

基于少模长周期光纤叠栅的模式转换器

薛艳茹 田朋飞 金娃 赵能 靳云 毕卫红

Superimposed long period gratings based mode converter in few-mode fiber

Xue Yan-Ru Tian Peng-Fei Jin Wa Zhao Neng Jin Yun Bi Wei-Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 054204 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181674

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181674>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

少模光纤的不同模式布里渊散射特性

Characterization of Brillouin scattering in a few-mode fiber

物理学报. 2017, 66(2): 24207 <https://doi.org/10.7498/aps.66.024207>

基于少模光纤的全光纤熔融模式选择耦合器的设计及实验研究

Design and experimental study of mode selective all-fiber fused mode coupler based on few mode fiber

物理学报. 2015, 64(20): 204207 <https://doi.org/10.7498/aps.64.204207>

少模光纤放大器中的准静态模式不稳定实验研究

Quasi-static mode instability in few-mode fiber amplifier

物理学报. 2018, 67(14): 144203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180140>

基于光纤叠栅的全光纤声光可调谐滤波器的特性分析

Analysis of all fiber acousto-optic tunable filter based on superimposed fiber Bragg gratings

物理学报. 2015, 64(17): 174207 <https://doi.org/10.7498/aps.64.174207>

少模光纤的弯曲损耗研究

Study on bending losses of few-mode optical fibers

物理学报. 2016, 65(6): 64208 <https://doi.org/10.7498/aps.65.064208>

低差分模式时延少模光纤的有限元分析及设计

Finite element analysis and design of few mode fiber with low differential mode delay

物理学报. 2015, 64(6): 64212 <https://doi.org/10.7498/aps.64.064212>

基于少模长周期光纤叠栅的模式转换器*

薛艳茹¹⁾²⁾ 田朋飞¹⁾ 金娃¹⁾ 赵能¹⁾ 靳云¹⁾³⁾ 毕卫红^{1)†}

1) (燕山大学信息科学与工程学院, 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 秦皇岛 066004)

2) (河北科技师范学院机电工程学院, 秦皇岛 066004)

3) (河北建材职业技术学院机电工程系, 秦皇岛 066004)

(2018年9月8日收到; 2018年11月8日收到修改稿)

本文提出一种在同一段少模光纤上写入两个不同周期 Λ_1 和 Λ_2 的长周期光纤光栅构成叠栅的方法, 实现了纤芯基模 LP_{01} 向高阶纤芯模 LP_{11} 模式转换的宽带宽的新的全光纤模式转换器. 利用有限元法和耦合模理论建立了模式转换器的理论分析模型. 数值仿真分析了叠栅中两个子光栅周期间隔、光栅长度、耦合系数等光栅参数对模式转换器的影响. 仿真分析和实验结果表明, 通过改变两个子光栅的周期间隔来改变两个损耗峰的位置, 形成一个损耗峰, 从而可以实现宽带宽的模式转换器, 其 10 dB 带宽约是单栅的 2 倍. 与传统的模式转换器相比, 该转换器带宽宽、转换效率高, 尺寸小、抗干扰能力强, 可以在模分复用系统和光通信中得到广泛的应用.

关键词: 长周期光纤叠栅, 少模光纤, 模式转换器, 耦合系数

PACS: 42.79.Dj, 42.79.Sz, 42.81.Wg

DOI: 10.7498/aps.68.20181674

1 引言

目前, 模分复用系统因能够克服单模光纤传输容量的极限、实现更大容量的光纤传输、满足人们日益增长的通信需求而受到广泛的关注^[1,2]. 基于少模光纤的模分复用系统主要是利用少模光纤中不同的光纤模式作为传输信道来同时传输多路信号从而增大传输容量^[3]. 模式转换器将单模光纤中传输的基模 (LP_{01}) 转换成少模光纤中传输的高阶纤芯模, 是模分复用系统中的关键器件, 实现的主要方式有空间光调制器法^[4,5]、相位板法^[6,7]、波导耦合器法^[8,9]、光子灯笼法^[10,11]、布拉格光栅法^[12]、长周期光栅法^[13-18]等. 基于长周期光栅的模式转换器实现的方法有机械微弯法^[13]、紫外线法^[14]、飞

秒激光法^[15]、 CO_2 激光器法^[16-18]. CO_2 激光器法因其具有低损耗、易于制造、可控性好、稳定性好等优点, 在长周期光栅的刻制中发挥了重要的作用, 这已经得到理论和实验的证实. 文献^[13,16]提出了在少模光纤中刻制长周期光栅以实现模式的转换, 该方法转换效率高, 但是带宽只有几十纳米. 2013年, Garg 和 Thyagarajan^[19]首次提出在单模光纤中利用叠栅实现基模与包层模的宽带宽转换, 但只进行了理论仿真分析.

本文提出在少模光纤中利用叠栅实现纤芯基模 LP_{01} 向高阶纤芯模 LP_{11} 的转换, 仿真分析了各参数对转换器性能的影响, 根据仿真结果, 利用 CO_2 激光器刻制叠栅, 转换效率大于 90% 的带宽达 153 nm.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61475133, 61575170, 61605168)、河北省自然科学基金 (批准号: F2016203392)、河北省应用基础研究计划重点基础研究项目 (批准号: 16961701D)、河北省高等学校科学技术研究基金 (批准号: QN2016078) 和燕山大学校内博士基金 (批准号: B1011) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: whbi@ysu.edu.cn

2 模式转换器原理

2.1 模式转换器结构

在少模光纤同一段写入两个周期分别为 A_1 , A_2 的长周期光栅, 利用光栅的周期性微扰引起的模式耦合实现纤芯基模 LP_{01} 向高阶纤芯模 LP_{11} 的转换, 其结构如图 1 所示.

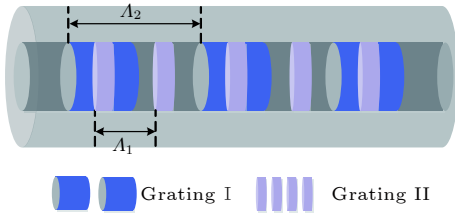


图 1 模式转换器的结构图
Fig. 1. Schematic of mode converter.

2.2 理论模型

在少模光纤同一段写入不同周期的长周期光栅而形成叠栅, 假设每次写入的光栅对光纤折射率的调制均为弱调制, 这样叠栅的折射率调制可认为是两个子光栅单独调制的线性叠加, 纤芯折射率的改变量为^[20]

$$\Delta n(z) = \sum_{k=1}^2 \overline{\Delta n_k}(z) + \overline{\Delta n_1}(z) \cos\left(\frac{2\pi}{A_1}z + \varphi_1(z)\right) + \overline{\Delta n_2}(z) \cos\left(\frac{2\pi}{A_2}z + \varphi_2(z)\right), \quad (1)$$

式中 $\overline{\Delta n_k}(z)$ 为第 k 个子光栅的平均折射率改变量; A_1, A_2 分别为光栅 I 和光栅 II 的周期; $\varphi_1(z), \varphi_2(z)$ 为与子光栅相移或啁啾相关的附加相位.

两个子光栅在满足相位匹配的条件下均实现了纤芯基模 LP_{01} 向高阶纤芯模 LP_{11} 的转换. 根据耦合模理论, 得出利用叠栅实现模式转换的耦合方程^[20] 如下:

$$\begin{cases} \frac{dA_1}{dz} = i\kappa_{11}^{01-01}A_1 + \frac{1}{2}iA_2\kappa_{12}^{01-11} \exp[i(-2\delta_1z)] \\ \quad + \frac{1}{2}iA_2\kappa_{12}^{01-11} \exp[i(-2\delta_2z)], \\ \frac{dA_2}{dz} = i\kappa_{22}^{11-11}A_2 + \frac{1}{2}iA_1\kappa_{21}^{11-01} \exp[i(2\delta_1z)] \\ \quad + \frac{1}{2}iA_1\kappa_{21}^{11-01} \exp[i(2\delta_2z)], \end{cases} \quad (2)$$

式中 A_1, A_2 分别为正向传输的 LP_{01} 和 LP_{11} 模的

电场慢变振幅; $\kappa_{11}^{01-01}, \kappa_{22}^{11-11}$ 为自耦合系数; $\kappa_{12}^{01-11}, \kappa_{21}^{11-01}$ 为互耦合系数; δ_1, δ_2 分别为光栅 I 和光栅 II 的模式间的失谐量, 其定义如下:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{1}{2} \left(\beta_{01} - \beta_{11} - \frac{2\pi}{A_1} \right), \\ \delta_2 &= \frac{1}{2} \left(\beta_{01} - \beta_{11} - \frac{2\pi}{A_2} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

其中 β_{01}, β_{11} 分别为 LP_{01} 和 LP_{11} 模的传播常数.

光纤长周期叠栅的透射率计算式为

$$T(\text{dB}) = 10 \lg \left| \frac{A_1(L)}{A_1(0)} \right|^2. \quad (4)$$

这里采用数值法对 (2) 式进行求解. 设光栅的长度为 $0-L$, 取光栅的边界条件 $A_1(0) = 1, A_2(0) = 0$, 将其代入耦合方程, 可求得 $A_1(z)$.

3 数值仿真

本文所采用的是由烽火公司提供的两模阶跃光纤 (FMF-SI-1550A), 纤芯和包层直径分别为 13.6, 125 μm , 在 1550 nm 处纤芯和包层的有效折射率分别为 1.4634, 1.4571. 利用有限元法计算出 LP_{01} 和 LP_{11} 的色散曲线如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 随着波长的增加, 其有效折射率逐渐减小.

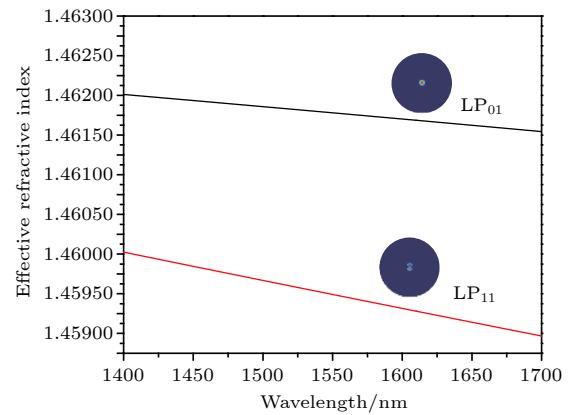


图 2 少模光纤的模式色散特性
Fig. 2. Effective refractive indices against wavelength of two modes.

在满足相位匹配条件时, 即 $\delta_i = 0$, 可以求得谐振波长为

$$\lambda_i = \frac{1}{k} (\beta_{01} - \beta_{11}) A_i. \quad (5)$$

由 $\beta_{01} = kn_{\text{eff}}^{01}, \beta_{11} = kn_{\text{eff}}^{11}$, 得出

$$\lambda_i = (n_{\text{eff}}^{01} - n_{\text{eff}}^{11}) A_i, \quad (6)$$

式中 n_{eff}^{01} , n_{eff}^{11} 分别为 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模的有效折射率. 从 (6) 式知, 谐振波长由 LP₀₁ 和 LP₁₁ 的有效折射率差和光栅的周期共同决定. 根据两种模式的色散曲线和 (6) 式计算出了 LP₀₁ 向 LP₁₁ 模式转换的周期与谐振波长的关系 (图 3). 从图 3 可知, 随着光栅周期的增加, 谐振波长向短波方向漂移.

令两个子光栅的周期分别为 $\Lambda_1 = 672 \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 684 \mu\text{m}$, 互耦合系数 $\kappa_1 = \kappa_2 = 130 \text{m}^{-1}$, 把单个光栅的传输光谱与叠栅的传输光谱对比 (图 4), 两个单栅的谐振波长分别为 1587 和 1505 nm, 在谐振波长处的转换效率为 27 dB, 叠栅的谐振波长为 1544 nm, 在谐振波长处的转换效率为 21 dB, 单个光栅和叠栅实现的模式转换器的 10 dB 带宽分别约为 38, 82 nm, 叠栅的带宽约为单栅的 2 倍.

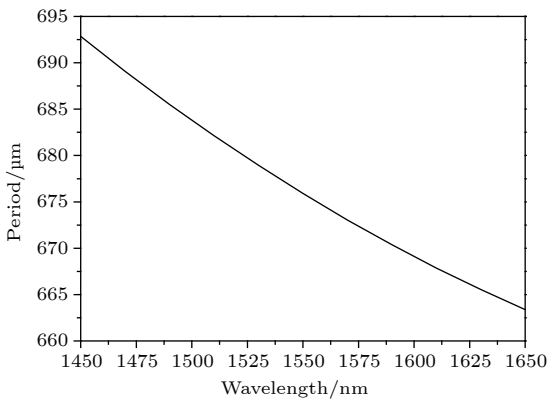


图 3 少模光纤光栅周期与谐振波长的关系
Fig. 3. Dependence of grating period and resonant wavelength in few mode fiber.

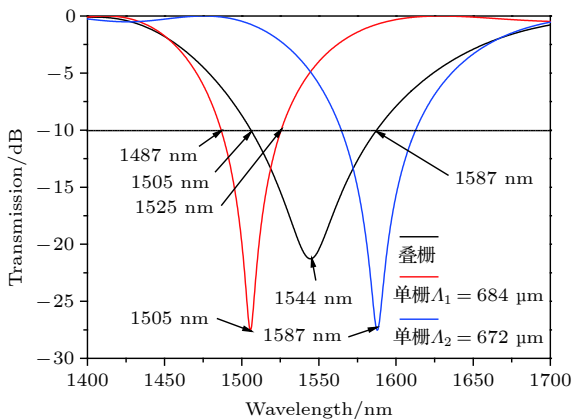


图 4 单栅与叠栅光谱对比
Fig. 4. Spectrum contrast between LPFG and SLPFG.

4 叠栅参数对模式转换器的影响

叠栅的传输光谱可以反映出模式转换器的带

宽和转换效率的变化情况, 而叠栅的周期间隔、长度及耦合系数对传输光谱有着一定的影响, 本文主要仿真分析以上参数对模式转换器的影响.

4.1 周期间隔对模式转换器的影响

由 (5) 式知, 叠栅传输光谱中两个损耗峰的位置由光栅 I 和光栅 II 的周期间隔决定, 令两个子光栅的长度 $l_1 = 35\Lambda_1$, $l_2 = 35\Lambda_2$, 耦合系数 $\kappa_1 = \kappa_2 = 130 \text{m}^{-1}$, 固定光栅 I 的周期 $\Lambda_1 = 672 \mu\text{m}$, 调节光栅 II 的周期 Λ_2 分别为 690, 688, 686, 684 μm , 如图 5 所示. 从图 5 中可以看出, 叠栅中两个子光栅的损耗峰间的带隙将随着两个子光栅的周期间隔而发生变化, 随着 Λ_2 变小, 两个损耗峰逐渐靠拢最后形成一个单峰; 当两个子光栅的间隔为 12 μm 时, 形成一个单峰. 其转换效率先减小后增加. 由 (1) 式知, 光栅 II 的周期减小引起了纤芯折射率的改变, 从而引起调制深度的变化, 进而使模式转换器的转换效率发生了变化.

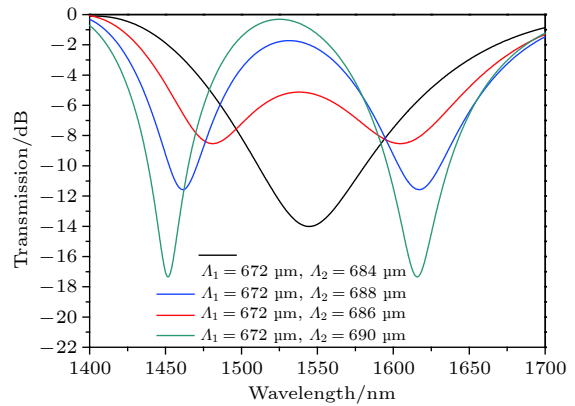


图 5 不同周期的叠栅仿真
Fig. 5. Simulated SLPFG for different periods.

4.2 光栅长度对模式转换器的影响

令两个子光栅的周期分别为 $\Lambda_1 = 672 \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 684 \mu\text{m}$, 耦合系数 $\kappa_1 = \kappa_2 = 130 \text{m}^{-1}$, 改变两个子光栅的长度 l_1 , l_2 为 20—40 个周期, 光谱如图 6 所示. 从图 6 中可以看出, 随着光栅长度的增加, 转换器的转换效率先增大, 达到最大 19 dB, 后开始减小, 带宽从大逐渐减小然后又增大. 这种现象可以用模式间的互耦合来解释, 光栅长度增加到一定值时, LP₀₁ 能量全部被耦合到了 LP₁₁ 模, 达到了满耦合; 长度继续增加, LP₁₁ 能量又被耦合到 LP₀₁, 产生了过耦合.

4.3 光栅耦合系数对模式转换器的影响

令两个子光栅的周期分别为 $\Lambda_1 = 672 \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 684 \mu\text{m}$, 长度 $l_1 = 35\Lambda_1$, $l_2 = 35\Lambda_2$, 耦合系数 $\kappa_1 = \kappa_2$, 分别为 110, 120, 130, 140, 150 m^{-1} , 相应的结果如图 7 所示. 从图 7 中可以看出, 随着耦合系数的增加, 转换器的转换效率先增加后减小. 这是因为耦合系数可以改变长周期叠栅模式间耦合的强度, 耦合系数的增加使耦合强度先增大, 达到满耦合后, 模式间的耦合表现为过耦合, 所以耦合强度变小, 其对转换器的影响与光栅长度类似.

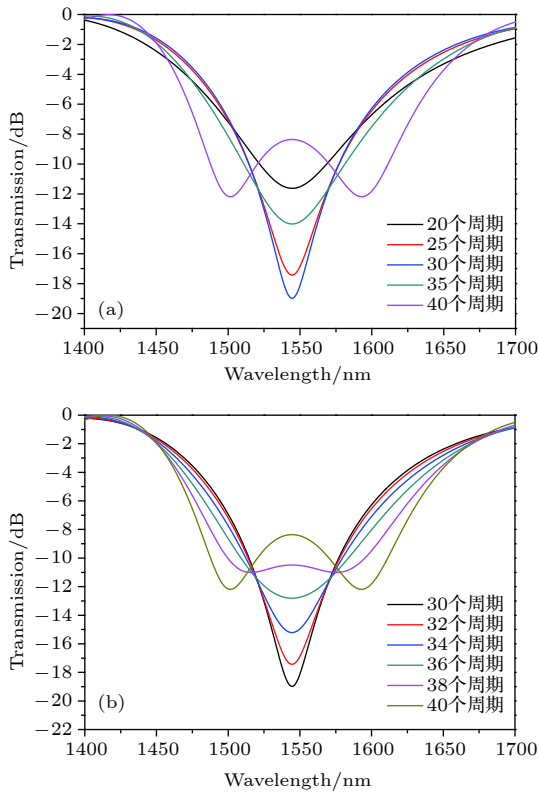


图 6 不同光栅长度的叠栅仿真

Fig. 6. Simulated SLPFG for different grating lengths.

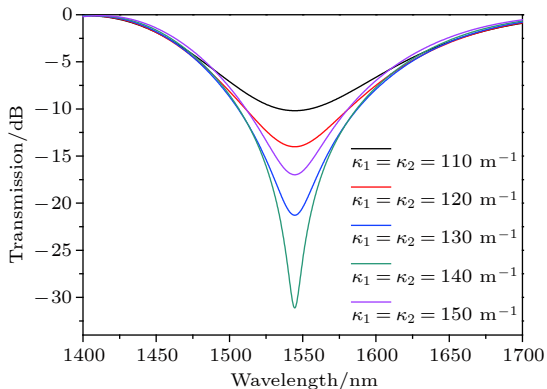


图 7 不同耦合系数的叠栅仿真

Fig. 7. Simulated SLPFG for different coupling coefficient.

5 模式转换器的实验研究

5.1 模式转换器的制备

在本实验中利用 CO_2 激光器在少模光纤上刻制重叠光栅而制备模式转换器, 其制备系统如图 8 所示. 将少模光纤 (烽火两模阶跃型光纤 FMF-SI-1550A) 两端熔接上单模光纤 (康宁 SMF-28), 去除涂覆层水平放置于光纤旋转平台. 所使用的光源是波长范围为 470—2400 nm, 总输出功率大于 500 mW 的超连续谱光源 (SC-5 武汉安扬激光); 利用观测波长范围为 600—1700 nm, 分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪 (AQ6370C, YOKOGAWA) 实时监测刻栅过程中光谱的变化; 利用 CO_2 激光器 (CO_2 -H10C, Han's Laser, 深圳大族) 刻制叠栅.

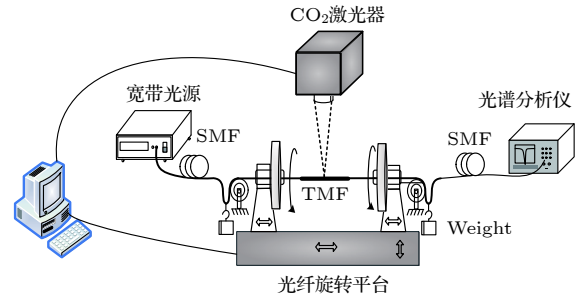


图 8 少模光纤叠栅的实验制备系统

Fig. 8. Experiment setup for TMF-SLPFG.

5.2 实验结果与讨论

依据数值仿真分析, 先刻制 $\Lambda_1 = 673 \mu\text{m}$, 长度 $l_1 = 35\Lambda_1$ 的光栅 I, 然后利用光纤旋转平台将光纤旋转 180° , 在同一位置刻制 $\Lambda_2 = 688 \mu\text{m}$, 长度 $l_2 = 35\Lambda_2$ 光栅 II 形成叠栅. 激光器的参数设置如下: 平均功率为 5 W, 脉冲频率为 10 kHz, 刻制光栅 I 的打标次数为 30 次, 光栅 II 的打标次数为 10 次. 实际所使用的光栅周期及间隔稍大. 为了确保只有 LP_{01} 模被注射到模式转换器并在输出端被检测到, 在两模光纤的两端加上消模器^[16]. 利用光谱分析仪得到单栅和叠栅的光谱如图 9 所示. 单栅的谐振波长分别为 1595, 1485 nm, 其 3 dB 带宽分别为 121, 137 nm, 10 dB 带宽分别为 57, 67 nm; 叠栅的 3 dB 带宽为 232 nm, 10 dB 带宽为 153 nm, 叠栅实现的转换器的带宽约为单栅实现的转换器带宽的 2 倍. 转换效率最高达 99%. 从图 4 和图 9 可以发现, 实验所得到的叠栅的光谱向长波长漂

移,这是因为第二个光栅的写入,激光束的照射引起栅区光纤折射率改变,模式的有效折射率也会随着改变,同时折射率调制变大,导致模式耦合效率发生变化,从而导致了波长漂移.

为了证实所提出的模式转换器能够实现 LP₀₁ 向 LP₁₁ 模式的转换,采用图 10 所示的实验

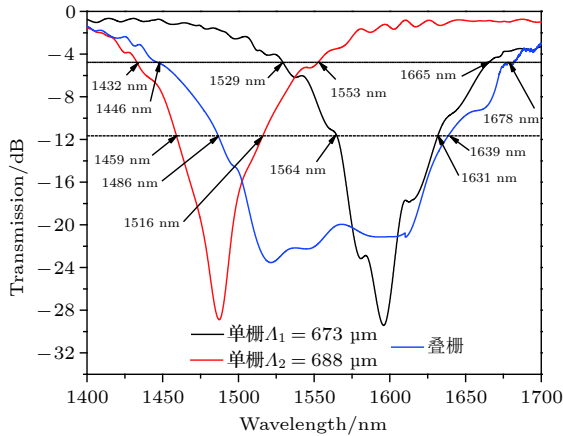


图 9 单栅和叠栅的实验光谱图

Fig. 9. Experimental spectrum of LPFG and SLPFG.

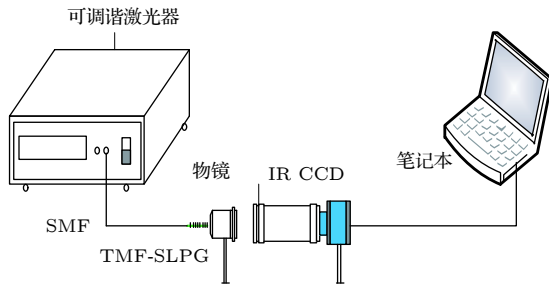


图 10 模场观测装置

Fig. 10. Schematic of mode profile observation.

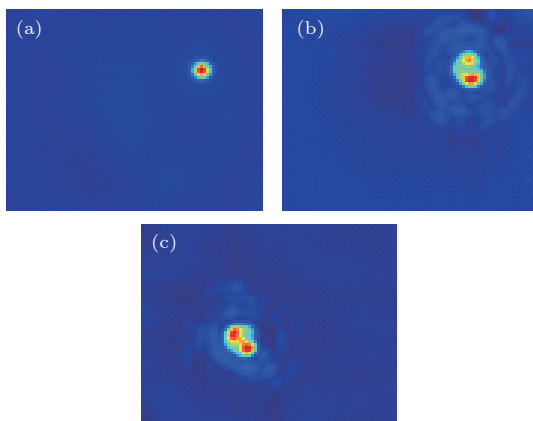


图 11 不同波长处的模场图 (a) 1400 nm; (b)1486 nm; (c) 1550 nm

Fig. 11. Images of mode profiles located at different wavelength: (a) 1400 nm; (b) 1486 nm; (c) 1550 nm.

装置,通过可调谐激光器 (Santec Corporation 1260—1650 nm), 调节输出波长分别为 1400, 1486 和 1550 nm 的 IR CCD (Cinogy 1400—1600 nm), 来测试模式转换器输出的模场 (图 11), 发现光场能量由 LP₀₁ 模耦合到了 LP₁₁ 模, 实现了模式的转换.

6 结 论

本文提出了一种在少模光纤中利用长周期光纤叠栅实现宽带宽的全光纤模式转换器. 利用耦合模理论建立了叠栅的理论模型, 通过仿真分析两个子光栅的周期间隔、光栅长度、耦合系数对模式转换器性能的影响, 得出两个光栅间隔为 12 μm , 光栅长度等于 35 个光栅周期, 耦合系数为 130 m^{-1} 时, 转换器的带宽和转换效率最优. 利用 CO₂ 激光器在少模光纤中制备了叠栅以实现模式转换, 实验结果表明, 利用叠栅实现的模式转换器转换效率最高达 99% 以上, 3 dB 带宽约为 232 nm, 10 dB 带宽约为 153 nm. 研究结果显示, 实验所得到的转换器效果与理论分析较好地符合. 此外, 所提出的叠栅结构也可以推广到基模向其他高阶纤芯模式的转换中, 通过合理设计两个子光栅的周期, 还可以实现在任意波长的宽带宽的带阻滤波.

参考文献

- [1] Goebel B, Foschini G J, Kramer G, Essiambre R, Winzer P J, Essiambre R 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 662
- [2] Fernandes G M, Muga N J, Pinto A N 2017 *Opt. Express* **25** 3899
- [3] Zhao Y H, Liu Y Q, Zhang L, Zhang C Y, Wen J X, Wang T Y 2016 *Opt. Express* **24** 6186
- [4] Salsi M, Koebele C, Sperti D, Tran P, Mardoyan H, Brindel P, Bigo S, Boutin A, Verluise F, Sillard P, Astruc M, Provost L, Charlet G 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 618
- [5] Von H J, Ryf R, Winzer P 2013 *Opt. Express* **21** 18097
- [6] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, Bolle C, Sierra A, Mumtaz S, Esmaelpour M, Burrows C, Essiambre R J, Winzer P J, Peckham D W, McCurdy A H, Lingle R 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 521
- [7] Montero-Orille C, Moreno V, Prieto-Blanco X, Mateo E F, Ip E, Crespo J, Linares J 2013 *Appl. Optics* **52** 2332
- [8] Dong J, Chiang K S, Jin W 2015 *Opt. Lett.* **40** 3125
- [9] Dong J, Chiang K S, Jin W 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 4580
- [10] Sai X, Li Y, Yang C, Li W, Qiu J, Hong X, Zuo Y, Guo H, Tong W, Wu J 2017 *Opt. Lett.* **42** 4355
- [11] Leon-Saval S G, Fontaine N K, Salazar-Gil J R, Ercan B, Ryf R, Bland-Hawthorn J 2014 *Opt. Express* **22** 1036
- [12] Ali M M, Jung Y, Lim K S, Islam M R, Alam S U,

- Richardson D J, Ahmad H 2015 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27** 1713
- [13] Savin S, Digonnet M J, Kino J S, Shaw H J 2000 *Opt. Lett.* **25** 710
- [14] Ramachandran S, Wang Z Y, Yan M 2002 *Opt. Lett.* **27** 698
- [15] Liao C R, Wang Y, Wang D N, Jin L 2010 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **22** 425
- [16] Dong J L, Chiang K S 2015 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27** 1006
- [17] Wang B, Zhang W G, Bai Z Y, Wang L, Zhang L Y, Zhou Q, Chen L, Yan T Y 2015 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27** 145
- [18] Zhao Y H, Liu Y Q, Zhang C Y, Zhang L, Zheng G J, Mou C B, Wen J X, Wang T Y 2017 *Opt. Lett.* **42** 4708
- [19] Garg R, Thyagarajan K 2013 *Opt. Fiber Technol.* **19** 148
- [20] Jiang P 2016 *Ph.D. Dissertation* (Qinhuangdao: Yanshan University) (in Chinese) [江鹏 2016 博士学位论文(秦皇岛:燕山大学)]

Superimposed long period gratings based mode converter in few-mode fiber*

Xue Yan-Ru¹⁾²⁾ Tian Peng-Fei¹⁾ Jin Wa¹⁾ Zhao Neng¹⁾

Jin Yun¹⁾³⁾ Bi Wei-Hong^{1)†}

1) (*School of Information Science and Engineering, the Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

2) (*College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066004, China*)

3) (*Department of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Construction Material Vocational and Technical College, Qinhuangdao 066004, China*)

(Received 8 September 2018; revised manuscript received 8 November 2018)

Abstract

Mode-division multiplexing (MDM), as one of the promising techniques for overcoming current limitation of transmission capacity in single-mode fibers (SMFs), has attracted considerable attention. A key component in the MDM system is a mode converter, which makes conversion between the fundamental mode and the higher-order mode. Many mode converters have been demonstrated, such as spatial light modulators, phase plates, silicon-based asymmetrical directional couplers, fiber-based photonic lantern, and long period fiber grating (LPFG). Compared with other methods, mode converter used LPFG is a very feasible technique, which has the advantages of small size, low loss, low backward noise, high coupling efficiency and easy fabrication. However, the limitation of the mode converter is relatively narrow bandwidth. In this paper, a novel broadband all-fiber mode converter is proposed, in which two long period fiber gratings (LPFGs) with different periods are fabricated in the same spatial domain of few-mode fiber to achieve coupling from LP_{01} to LP_{11} , thus forming superimposed long period fiber gratings (SLPFGs). The influences of grating parameters, such as the interval between two periods, the length of grating and the coupling coefficient on the mode converter, are analyzed by numerical simulation. It is found that the gap between the two resonant wavelengths becomes smaller with the periodic interval decreasing, which can form one rejection band when the gap is small enough, thus a broadband mode converter can be realized. The corresponding bandwidth at a conversion efficiency of 10 dB is about twice that of traditional LPFG. Moreover, with the increase of grating length, the conversion efficiency first increases and then decreases, because coupling efficiency experiences deficient coupling, full coupling and over coupling. The effect of coupling coefficient on converter is similar to that of grating length. According to the numerical results, grating I is fabricated with $\Lambda_1 = 673 \mu\text{m}$, 35-period. After that, the platform is rotated 180° and grating II is fabricated with $\Lambda_2 = 688 \mu\text{m}$, 35-period by CO_2 laser in tow mode fiber (TMF stepped-index fiber). The bandwidths of both LPFGs at a conversion efficiency of 10 dB are about 57 nm and 67 nm respectively, while the bandwidth of SLPFG is about 153 nm. The experimental results are in pretty good agreement with the theoretical analyses. In addition, the proposed superimposed structure can also be extended to the conversion of fundamental mode into other high-order core modes. By designing the period of two sub-gratings reasonably, a wide band rejection filter with arbitrary wavelength can be realized. Compared with the traditional mode converter, the converter has the advantages of broad bandwidth, high conversion efficiency and small size, which can be widely used in the mode division multiplexing system and optical communication.

Keywords: superimposed long period fiber gratings, few mode fiber, mode converter, coupling coefficient

PACS: 42.79.Dj, 42.79.Sz, 42.81.Wg

DOI: 10.7498/aps.68.20181674

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61475133, 61575170, 61605168), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2016203392), the Key Basic Research Program of Hebei Province, China (Grant No. 16961701D), College and University Science and Technology Research Project of Hebei Province, China (Grant No. QN2016078), and the Intramural Doctoral Foundation of Yanshan University, China (Grant No. B1011).

† Corresponding author. E-mail: whbi@ysu.edu.cn