						
	Section A	Section A ₁	Section A ₂	Section A ₃	Section A ₄	Section A ₅	Section B
S1	0	0.4×10^{-6}	0.8×10^{-6}	4×10^{-6}	8×10^{-6}	1.2×10^{-5}	2×10^{-5}
S2	0	0.4×10^{-6}	1×10^{-6}	8×10^{-6}	1.2×10^{-5}	1.8×10^{-5}	2.6×10^{-5}
S3	0	0.6×10^{-6}	1.2×10^{-6}	1×10^{-5}	1.4×10^{-5}	2×10^{-5}	2.8×10^{-5}
S4	0	0.4×10^{-6}	1×10^{-6}	6×10^{-6}	1×10^{-5}	1.6×10^{-5}	2.8×10^{-5}

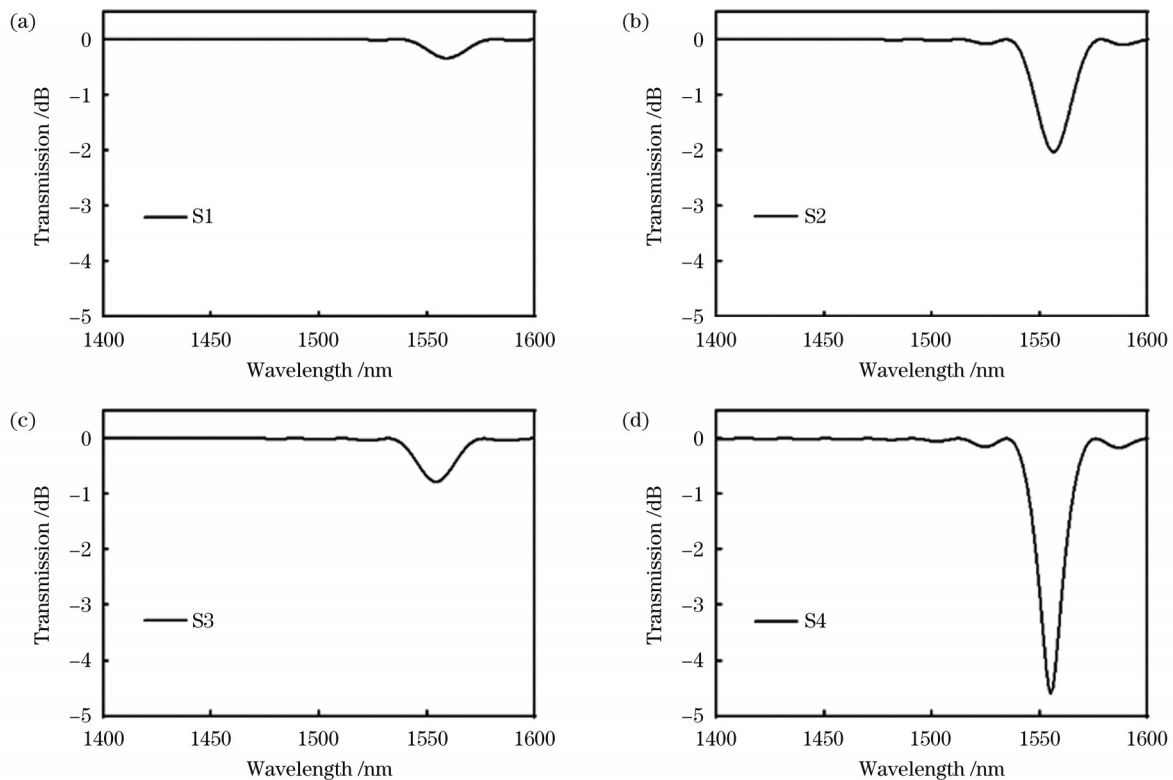


图 9 不同调制深度下的传输谱

Fig. 9 Transmission spectra under different modulation depths

4 结 论

搭建了一种分析强调制少模 LPFG 的仿真模型。基于局域耦合模理论,计算了光栅调制区域折射率与

耦合系数的变化,并引入非对称与角向折射率调制,通过数值求解局域耦合模方程得到了强调制少模 LPFG 的光谱特性。将仿真得到的 LPFG 的光谱与实验中使用 CO₂ 激光器制备的强调制 LPFG 的光谱进行对比,

结果显示,仿真结果与实验结果相符。结合所建模型分析了光栅周期、周期数、调制深度对光栅传输谱的影响。与其他仿真模型相比,本文仿真模型更适合用于分析 CO₂激光等高功率局域激光照射制备的 LPFG,可以更准确地表征强调制少模光栅中纤芯区域基模与高阶角向模式之间的耦合过程,对于实现更高阶角向模式转换以及不同需求的 LPFG 的制备具有一定参考价值。

参 考 文 献

- [1] Zhang L, Chen J J, Agrell E, et al. Enabling technologies for optical data center networks: spatial division multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(1): 18-30.
- [2] Rademacher G, Puttnam B J, Luis R S, et al. Highly spectral efficient C + L-band transmission over a 38-core-3-mode fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(4): 1048-1055.
- [3] Rademacher G, Puttnam B J, Luis R S, et al. Peta-bit-per-second optical communications system using a standard cladding diameter 15-mode fiber[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1-7.
- [4] 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.
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.
- [5] 郭英豪, 刘美, 汤敏, 等. 基于矢量模式的全光纤模式选择耦合器[J]. *中国激光*, 2022, 49(3): 0306004.
Guo Y H, Liu M, Tang M, et al. All-fiber mode selective coupler based on vector modes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(3): 0306004.
- [6] Kakarantzas G, Dimmick T E, Birks T A, et al. Miniature all-fiber devices based on CO₂ laser microstructuring of tapered fibers[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(15): 1137-1139.
- [7] Wang Y P, Xiao L M, Wang D N, et al. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(23): 3414-3416.
- [8] Bhatia V, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(9): 692-694.
- [9] Grobncic D, Mihailov S J, Smelser C W, et al. Femtosecond laser fabrication of Bragg gratings in borosilicate ion-exchange waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(13): 1403-1405.
- [10] Petrovic J S, Dobb H, Mezentsev V K, et al. Sensitivity of LPGs in PCFs fabricated by an electric arc to temperature, strain, and external refractive index[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(5): 1306-1312.
- [11] Steinvurzel P, Moore E D, Mägi E C, et al. Long period grating resonances in photonic bandgap fiber[J]. *Optics Express*, 2006, 14(7): 3007-3014.
- [12] Rao Y J, Zhu T, Ran Z L, et al. Novel long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses and applications in optical fiber communication[J]. *Optics Communications*, 2004, 229(1/2/3/4/5/6): 209-221.
- [13] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1442-1463.
- [14] 朱雨雨, 郗亚茹, 张亚妮, 等. 长周期光纤光栅光谱特性仿真研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(3): 451-458.
Zhu Y Y, Xi Y R, Zhang Y N, et al. Numerical simulation of transmission spectra characterization of long-period fiber grating[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 451-458.
- [15] 赵洪霞, 程培红, 鲍吉龙, 等. 一种新型结构长周期光纤光栅光谱特性研究[J]. *传感技术学报*, 2014, 27(6): 743-746.
Zhao H X, Cheng P H, Bao J L, et al. Research on optical-spectrum characteristics of a novel long-period fiber grating[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014, 27(6): 743-746.
- [16] 关寿华, 于清旭. 光子晶体光纤长周期光栅的谐振波长特性研究[J]. *应用光学*, 2013, 34(3): 537-541, 552.
Guan S H, Yu Q X. Properties of resonant wavelength of long period grating in photonic crystal fiber[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(3): 537-541, 552.
- [17] 魏石磊, 张伟刚, 范弘建, 等. 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[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0806006.
Wei S L, Zhang W G, Fan H J, et al. Study on spectral properties of tilted long-period fiber grating written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0806006.
- [18] Wu H, Gao S C, Huang B S, et al. All-fiber second-order optical vortex generation based on strong modulated long-period grating in a four-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5210-5213.
- [19] Anemogiannis E, Glytsis E N, Gaylord T K. Transmission characteristics of long-period fiber gratings having arbitrary azimuthal/radial refractive index variations[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(1): 218-227.
- [20] Jin L, Jin W, Ju J, et al. Coupled local-mode theory for strongly modulated long period gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(12): 1745-1751.
- [21] He X D, Tu J J, Wu X W, et al. All-fiber third-order orbital angular momentum mode generation employing an asymmetric long-period fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3621-3624.
- [22] Snyder A W, Love J D. *Optical waveguide theory*[M]. London: Chapman and Hall, 1983.
- [23] Wang Y P. Review of long period fiber gratings written by CO₂ laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(8): 081101.

Analysis of Transmission Spectrum Characteristics of Strongly Modulated Few-Mode Long-Period Fiber Gratings

Xiao Rongli¹, Qiu Runzhou¹, Wu Guowei¹, Zhang Bin², Liu Weiping¹, Gao Shecheng^{1*}

¹College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China;

²School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China

Abstract

Objective In a previous work, the transmission spectrum of long-period fiber gratings (LPFGs) was simulated and analyzed based on traditional coupled mode theory. However, for a strongly modulated few-mode LPFG, traditional coupled mode theory cannot be used to accurately analyze the coupling process between the core guide modes in the strong modulation region. This is because of its strong angular refractive index modulation and the obvious correction of the mode field distribution. In addition, the problem of

change in the angular refractive index in the fiber core was not considered in the previous strongly modulated model, which is inconsistent with the change in actual gratings. This can easily result in the simulation spectrum not matching the actual spectrum. Therefore, based on local coupled mode theory, this study analyzed the coupling process between the fiber core fundamental mode and the high-order angular mode in an LPFG grating. This study also established a model for a strongly modulated few-mode LPFG, introduced asymmetric and angular modulation parameters into the model, realized a transmission spectrum simulation of the grating, and matched the existing experimental results. A method was thus realized for analyzing the coupling process between the guide modes of the fiber core in a strongly modulated few-mode LPFG, which provides a reference for preparing gratings with different experimental requirements.

Methods Based on local coupling mode theory, a model of a strongly modulated LPFG written by a CO₂ laser was constructed to analyze the coupling process between the core guided modes in the modulated region of a few-mode grating. With asymmetric and angular refractive index modulations introduced into the model, the strong angular refractive index variation in grating modulation was characterized, and a more accurate mode coupling coefficient and propagation constant were derived. These were substituted into the coupling equation between the fundamental and third-order azimuthal modes to solve, and a simulation of the grating transmission spectrum was realized. The simulation and experimental results were then matched. In addition, based on changes to the grating model parameters (grating period, the number of periods, and modulation depth), the change in the corresponding transmission spectrum was studied, thereby providing a reference for designing and fabricating higher-order-mode strongly modulated LPFGs.

Results and Discussions We first established a model for a strongly modulated few-mode LPFG by adding asymmetric and angular refractive index modulations. Figure 4 shows a comparison of the unmodulated and modulated mode fields, which reflects the necessity of angular modulation and enhancement of coupling between modes. Figure 5 shows a comparison between the simulation and experimental data. The simulation parameters of the grating were consistent with the experimental parameters. It can be seen that the shape, depth, and resonant wavelength of the experimental resonant peak are basically consistent with those of the simulation. Based on changes to the parameters of the established model (grating period, the number of periods, and modulation depth), the change rule of the grating transmission spectrum characteristics was analyzed, as shown in Figs. 6, 8, and 9. Thus, the simulation model can be applied to different optical fibers to guide the design and preparation of gratings with different requirements.

Conclusions In this study, a simulation model of an LPFG is established, with emphasis given to analysis of the LPFG. Based on local coupled mode theory, the refractive index and coupling coefficient changes in the modulation region of the grating are calculated, and asymmetric and angular refractive index modulations are introduced. The spectral characteristics of a strongly modulated few-mode LPFG are obtained by numerically solving the local coupled-mode equations. The spectra of strongly modulated LPFG fabricated by using CO₂ laser in the experiment and the simulation results are in agreement. These results and the effects of grating period, the number of periods, and modulation depth on the transmission spectrum of the grating were analyzed. This simulation method is more suitable for analyzing LPFGs prepared by high-power local laser (such as CO₂ laser) irradiation methods and more accurately characterizes the coupling process between the fundamental and high-order angular modes in the fiber core area of a few-mode grating. This method has a reference value for realizing higher-order angular mode conversion and preparing LPFGs with different requirements. Compared with other methods, this method can more accurately analyze a series of LPFGs based on local high-intensity laser irradiation and heat treatment.

Key words gratings; long-period fiber grating; refractive index modulation; few-mode fiber; transmission spectrum