

基于定向耦合器的双芯模式转换器

于雪莲^{1,2*}, 佐珊珊², 王鹏飞¹, 沈涛²¹哈尔滨工程大学物理与光电工程学院纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;²哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院黑龙江省量子调控重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 提出了一种基于定向耦合器的双芯模式转换器, 实现了基阶(LP₀₁模式)向高阶(LP₁₁模式)转换。利用有限元法和光束传播法建立了模式转换器理论分析模型, 探究光纤参数对模式转换器转换性能的影响。数值模拟结果表明, 当该模式转换器消光比大于 20 dB 时, 带宽可达到 320 nm, 且其消光比大于 10 dB, 带宽达到 400 nm 时的转换率达 99.7%。与传统模式转换器相比, 该模式转换器结构简单, 并且具有转换率高和宽带宽的优点, 进而适合应用在光通信系统中。

关键词 光学器件; 光纤光学; 模式转换器; 转换率; 宽带宽

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1323004

Dual-Core Mode Converter Based on Directional Couplers

Yu Xuelian^{1,2*}, Zuo Shanshan², Wang Pengfei¹, Shen Tao²

¹Key Laboratory of In-Fiber Integrated Optics of Ministry of Education of China, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

²Heilongjiang Province Key Laboratory of Quantum Control, School of Measurement and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China

Abstract In this paper, a dual-core mode converter based on directional couplers is presented, which can achieve the conversion from the fundamental-order mode (LP₀₁ mode) to the high-order mode (LP₁₁ mode). The theoretical analysis model of the dual-core mode converter is built by the finite element and beam propagation methods to explore the influence of optical fiber parameters on the conversion performance. Numerical simulations reveal that the bandwidth of this mode converter can reach 320 nm when the extinction ratio is greater than 20 dB, and its conversion rate is 99.7% when the bandwidth reaches 400 nm, and the extinction ratio is greater than 10 dB. Compared with the traditional mode converter, the proposed converter features a simple structure, a high conversion rate, and wide bandwidth. Therefore, it is suitable for applications in optical communication systems.

Key words optical devices; fiber optics; mode converter; conversion rate; wide bandwidth

1 引言

单模光纤的容量已经接近香农极限。为进一步提高光纤的容量, 近年来模分复用技术受到了广泛的关注。在模分复用系统中, 信号之间相互正交的方式能够大幅减少模式之间的串扰。模分复用系统的核心器件为模式转换器, 模式转换器能够在复用/解复用时将基阶模式转换为高阶模式, 或者将高阶模式转换为基阶模式^[1-2]。模式转换器的主要实现方法可以分为三类, 即空间光学元件法、硅光子集成法和全光纤法。空

间光学元件法可实现任意模式的转换且具有高精度转换的优点, 但需要精密的光学对准, 集成度较低, 无法实现全光纤化, 进而限制了其应用范围。此外, 基于空间光学元件法的模式转换器具有较高的插入损耗和不易集成的缺点^[3]。硅光子集成法因其小尺寸、低损耗、低成本和高集成度等优点被视为与光纤传输链路对接的极具潜力的方案之一^[4-5], 虽然研究取得了一定的成果, 但是其仍存在封装成本过高、偏差容限较低和耦合损耗较高等问题。基于全光纤法的模式转换器与基于空间光学元件法的模式转换器相比, 插入损耗较小。

收稿日期: 2022-03-15; 修回日期: 2022-04-20; 录用日期: 2022-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(61935006)、黑龙江省自然科学基金资助项目(LH2020F028)、中央高校基本科研业务费资助项目(3072020CFJ2507)、哈尔滨工程大学 111 项目(B13015)

通信作者: *yuxuelian@hrbust.edu.cn

基于全光纤法的模式转换器与基于硅光子集成法的模式转换器相比,不需要过多考虑封装工艺和偏差容限范围等问题。针对目前市场对模式转换器的需求,基于全光纤法的模式转换器得到了人们的关注,其中最常见的是长周期光纤光栅模式转换器^[6-7]。长周期光纤光栅模式转换器的转换率达到 99% 以上。然而,它面临带宽狭窄的问题。2019 年,Guo 等^[8]报道了一种基于双谐振双模长周期光纤光栅(LPFG)的宽带轨道角动量(OAM)模式发生器,当消光比为 15 dB 时,带宽达 118.2 nm。研究表明,通过优化啁啾长周期光纤光栅的参数:当消光比达到 10 dB 以上时,可以获得 170 nm 的带宽;当消光比达到 20 dB 以上时,可以获得 145 nm 的带宽^[9]。Tsekrekos 等^[10]提出了一种基于多模干涉的宽带全光纤模式转换器,基于该转换器完成了 LP₀₁ 模式到 LP₀₂ 模式的转换,当消光比达到 20 dB 以上时,可以获得 150 nm 的带宽。然而,实现全光纤模式转换器的高转换率与宽带宽的目标难以同时实现。锥形光纤模式转换器可以通过绝热改变波导的横截面(圆形波导的半径)来激发高阶模,利用纵向非均匀模式耦合原理完成特定模式之间的转换,同时具有对偏振不敏感和宽频带的优点^[11-13]。Mellah 等^[12]使用飞秒激光直接将模式转换器嵌入硼硅酸盐玻璃的主体中,目标模式在 C 波段中可以实现 80% 以上的转换率。Shen 等^[13]设计的锥形模式转换器可将 LP₀₁ 模式转换为 LP₀₂ 模式,当消光比为 20 dB 时,带宽可达 200 nm,具体范围为 1465~1665 nm,插入损耗小于 2.4 dB,目标模式转换率为 67%。此外,他们发现锥形模式转换器需要对结构进行优化才能让性能有所提高。基于上述分析,本文设计了基于定向耦合器的双芯模式转换器,该模式转换器可以实现 LP₀₁ 模到 LP₁₁ 模的模式转换,可以实现较高的模式转换率与宽带宽,适用于光通信系统。本文分析了各结构参量对模式转换器性能的影响,利用结构 S 形弯波导可以更改光的传输方向,多角度的实现更易于应用至集成光学中,还能降低模式损耗,不易变形的模式更适用于复杂的环境。

2 模式转换器结构与参量设计

2.1 模式转换器结构

根据横向耦合模理论,距离很近的两根光纤纤芯可以组成一个耦合系统。当距离接近波长量级时,在倏逝波的作用下,模式之间发生周期性能量震荡,进而出现能量交换现象。当两波导传输光强变化最大或者两波导中相速度相等时,即相速度一致满足匹配条件,模式之间能量交换达到最大程度时,一个波导中的能量几乎会完全转移到另一个波导中。本文提出的双芯模式转换器纤芯的截面图和俯视图分别如图 1 和图 2 所示。模式转换器由三部分组成,即单模光纤 M、双模光纤 N、S 形弯曲光纤。单模光纤 M 和双模光纤 N 紧密贴合构成模式转换器的核心部分——耦合区(BC 段),用于完成 LP₀₁ 模式与 LP₁₁ 模式间的能量耦合。AB 段和 CD 段中的 S 弯曲光纤为非耦合区。该结构

包含 4 个端口,端口 1 为输入端口,端口 2 和端口 3 为输出端口,端口 3 也称为耦合端口,模式转换后的大部分能量会由端口 3 输出,端口 4 为隔离端口。在理想情况下,端口 1 的光信号会传到端口 2 和端口 3 处,端口 4 理论上没有能量输出,但在实际情况中端口 4 可能会有少部分能量输出,在此端口处可以观察是否有反射信号的能量。AB 段、BC 段和 CD 段的纤芯和包层折射率分别为 n_{core} 和 $n_{cladding}$,AB 段、BC 段和 CD 段的长度分别为 L_1 、 L_2 和 L_3 ,单模光纤 M 的半径为 R_0 ,与单模光纤 M 贴合的端口 1 与端口 2 处的 S 形弯曲光纤的半径为 R_0 ,双模光纤 N 的半径为 R_1 ,与双模光纤 N 贴合的端口 3 与端口 4 处的 S 形弯曲光纤半径为 R_1 ,包层半径为 R ,各个结构参数的具体数值如表 1 所示。

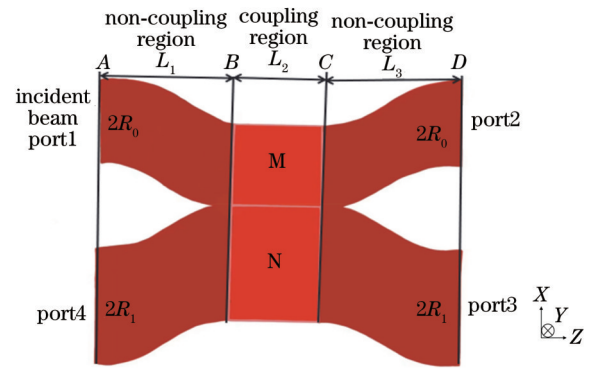


图 1 双芯模式转换器截面图

Fig. 1 Cross section of dual-core mode converter

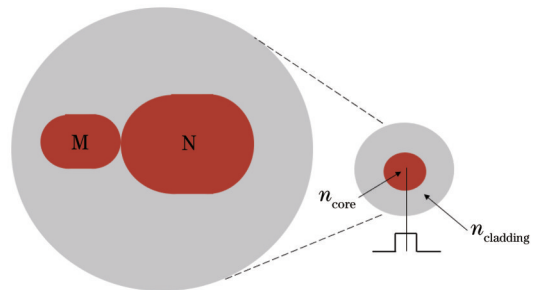


图 2 双芯模式转换器俯视图

Fig. 2 Top view of dual-core mode converter

表 1 双芯模式转换器的结构参数

Table 1 Structural parameters of dual-core mode converter

Parameter	$R / \mu\text{m}$	$R_0 / \mu\text{m}$	$R_1 / \mu\text{m}$	$L_1 / \mu\text{m}$	$L_2 / \mu\text{m}$	$L_3 / \mu\text{m}$	n_{core}	$n_{cladding}$
Value	62.50	3.00	4.95	1000	520	1000	1.4800	1.4702

2.2 理论模型

当两个距离很近的光纤处于平行的位置关系时,耦合方程^[14]可以表示为

$$\frac{da_1}{dz} = -jk_{12}a_2 \exp[-j(\beta_2 - \beta_1)z], \quad (1)$$

$$\frac{da_2}{dz} = -jk_{21}a_1 \exp[j(\beta_2 - \beta_1)z], \quad (2)$$

式中: β_1 和 β_2 为传播常数; a_1 和 a_2 为单模光纤 M 和

双模光纤 N 中传输的模式; k_{21} 为模式 2 到模式 1 的耦合系数; k_{12} 为模式 1 到模式 2 的耦合系数; z 为光传输的距离。两个波导的传播常数的差值可表示为

$$\delta = \frac{\beta_1 - \beta_2}{2}. \quad (3)$$

k_{12} 与 k_{21} 为互耦合系数, 体现出波导间的能量转换。令 $k_{21} = k_{12} = k$, 进一步整理可得

$$a_1(z) = \left\{ \left[\cos(qz) + j \frac{\delta}{q} \sin(qz) \right] a_1(0) - j \frac{k}{q} \sin(qz) a_2(0) \right\} \exp(-j\delta z), \quad (4)$$

$$a_2(z) = \left\{ \left[\cos(qz) - j \frac{\delta}{q} \sin(qz) \right] a_2(0) - j \frac{k}{q} \sin(qz) a_1(0) \right\} \exp(j\delta z), \quad (5)$$

式中: $q = \sqrt{k^2 + \delta^2}$ 。

在两平行波导中, 光能量从端口 1 入射到单模光纤 M 中, 并以消逝波的形式进入双模光纤 N 中。单模光纤 M 和双模光纤 N 沿着 z 方向的光功率 $P_1(z)$ 和 $P_2(z)$ 的表达式为

$$P_1(z) = \frac{|a_1(z)|^2}{|a_1(0)|^2} = 1 - M \sin^2(qz), \quad (6)$$

$$P_2(z) = \frac{|a_2(z)|^2}{|a_2(0)|^2} = M \sin^2(qz), \quad (7)$$

式中: M 为耦合效率, 其表达式为

$$M = \left(\frac{k}{q} \right)^2 = \frac{1}{1 + (\delta/k)^2}, \quad (8)$$

在式(8)中, 当 $\delta = 0$ 时, 耦合效率最高, 此时 $M = 1$, $k = q$, 两个模式的传播常数相等[由式(3)可知]。此时, 光纤 1 中的能量几乎全部耦合进光纤 2 中。实际上, 在波导中能量几乎不能百分之百完全耦合, 能量在两种模式之间来回震荡, 当 $qz = kz = \pi/2$ 时, 能量交换值达到最高, 给定 k 值可以求出相应的耦合长度。

2.3 模式转换器参数设计

利用微扰理论求解耦合系数, 模式转换之间的耦合系数与模式在区域中的电场积分有关, 其表达式为

$$k = \frac{\omega \epsilon_0 (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2) \iint_{S_2} E_1^* \cdot E_2 dx dy}{2 \iint_{S_1} E_1^* \cdot H_1 dx dy}, \quad (9)$$

式中: ω 为光波的频率; ϵ_0 为真空介电常数; S_2 为光纤 M 所在区域; S_1 为光纤 N 所在区域; E_1^* 为 LP_{11} 模式电场的共轭复数; E_2 为 LP_{01} 模式的电场; H_1 为 LP_{11} 模式的磁场。耦合系数与长度的关系为

$$L = \frac{\pi}{2k}. \quad (10)$$

由于获取耦合系数的计算量比较大, 故在实际中

需借助各种仿真软件进行计算, 如利用超模方程求解耦合系数^[15]。

2.4 S 形弯曲光纤的设计

为了进一步降低光纤的耦合损耗, 将双芯的 4 个端口设计为弯曲形状, 弯曲光纤一般分为 Z 形光纤和 S 形光纤。Z 形光纤不仅可以改变光的传输方向, 还可以增加折射率对比度, 但在应用中会限制其他角度的传输^[16]。以 S 形光纤作为端口可减少两根波导在非耦合区域的相互干扰, 耦合损耗较小。基于 S 形光纤以上优点, 选择 S 形弯曲波导为指数型结构, 其满足

$$x = \frac{\exp\left(-3 \times \frac{z}{L_i}\right) - 1}{\exp(-3) - 1}, \quad (11)$$

式中: $L_i (i=1, 2, 3)$ 表示第 i 节点处的长度, L_1 与 L_3 表示非耦合区的长度, L_2 表示耦合区的长度。该模式转换器能适应较为复杂的环境且集成度较高, 模式不容易变形, 有较强的拓展性。

3 数值模拟

通过数值仿真模拟对结构的模场光路传输进行监控。观察了光路传播、归一化能量的变化情况, 具体如图 3 所示。可以发现: 当 LP_{01} 模式能量经过 S 形弯曲光纤未耦合区域时, 几乎没有能量损失; 当 LP_{01} 模式能量经过耦合区域时, 有少许能量在纤芯外传输, 端口 1 处 LP_{01} 模式能量几乎全部转换为端口 3 处 LP_{11} 模式的能量, 端口 2 几乎没有能量输出, 端口 4 没有反射能量输出。

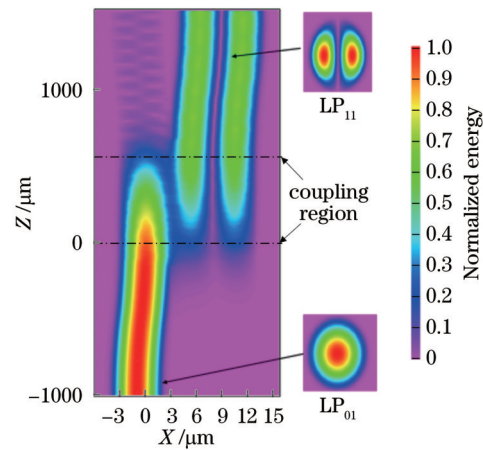


图 3 双芯模式转换器模场分布情况

Fig. 3 Mode field distribution of dual-core mode converter

双芯模式转换器的转换率如图 4 所示, 转换率为目标模式与入射模式的光能量比。 LP_{01} 模式的能量在传播过程中逐渐降低, 逐渐转化为 LP_{11} 模式的能量, 且转换率高达 99.7%。模式的耦合损耗如图 5 所示。随着纵轴长度的增加耦合损耗呈下降趋势, 耦合损耗可低至 0.003 dB。耦合损耗的降低意味着 LP_{01} 模式的能量大多数转为 LP_{11} 模式的能量, 能量不会有很大的损失。剩余少量能量消失的原因可能是传输过程中会

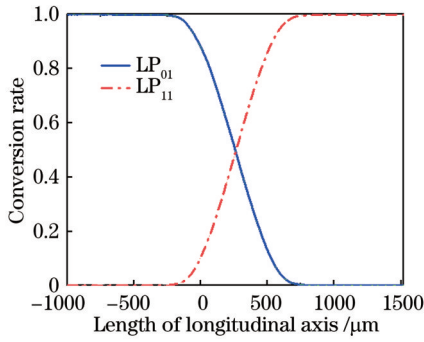


图 4 模式转换器转换率

Fig. 4 Conversion rate of mode converter

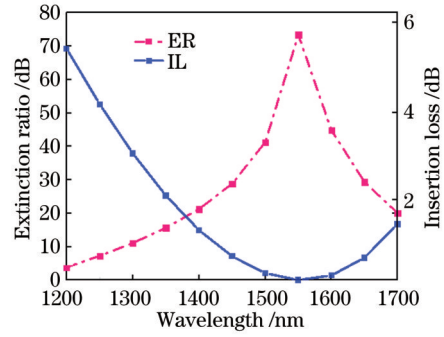


图 6 消光比和插入损耗随着波长变化

Fig. 6 Extinction ratio and insertion loss varying with wavelength

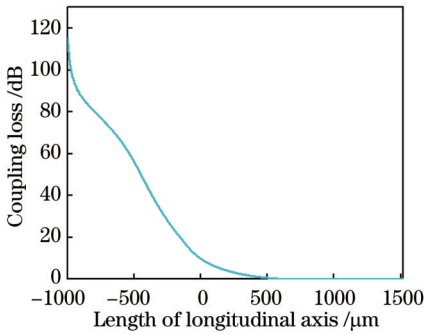


图 5 耦合损耗变化情况

Fig. 5 Change of coupling loss

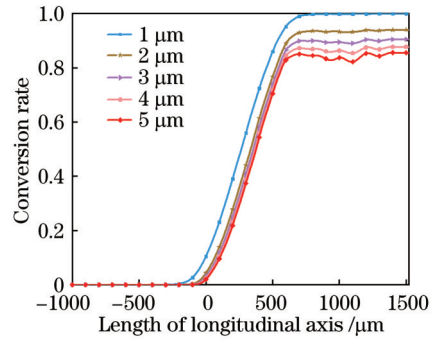


图 7 S 弯偏离程度对转换率的影响

Fig. 7 Influence of S-bend offset on conversion rate

有少数能量溢出。

模式转换器主要有消光比 (ER) 和插入损耗 (IL) 两个性能指标, 二者的定义^[13]分别为

$$M_{ER} = 10 \lg \left(\frac{P_{LP_{11}}}{\sum P_{LP_{mm}}} \right), \quad (12)$$

$$M_{IL} = 10 \lg \left(\frac{P_{LP_{01, in}}}{P_{LP_{11, output}}} \right), \quad (13)$$

式中: $P_{LP_{01, in}}$ 为输入端的能量; $P_{LP_{11, output}}$ 为目标模式输出端的能量; m 是贝塞尔函数的阶数, 作用是确定场量沿圆周方向的分布规律; n 是 m 阶贝塞尔函数的第 n 个根, 表示沿半径方向出现极值的个数。IL 与 ER 随工作波长的变化情况如图 6 所示。其中, 消光比在 1380~1700 nm 波长范围内大于 20 dB, 带宽为 320 nm, 消光比在 1300~1700 nm 波长范围内大于 10 dB, 带宽为 400 nm, 消光比的最大值和插入损耗的最低值均在 1550 nm 波长处, 故该模式转换器适用于光通信领域。插入损耗在 1550 nm 波长处低于 0.003 dB。

4 各参数对模式转换器的影响

在模式转换过程中, S 弯偏移程度是影响模式转换器性能的因素之一, 对其进行数值模拟分析, 仿真结果如图 7 所示。其中, 1~5 μm 分别代表 S 弯偏离中心轴的距离。可以看出, S 弯偏离中心轴的距离会对转换率有所影响, 当 S 弯偏离中心轴的距离为 1 μm 时, 模式转换器转换率最高, 可达 99.7%。

单模光纤 M 和双模光纤 N 的间隔可能影响模式转换率。利用光束传播法对双芯之间的距离进行仿真计算, 结果如图 8 所示, 展示了双芯间隔为 0~0.04 μm 时模式转换率的变化情况。当纤芯之间距离为 0 μm 时, 目标模式转换率能够达到最高, 随着纤芯间隔的增大, 转换率呈下降趋势。

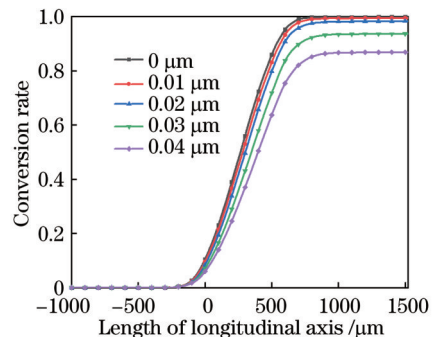


图 8 纤芯间隔对转换率的影响

Fig. 8 Effect of core spacing on conversion rate

其他条件不变, 只保留中间的耦合区域, 去除纤芯周围的四端口 S 弯波导, 此时的转换率曲线如图 9 所示。两种模式是可以完成转换的但没有转换完全, 很明显没有 S 弯波导的模式转换器, 目标模式 LP₁₁ 的转换率很低, 仅有 60% 左右。因此, 如果只利用中间耦合区域是可以完成转换的, 但是转换率很低, 说明 S 弯起到提高转换率、降低耦合损耗的作用。

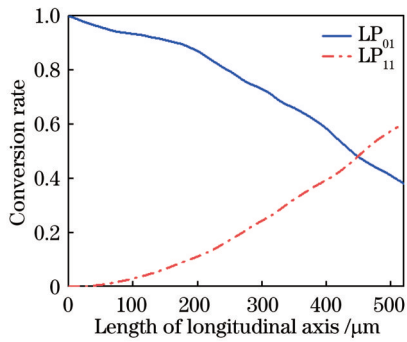


图 9 S 弯对转换率的影响

Fig. 9 Effect of S-bend on conversion rate

5 结 论

提出了一种基于定向耦合器的双芯模式转换器,该模式转换器可以实现 LP₀₁ 模到 LP₁₁ 模的转换。利用横向耦合理论设计模式转换器的耦合长度,并且通过光束传播法仿真其模场演变。为了降低损耗,在结构设计中引入 S 弯光纤,并对其偏移和纤芯间隔等参数进行研究。仿真结果表明:S 弯光纤中的模式不容易变形,可应用在较复杂的环境中,同时具有强拓展性、低耦合损耗等优势;适当减小纤芯间距有助于提高转换率。该模式转换器目标模式 LP₁₁ 模的转换率为 99.7%,1550 nm 处插入损耗最低为 0.003 dB,消光比大于 20 dB 时带宽达到 320 nm,消光比大于 10 dB 时带宽达到 400 nm,属于宽带宽模式转换器,适用于光通信领域。

参 考 文 献

- [1] Zhu B Y, Taunay T F, Yan M F, et al. 70-Gb/s multicore multimode fiber transmissions for optical data links[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(22): 1647-1649.
- [2] 钟文博,董昭达,张玲,等.基于空分复用光纤通信系统模式转换器的研究[J].激光与光电子学进展,2021,58(11):1106003.
Zhong W B, Dong Z D, Zhang L, et al. Mode converter of optical fiber communication system based on space division multiplexing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1106003.
- [3] Jung Y, Alam S U, Richardson D J. Compact higher-order mode converter based on all-fiber phase plate segment[C]//European Conference on Optical Communication (ECOC), September 27-October 1, 2015, Valencia, Spain. New York: IEEE Press, 2015.
- [4] 陈迁.基于梯形波导对硅基无源器件的研究及优化[D].南京:南京大学,2018:2-3.
Chen Q. Research and optimization of silicon-based photonic passive devices based on taper waveguide[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018: 2-3.
- [5] 周培基,李智勇,俞育德,等.硅基光子集成研究进展

[J]. 物理学报, 2014, 63(10): 104218.

Zhou P J, Li Z Y, Yu Y D, et al. Research progress of silicon-based photonic integration[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(10): 104218.

- [6] 薛艳茹,田朋飞,金娃,等.基于少模长周期光纤叠栅的模式转换器[J].物理学报,2019,68(5):054204.
Xue Y R, Tian P F, Jin W, et al. Superimposed long period gratings based mode converter in few-mode fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(5): 054204.
- [7] 陶洪,半月安,任文华,等.基于环形光纤的倾斜长周期光纤光栅的矢量模式转换[J].中国激光,2020,47(6):0606002.
Tao H, Mi Y A, Ren W H, et al. Vector mode conversion based on tilted long-period fiber grating written in ring fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0606002.
- [8] Guo Y C, Liu Y G, Wang Z, et al. More than 110-nm broadband mode converter based on dual-resonance coupling mechanism in long period fiber gratings[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 118: 8-12.
- [9] Feng M, Liu Y G, Wang Z, et al. Ultra-broadband mode converter using cascading chirped long-period fiber grating[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 7105610.
- [10] Tsekrekos C P, Syvridis D. All-fiber broadband LP₀₂ mode converter for future wavelength and mode division multiplexing systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(18): 1638-1641.
- [11] Mellah H, Zhang X P, Shen D Y. LP₀₁ to LP_{0m} mode converters using all-fiber two-stage tapers[J]. Optics Communications, 2015, 354: 148-153.
- [12] Mellah H, Bérubé J P, Vallée R, et al. Fabrication of a LP₀₁ to LP₀₂ mode converter embedded in bulk glass using femtosecond direct inscription[J]. Optics Communications, 2018, 410: 475-478.
- [13] Shen D Y, Ma C, Yuan H, et al. Broadband LP₀₁-LP₀₂ mode converter for O-, E-, S-, C-, L-, and U-band[J]. Applied Optics, 2019, 58(4): 1185-1192.
- [14] 孙波.模式耦合理论在光纤传感器中的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016:18-23.
Sun B. Application research of mode coupling theory of optical fiber sensors[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016: 18-23.
- [15] 孙春雷.片上可重构模式复用关键器件及系统的研究[D].武汉:华中科技大学,2019:29-32.
Sun C L. Research on the key on-chip reconfigurable mode-division multiplexing devices and system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 29-32.
- [16] 高峰,秦莉,陈泳屹,等.弯曲波导研究进展及其应用[J].中国光学,2017,10(2):176-193.
Gao F, Qin L, Chen Y Y, et al. Research progress of bent waveguide and its applications[J]. Chinese Optics, 2017, 10(2): 176-193.