

金属修饰的微结构光纤偏振分束器

严世博, 姜淑琴, 赵彤彤, 张俊楠

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 提出了一种金属修饰的微结构光纤偏振分束器, 并且利用全矢量有限元法仿真分析了该偏振分束器的长度与其结构参数的关系, 进而得出了该偏振分束器长度随孔间距、占空比变化的一般规律。研究表明: 当其他结构参数一定时, 该偏振分束器长度会随着孔间距的减小而减短; 占空比减小, 偏振分束器长度也会随之减短。最终综合考虑其性能与金属材料带来的损耗的影响, 设计出一种结构简单的微结构光纤偏振分束器。该偏振分束器长度为 3.523 mm, 在其工作波长 1.55 μm 处消光比高达 74.9 dB, 消光比高于 20 dB 的波长范围为 1.53~1.57 μm 之间的 40 nm 范围, 覆盖了整个光通信的 C 波段范围。并且该偏振分束器有着较好的冗余特性, 在偏振分束器长度存在 $\pm 5\%$ 的误差时, 仍能保持较好的性能。

关键词: 微结构光纤; 金属; 偏振分束器

中图分类号: TN913.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0522001

Polarization splitter based on metal-decorated microstructure fiber

Yan Shibo, Lou Shuqin, Zhao Tongtong, Zhang Junnan

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A polarization splitter based on metal-decorated microstructure fiber was proposed. The relationship between splitter length and structure parameters was analyzed by using full vectorial finite element method. The variation rules of splitter length with hole pitch and duty ratio for the polarization splitter were obtained. Numerical results shows that the length of the polarization splitter decreases with the decrease of hole pitch and the ratio of hole diameter to hole pitch. Considering both the properties and the transmission loss caused by metal, a simple-structure polarization splitter based on metal-decorated microstructure fiber was optimized. The length of the polarization splitter is as short as 3.523 mm and the extinction ratio reaches up to 74.9 dB at the wavelength of 1.55 μm . The bandwidth is 40 nm from 1.53 μm to 1.57 μm where the extinction ratios are more than 20 dB covering the C band of optical communication. At the same time, when the length of polarization splitter exists $\pm 5\%$ error, it can also keep good performance.

Key words: microstructure fiber; metal; polarization splitter

收稿日期: 2016-09-05; 修订日期: 2016-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(61475016)

作者简介: 严世博(1992-), 男, 博士生, 主要从事特种光纤器件方面的研究。Email: 15111056@bjtu.edu.cn

通讯作者: 姜淑琴(1965-), 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信、全光网络关键技术、特种光纤及器件、光纤传感等方面的研究。

Email: shqlou@bjtu.edu.cn

0 引言

偏振分束器作为相干光通信、全光开关、激光器以及光纤陀螺等光系统中的重要元件^[1],其性能的提升直接影响着光系统的小型化及集成化。根据结构特点,可以分为双折射偏振分束器^[2]、熔融光纤偏振分束器^[3]、磨抛型光纤偏振分束器^[4]。由于传统单模光纤的双折射系数较小,基于传统单模光纤的偏振分束器有着工作波长范围过窄、器件尺寸过大等缺陷,这对光系统的小型化、集成化十分不利。因此,设计具有高带宽、短长度的偏振分束器对提升光系统的性能有着十分重要的意义。微结构光纤自诞生以来,就以其独特的性质(无尽单模、大模场面积和高非线性等)、灵活的结构设计引起人们的广泛关注^[5]。

近年来,国内外对于基于微结构光纤的偏振分束器研究逐渐增多。2013年冯睿娟等设计出了一种基于椭圆双芯 PCF 偏振分束器,其器件长度为 0.775 mm,并且消光比超过 20 dB 的带宽达到 30 nm^[5];2014年,Rui H.等设计出基于软玻璃的矩形椭圆双芯 PCF 偏振分束器长度为 282 μm 消光比高于 20 dB 的带宽达到了 32 nm^[6]。影响偏振分束器性能的一个关键性指标就是双折射,高双折射可以有效减小耦合长度从而缩短偏振分束器的长度。为了取得高双折射,一般是在微结构光纤内引入椭圆结构或者采取加入大小尺寸的空气孔的方法,上述的两项研究工作^[5-6]就是通过引入椭圆空气孔来取得高双折射度。但是由于现在微结构光纤的制造工艺尚未完全成熟,所以加入椭圆空气孔或者不同尺寸的空气孔的微结构光纤的制造难度较高。因此,设计结构简单、制造难度低的高性能微结构光纤偏振分束器就有着十分重要的意义。2011年,Nagasaki 等^[7]使用了有限元法(FEM),模拟了向微结构光纤中空气孔选择性填充金属丝得到的偏振特性。结果表明:向微结构光纤中引入相邻数根金属丝可以在较宽的波长范围内得到高偏振相关的传输特性。这为以金属修饰的微结构光纤为基础的偏振分束器提供了理论支持。这样利用金属的高偏振相关的传输特性可以避免椭圆空气孔或者大小圆结构来实现高双折射,从而降低制作难度。利用金属表面等离子体(Surface Plasmon Resonance,SPR)效应来设计分束器成为一种有效的途径^[8]。

文中提出了一种金属修饰的微结构光纤偏振分束器,利用有限元法,研究了耦合长度与孔间距、占空比等结构参数之间的变化关系,进而优化设计出一种高消光比、结构简单的微结构光纤偏振分束器。该偏振分束器长度为 3.523 mm,在 1.55 μm 工作波长处消光比高达 74.9 dB。并且设计中避免应用椭圆空气孔或者大小不同尺寸的空气孔的设计,制作难度较低。

1 光纤结构及原理

所提出的微结构光纤偏振分束器的结构如图 1 所示,图中所有圆孔的圆心都在正六边形的角上。图中 1~5 孔中填充有金属银,其他孔均为空气孔,芯区是由两个缺失的空气孔构成。设此结构中空气孔的直径为 d ,孔间距为 Λ ,将 d/Λ 称为占空比即空气孔直径 d 与孔间距 Λ 的比值。基底材料为二氧化硅玻璃。

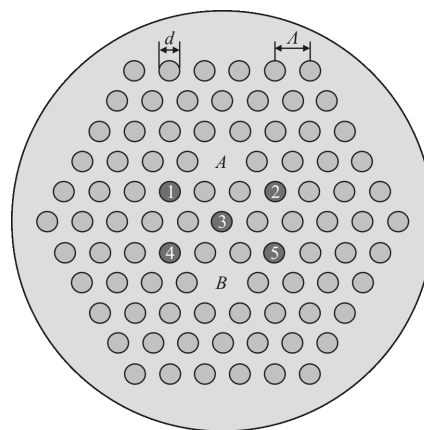


图 1 偏振分束器的截面图

Fig.1 Cross-section of the proposed polarization splitter

在金属材料的选择方面,常见的几种金属中,金属金、银和铝的反射率较高^[9],但是铝的化学性质较为活泼容易被氧化形成一层致密的氧化物薄膜,影响微结构光纤的性能,银和金化学性质稳定,常用于微结构光纤的修饰^[10]。文中选择具有价格优势的金属银作为修饰材料。

二氧化硅玻璃的材料折射率可以通过 Sellmeier 公式确定^[5],金属银的有效折射率可以根据金属 Drude 模型推出,金属材料的介电常数均为复数^[9],因此,金属银的有效折射率也是复数。银的折射率如表 1 所示。

表 1 金属银的有效折射率
Tab.1 Effective refractive index of Ag

Incident wavelength / μm	n	ki
1.429 312 674	0.363 554 382	9.244 914 07
1.459 027 18	0.374 535 949	9.442 800 415
1.489 359 431	0.385 983 467	9.644 639 112
1.520 322 271	0.397 916 193	9.850 513 544
1.551 928 808	0.410 354 179	10.060 508 61
1.584 192 425	0.423 318 305	10.274 710 76
1.617 126 783	0.436 830 313	10.493 208 02
1.650 745 825	0.450 912 843	10.716 090 01

在双芯微结构光纤中存在有 4 种模式^[11], 即 x 偏振态的奇模 E_{xo} 和偶模 E_{xe} 以及 y 偏振态的奇模 E_{yo} 和偶模 E_{ye} 。相同偏振态的 e 模和 o 模会发生功率耦合, 不同偏振态的模式则不会发生功率耦合, 即功率耦合发生在 E_{xe} 和 E_{xo} 与 E_{ye} 和 E_{yo} 之间, x 偏振态与 y 偏振态没有功率耦合。根据波导模式耦合理论, 双芯微结构光纤的耦合长度为^[12]:

$$L_p = \frac{\pi}{\beta_{pe} - \beta_{po}} = \frac{\lambda}{2(n_{pe} - n_{po})} \quad (1)$$

式中: p 为偏振方向取 x 或 y ; e 为偶模, 也就是两个芯区中偏振方向一致的模式; o 为奇模, 即两个芯区中偏振方向相反的模式; n 为模式有效折射率; β 为传播常数。

从公式(1)中可以看出只要使得双芯微结构光纤中 x 方向的偶模和奇模的有效折射率的差值与 y 方向偶模和奇模的有效折射率差值不同, 就会导致两个偏振方向的耦合长度不同, 这样的话只需要选取合适的长度, 就可以使得一个方向的偏振光能量已经完全耦合至另一个芯区, 而另一个方向的偏振光的大部分能量还保留在原本的芯区, 这样两个偏振方向的能量分别集中在两个芯区, x 与 y 方向的偏振光就可以分离了。

不考虑传输对光波能量的衰减, 在一个芯区的出口位置, x 和 y 偏振光的归一化功率如下式所示:

$$L_{x,y} = \cos^2\left(\frac{\pi L}{2L_{x,y}}\right) \quad (2)$$

式中: $L_{x,y}$ 为 x 或 y 偏振态的归一化功率; $L_{x,y}$ 为 x 或 y 偏振态的耦合长度; L 为分束器长度。归一化功率随分束器长度的变化规律如图 2 所示。

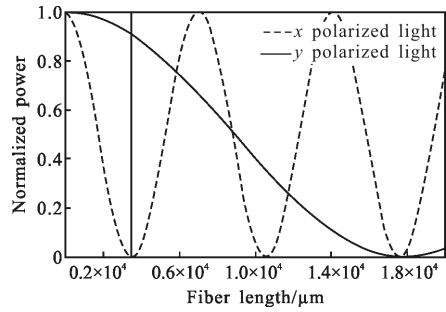


图 2 偏振光归一化功率随分束器长度的变化曲线

Fig.2 Curves of normalized power distribution for polarized light as a function of beam splitter length

2 结构参数对偏振分束器性能的影响

首先讨论改变孔间距对偏振分束器性能的影响。先设定工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$, 占空比 d/Λ 为 0.5。得到在光波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时, 不同孔距时的偏振分束器的长度, 如图 3 所示。

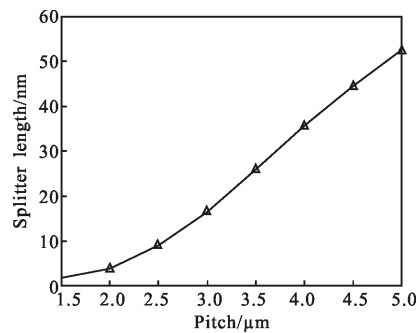


图 3 偏振分束器长度和孔间距之间的关系

Fig.3 Splitter length as a function of hole pitch

可以得知, 孔间距对偏振分束器的长度影响显著。当孔间距从 $1.5 \mu\text{m}$ 增加到 $5 \mu\text{m}$ 时, 偏振分束器长度从 1.59 mm 上升到 52.20 mm 。这是因为当孔间距从 $1.5 \mu\text{m}$ 增加到 $5 \mu\text{m}$ 的过程中, 孔间距与入射光波波长 $1.55 \mu\text{m}$ 的差距越来越大, 使得光的衍射效应逐渐减弱从而导致功率耦合变得越来越困难, 最终导致随着孔间距增加偏振分束器长度也随之增加。因此, 为了获得较短的器件长度, 要选择较小的孔间距。但是不能一味选择更小的孔间距, 因为在金属修饰的微结构光纤中, 由于引进了金属材料使得光纤的损耗急剧增加, 当孔间距接近工作波长时衍射效应明显, 功率耦合容易, 但也导致金属材料对光的损耗的增加。接下来就讨论当改变孔间距时, 偏振分束器的损耗情况。

工作波长仍然设定为 $1.55 \mu\text{m}$, 占空比同样是

0.5。光纤的单位长度损耗可以根据模式有效折射率的虚部得知^[9]。

$$\alpha_{\text{loss}}=10\lg(e \cdot \alpha)=8.686 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \text{Im}(n_{\text{eff}})[\text{dB/m}] \quad (3)$$

将计算出的模式有效折射率虚部代入公式(3)中就能够得到该模式的单位长度损耗,再乘以相应的偏振分束器长度就可以得到对应每个孔间距的偏振分束器的总损耗,如图 4 所示。综合考虑偏振分束器的长度和损耗两个参数,最终选择了孔间距为 2 μm 来进行接下来的讨论。

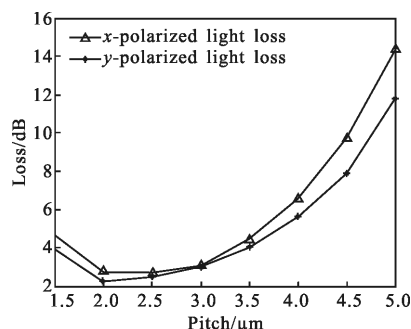


图 4 不同孔间距的 x 偏振态和 y 偏振态的总损耗

Fig.4 Total loss of x- and y-polarized light varies with pitches

不同占空比 x 偏振态的耦合长度随波长变化曲线以及由此确定的偏振分束器长度如图 5 所示。可

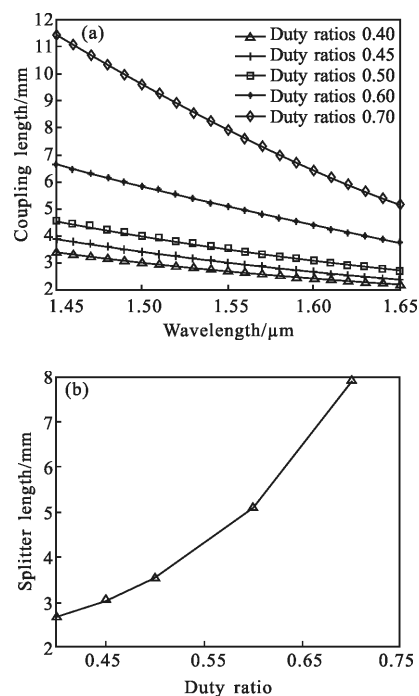


图 5 (a)不同占空比 x 偏振态耦合长度随波长变化曲线 (b) 偏振分束器长度随占空比变化曲线

Fig.5 (a) x-polarized coupling length of different duty ratios varies with wavelength (b) Splitter length varies with duty ratio

以看出:占空比越大,x 偏振态耦合长度越长。这个现象的原因是占空比越大,空气孔相对越大,这影响了两个芯区之间的能量耦合,使得能量耦合变得困难,所以表现出耦合长度增长。

将仿真得出的不同占空比的模式有效折射率虚部代入公式(3)中就可以得到不同占空比的偏振分束器的单位长度的损耗情况,接着分别乘以对应占空比的偏振分束器长度就可以得到对应占空比的偏振分束器的总损耗。损耗情况如图 6 所示。

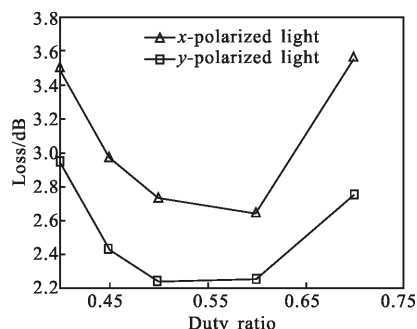


图 6 不同占空比下 x 偏振态与 y 偏振态的总损耗情况

Fig.6 Total loss of x- and y-polarized light varies with different duty ratios

可以看出:虽然减小占空比会使得耦合长度变短,但是这也会使得单位长度的传输损耗增加,从而导致最终当占空比到 0.5 时继续减小占空比会使得总传输损耗上升。综合考虑偏振分束器长度以及损耗情况,确定占空比为 0.5。

3 消光比与带宽

经过上述的讨论可以确定偏振分束器的孔间距取 2 μm,占空比取 0.5,这时 x 偏振光的耦合长度为 3 523.278 μm,y 偏振光的耦合长度为 17 853.128 μm,因此,取偏振分束器长度为 3.523mm。接下来便研究其性能。定义消光比(Extinction Ratio,ER)为:

$$ER=10\lg\left(\frac{P_x}{P_y}\right) \quad (4)$$

式中: P_x 为该纤芯中 x 偏振态光的输出功率; P_y 为该纤芯中 y 偏振态光的输出功率。在不同占空比情况下消光比随波长变化曲线如图 7 所示,当占空比为 0.5 时,消光比高于 20 dB 的带宽覆盖了 1.53~1.57 μm 的 40 nm 波长范围。而当占空比变化时,消光比曲线的峰值位置发生了移动。

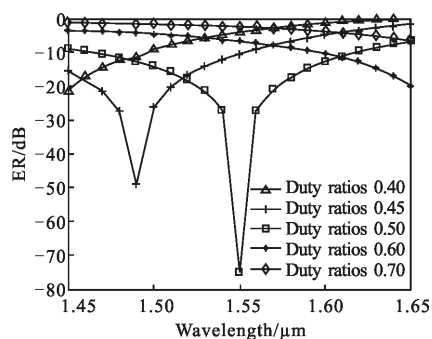


图 7 不同占空比的消光比随波长的变化曲线

Fig.7 ER of different duty ratios varies with wavelength

在实际制作中,往往存在加工误差,这就期望设计出的偏振分束器具有高的容错能力,即当存在加工误差对偏振分束器的长度产生影响时,偏振分束器仍能保持较好的性能。若假设偏振分束器长度的加工误差为 $\pm 5\%$ 时,改变偏振分束器长度,消光比随波长变化曲线如图 8 所示。可以看出:当加工误差为 $\pm 5\%$ 时,偏振分束器仍能保持 40 nm 的带宽,在 1.55 μm 工作波长处仍能保持消光比高于 20 dB。

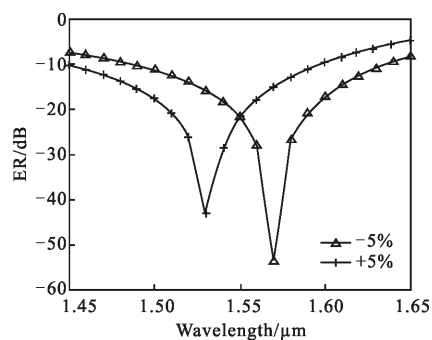


图 8 加工误差为 $\pm 5\%$ 时消光比随波长变化曲线

Fig.8 ER varies with wavelength when the error is $\pm 5\%$

4 结论

提出了一种金属修饰的微结构光纤偏振分束器,并且利用有限元法对光纤特性进行了研究。研究结果显示:通过改变微结构光纤中空气孔之间的间距和孔径与孔间距的比值可以改变偏振分束器的性能,通过优化结构参数确定最优的结构参数,即空气孔孔径为 2 μm 、占空比为 0.5。该偏振分束器长度为 3.523 mm,消光比高于 20 dB 的带宽覆盖了 1.53~1.57 μm 的 40 nm 波长范围,覆盖了整个光通信的 C 波段,在 1.55 μm 工作波长处消光比达到了 74.9 dB。并且当存在加工误差时,仍能保持较好的性能。该偏

振分束器结构简单,对加工精度要求不高,使得实际制作成为可能,也为基于微结构光纤的器件设计提供了新思路。

参考文献:

- [1] Zi J, Li S, An G, et al. Short-length polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber with hexagonal lattice[J]. *Optics Communications*, 2016, 363: 80–84.
- [2] Peng G D, Tjugiarto T, Chu P L. Polarisation beam splitting using twin-elliptic-core optical fibres[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(10): 682–683.
- [3] Bricheno T, Baker V. All-fibre polarisation splitter/combiner [J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(6): 251–252.
- [4] Snyder A W, Stevenson A J. Polished-type couplers acting as polarizing beam splitters [J]. *Optics Letters*, 1986, 11(4): 254–256.
- [5] Feng Ruijuan, Lou Shuqin, Lu Wenliang, et al. Ultra-short polarization splitter based on dual-elliptical-core photonic crystal fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (2): 506–510. (in Chinese)
- [6] Rui H. Highly birefringent photonic crystal fiber polarization splitter made of soft glass [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(22): 6757–6760.
- [7] Akira N, Kunimasa S, Masanori K. Polarization characteristics of photonic crystal fibers selectively filled with metal wires into cladding air holes [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (4): 3799–3808.
- [8] Chen H, Li S, Ma M, et al. Surface plasmon induced polarization filter based on Au wires and liquid crystal infiltrated photonic crystal fibers [J]. *Plasmonics*, 2016, 11 (2): 459–464.
- [9] Hao Congjing. Research on the photonic crystal fiber based sensors filled with metal nanomaterials [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese)
- [10] Yan Haozhe, Dai Nengli, Peng Jinggang, et al. Progress of metallic core microstructured fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011(11): 13–21. (in Chinese)
- [11] Guobin R, Zhi W, Shuqin L, et al. Modal interference in dual-core photonic crystal fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(8): 2600–2606. (in Chinese)
- [12] Guo Shiliang, Huang Hui, Tong Kai, et al. Polarization splitter based on highly birefringent dual-core photonic crystal fibers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (6): 1863–1868. (in Chinese)