

耦合型微纳光纤偏振滤光器研究

杜 垚¹ 陈 哲^{1,2} 余健辉^{1,2*} 翟艳芳¹ 张 军^{1,2} 陈春艳¹ 李浩智¹

(¹暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632
²暨南大学光电信息与传感技术广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510632)

摘要 微纳光纤偏振滤光器是光纤通信和传感系统的微型基本元件之一。利用超模耦合理论研究表明,当选择合适的耦合区长度和微纳光纤直径时,两平行紧贴微纳光纤构成的耦合器件可实现起偏效应,即将非偏振的输入光变为偏振光输出;理论设计分析给出了产生这种效应的几何参量值。实验研究了两根微纳光纤平行耦合时输出光偏振度(DOP)与耦合长度的关系,验证了起偏效应并制作了基于消逝场耦合的微纳光纤偏振滤光器。实验表明当微纳光纤偏振滤光器输入非偏振光时,在 1545~1560 nm 波段耦合输出端光的偏振度达到了 90%以上,实现了光束起偏;在此波段内某些波长的输出光消光比(LPER)可达到 24 dB 以上,而其他波长处为椭圆偏振光或者圆偏振光,实现了分色起偏。此器件与检偏器组合可制成带通(阻)波长滤波器。

关键词 光学器件;微纳光纤;偏振度;滤光器;消逝场;耦合;起偏

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0610002

All Micro-Fiber Polarization Filter Based on Evanescent Field Coupling

Du Yao¹ Chen Zhe^{1,2} Yu Jianhui^{1,2} Zhai Yanfang¹ Zhang Jun^{1,2}
Chen Chunyan¹ Li Haozhi¹

(¹Department of Optoelectronic Engineering, Ji'nan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)
(²Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Ji'nan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)

Abstract Micro fiber polarization filter is one of micro basic components for optical communication and sensors system. Theoretical analysis based on super mode theory shows that polarizing effect in coupling component of two contacted micro fibers can be achieved when the fibers' coupling length and diameters are chose suitably, which means unpolarized light can be changed into polarized light after it is through the coupling micro fiber component. Theoretical analysis and design give the geometric parameters for the polarizing effect. Experiments are made to investigate the relationship between degree of polarization (DOP) of the output light and coupling length when two micro fibers are lined parallel to couple. Micro fiber polarization filers based on evanescent field are manufactured. Experiments show that the (DOP) of the output light within the wavelength band of 1545~1560 nm in the micro fiber polarization filers are higher than 90% when the unpolarized light is input, which means the light is polarized. The linear polarization extinction ratio (LPER) of output light at some wavelengths with the band are higher than 24 dB, while output lights at another wavelengths are elliptical or circular polarized light. It means that output lights are polarized according to their wavelengths. The micro component can construct the band-pass wavelength fiber when it is used with an optical polarizer.

Key words optical devices; micro-nanofiber; degree of polarization; filter; evanescent field; coupling; polarize

OCIS codes 230.7408; 060.2310; 230.1360; 230.1150

收稿日期: 2011-12-30; 收到修改稿日期: 2012-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61027010, 11004086, 61177075, 61008057)、中央高校基本科研业务费专项资金(21611516, 21611454, 216113129)、广东高校优秀青年创新人才培养计划(LYM10024)和暨南大学优秀本科推免生科研创新培育计划资助课题。

作者简介: 杜 垚(1987—),男,硕士研究生,主要从事新型光纤无源器件方面的研究。E-mail: duyaom@gmail.com

导师简介: 陈 哲(1957—),男,博士,教授,主要从事新型光纤无源器件、光纤通信与光纤传感技术、光电检测技术、光学设计、光学和光电系统计算机仿真等方面的研究。E-mail: thzhechen@jnu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: kensomyu@gmail.com

1 引 言

微纳光纤是指玻璃或聚合物制作而成的,直径在几百纳米到几个微米的光学波导。微纳光纤具有强消逝场、强光约束能力、相对较低的损耗和很好的柔韧性等优点^[1],因而受到很大的关注^[2~5]。因为可实现低损耗的小半径弯曲光波导,例如半径小至 $5\ \mu\text{m}$ ^[6],为进一步缩小光学器件提供了可能,所以微纳光纤已成为制作微型光学器件基本材料之一。基于微纳光纤的各种微型光学器件不断被报道,如马赫-曾德尔干涉器^[7,8]、谐振腔^[9,10]、全光可调谐的谐振腔^[11]、小型激光器^[12]、Add-Drop 滤波器^[13]、全光开关^[14]、改善光束质量^[15]、快速微型传感器^[16~19]等。另外也被用于实验研究基本的物理问题^[20]。

偏振滤光器是将入射光按其偏振特性进行分离的光学器件,主要应用于需要对偏振态进行有效控制的光学系统中,例如相干光学通信和干涉式光学传感器等。微纳光纤已经应用于这些领域^[8],因此也有需要制作和研究微纳光纤的偏振滤光器。

童利民小组^[21]最先研究了两根微纳光纤平行紧贴的耦合效应。对于这种耦合,他们研究了两微纳光纤直径、折射率及耦合长度对耦合效率的影响。李宝军小组^[22]演示了耦合长度仅为 $2\ \mu\text{m}$ 的超小型缠绕耦合器,并提出通过调节缠绕角度控制耦合器分光比的方法。这些都表示微纳光纤消逝场间的耦合特征可用于制作超小型的光学器件。利用波导耦合的方法可以实现长度为 $10\ \mu\text{m}$ 的超小型起偏器^[23],但目前还没有利用微纳光纤消逝场间耦合中的偏振特性的研究报道。

本文利用超模耦合理论研究了两根微纳光纤平行耦合,当输入非偏振光时,输出端的偏振效应,理论计算给出了这种效应的几何参量值。实验研究了两根微纳光纤平行耦合时输出光与耦合长度的关系,对理论分析结果进行了实验验证,并实验制作演示了基于消逝场耦合的微纳光纤偏振滤光器。

2 理论分析和计算设计

通过耦合波导的超模理论,研究了基于微纳光纤的消逝场间耦合的偏振特性。根据此特性,针对两平行紧贴的微纳光纤间的耦合,利用全矢量有限元的数值方法,计算设计出产生输出光起偏效果的微纳光纤器件优化几何结构参数(微纳光纤直径和耦合长度)。因为只有当微纳光纤直径相同时,两波导的传播常数相等,耦合效率最高,起偏效果最好,

所以本文的理论研究只涉及两直径相同的微纳光纤构成的耦合器件^[24]。一般情况下,输入光波通过锥形过渡区进入用标准单模光纤拉制的微纳光纤后,大部分光波以基模传输,而一部分以高阶辐射模传输,当光场在微纳光纤中传输足够长的距离后,微纳光纤中只剩下基模传输的光场。因此,只需研究耦合区微纳光纤为基模输入的情况,可忽略高阶模的影响。

根据波导耦合的超模理论^[24],波导耦合现象可以解释为两波导对称和反对称超模的干涉。这里的超模即为两无穷长平行紧贴波导结构的稳定传播模。

两根相互耦合的波导中,每种偏振模式[横电(TE)或横磁(TM)]都有一对称超模(偶模)和一反对称超模(奇模),它们的传播常数分别为 $\beta_{\text{TE},\text{even}}$ ($\beta_{\text{TM},\text{even}}$) 和 $\beta_{\text{TE},\text{odd}}$ ($\beta_{\text{TM},\text{odd}}$),这里用下标 i 分别表示 TE 和 TM 偏振模,而对应的有效折射率分别为 $n_{\text{eff}}^{\text{TE},\text{even}}$ ($n_{\text{eff}}^{\text{TM},\text{even}}$) 和 $n_{\text{eff}}^{\text{TE},\text{odd}}$ ($n_{\text{eff}}^{\text{TM},\text{odd}}$),它们都为光波长的函数。当这对奇偶超模在耦合区传输一定距离后,这对超模的干涉结果使传输光从一波导完全耦合到另一波导^[24]。这一最短的耦合距离称为 TE(TM) 模的拍长,记为 $L_{\text{TE(TM)}}^{\text{B}}$,可表示为

$$L_i^{\text{B}}(\lambda) = \pi / [\beta(\lambda)_{i,\text{even}} - \beta(\lambda)_{i,\text{odd}}] = \lambda / \{2[n(\lambda)_{\text{eff}}^{i,\text{even}} - n(\lambda)_{\text{eff}}^{i,\text{odd}}]\}. \quad (1)$$

如果耦合区长度为 TE(TM) 拍长的奇数倍,那么 TE(TM) 光将从一光纤完全耦合到另一光纤,此时耦合最大,但如果耦合长度为拍长的偶数倍时,TE(TM) 光将从另一光纤又重新回到原来的光纤中,此时耦合最小。因此,只要耦合区长度 L_c 为 TE 拍长的奇数(偶数)倍,同时为 TM 拍长的偶数(奇数)倍,那么 TE 和 TM 光将分别进入耦合区后部的两个输出端中,实现最好的起偏效应。从而可知,起偏效应最好的条件应为

$$L_c = mL_{\text{TE}}^{\text{B}} = (m+n)L_{\text{TM}}^{\text{B}}, \quad \begin{pmatrix} m = 1, 2, 3, \dots \\ n = 1, 3, 5, \dots \end{pmatrix} \quad (2)$$

图 1 给出了使用全矢量有限元方法计算得到的两根直径都为 $3\ \mu\text{m}$ 微纳光纤中传输的 4 种超模模场分布, TM 偏振 E_y 分量的奇偶超模分别如图 1(a)、(b)所示,而 TE 偏振 E_x 分量的奇偶超模分别如图 1(c)、(d)所示。图 1 中各图中的二个圆圈表示二根光纤的横截面。从图 1(b)、(d)可见,两微纳光纤紧贴处发生强耦合作用,致使这附近模场发生变形。对比图 1(b)、(d)还可知,TE 偶超模发

生形变比 TM 偶超模的形变明显,此表明 TE 模的耦合作用比 TM 耦合作用强,因此 TE 奇偶对称模的有效折射率差也比 TM 的有效折射率差要大。从(1)式可知,这便是 TM 拍长比 TE 拍长要长的原因。这也表明存在满足(2)式的耦合长度使微纳光纤耦合器件实现起偏效应。

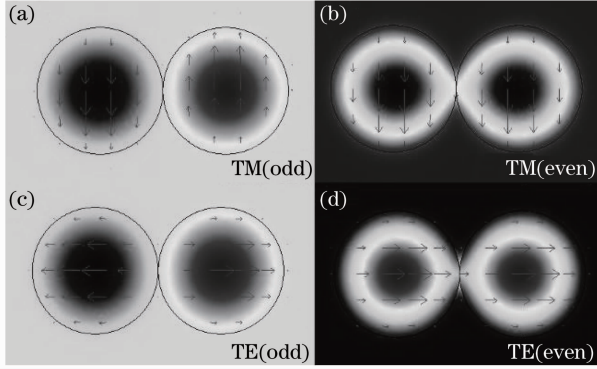


图 1 超模模场分布的计算结果。(a) TM 模奇对称模；(b) TM 模偶对称模；(c) TE 模奇对称模；(d) TE 模偶对称模。图中箭头表示所在空间点的光偏振态方向

Fig. 1 Mode field output profile of two parallel micro-fiber. (a) TM odd mode; (b) TM even mode; (c) TE odd mode; (d) TE even mode. Arrows shows the optical polarization direction of space point

图 2 中符号线为利用全矢量有限元计算得到的四超模有效折射率随微纳光纤直径变化的关系。当有效折射率已知时,可通过(1)式分别求得 TE 和 TM 拍长随微纳光纤直径的关系,其曲线如图 2 中虚线和实线所示。在图 2 的计算中,微纳光纤直径的变化步长取为 $0.01 \mu\text{m}$,微纳光纤的折射率取为 1.46,光波长为 1550 nm。从图 2 可知,TE(TM)奇偶模的有效折射率差随着微纳光纤直径变大而变小,而有效折射率则随其直径变大而增大,并趋向微纳光纤折射率 1.46。这是因为微纳光纤直径越大,则空气中的消逝场越少,大部分光场都在微纳光纤中传输,因此两微纳光纤之间的消逝场耦合作用降低,有效折射率差变小,有效折射率趋向微纳光纤折射率,从而 TE(TM)的拍长变长。另外,从图 2 可知,当微纳光纤直径相同时,TM 偏振模的拍长比 TE 偏振模的拍长短,它们的拍长及拍长差都随着直径增大而变长。因此存在着使一个偏振模耦合最大,另一个偏振模耦合最小的耦合区长度,在此耦合长度处,两 TE、TM 偏振模合成光在耦合区的输出端成为偏振光,从而可以实现输出光的起偏效应。

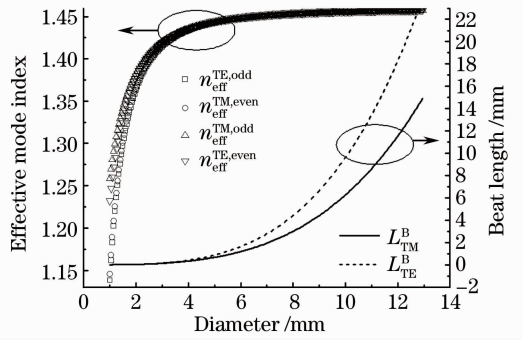


图 2 TM(TE)模的奇偶对称模的有效折射率、拍长 L_B 随光纤直径变化的关系

Fig. 2 Effective refractive index and beat length of TM(TE) odd (even) mode versus micro-fiber diameter

由以上分析可知,两个偏振模的拍长差越大,产生的起偏效应就会越明显,因此可以设想,用直径为 $6 \mu\text{m}$ 以上的微米光纤容易产生较明显的偏振效应。

由图 2 可知,拍长随着微纳光纤直径变大而变长,因此根据(2)式可知,当分别选一组特定值(m, n)时,总有一组起偏效应最好的耦合长度 L_C 和微纳光纤直径 d , (L_C, d)与之对应。当(m, n)取不同整数时,通过数值求解(2)式,便可得一批对应的离散起偏点(L_C, d),将这批离散点表示在坐标图 3 中,其中纵坐标为耦合长度 L_C ,横坐标为微纳光纤直径 d 。图中的起偏点组成了若干条不连续的离散曲线,每条曲线中对应一个 n 值,例如最下面的离散曲线就为 $n=1$ 时, m 取不同的值所对应的点构成的曲线;越靠上的曲线,所对应的 n 值就越大。

图 3 中的点可以分为三个区域,其中 a 区位于直径范围为 $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$,耦合长度在 $15 \sim 45 \text{ mm}$ 的区域,此区域内的起偏点最密集。当制作的两根微纳光纤耦合器件直径在此区域内时,每个直径都对应一个 20 mm 左右的耦合区长度变化范围,在此范围内的起偏点的值都可以令器件实现起偏;在 b 区内,起偏点组成的离散曲线比较平缓,器件微纳光纤直径在 $2.5 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 的范围内,其起偏效应的耦合长度范围为 $5 \sim 40 \text{ mm}$,有 35 mm 的调整起偏范围。而在直径大于 $3.5 \mu\text{m}$ 的区域内,起偏耦合长度都在约 $50 \mu\text{m}$ 以上,并随着直径的增大而增大到 $90 \mu\text{m}$ 以上,但在此区域内的起偏点的离散程度很大。

结合图 2 和图 3 可确定优化的器件制作几何结构参数。图 2 表明,两根微纳光纤耦合时,直径大于 $6 \mu\text{m}$ 则易于制作出较高偏振效应的器件。由图 3 可知,当直径大于 $6 \mu\text{m}$ 的最小耦合长度的起偏点

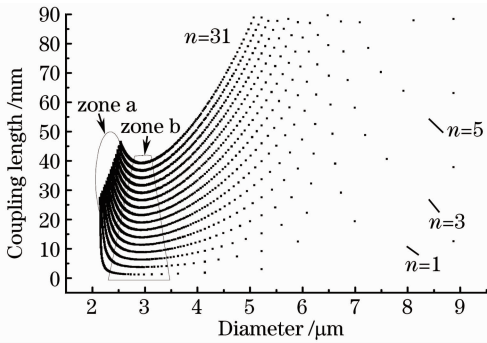


图 3 (m, n)取不同值时,具有起偏效应的两根微纳光纤耦合几何结构参数分布图(微纳光纤直径和耦合长度)
Fig. 3 Fiber diameter versus coupling length when the coupler able to polarize light (polarizable coupling length versus fiber diameter)

时是直径约为 $8.87 \mu\text{m}$ 的点,对应耦合长度约为 12.63 mm 。为此设计实验中的优化几何结构参数为微纳光纤直径约 $9 \mu\text{m}$,耦合长度约 10 mm 。需要注意的是,此几何结构参数是以入射光波长为 1550 nm 设计的,如果入射光不为 1550 nm ,则当光经过光纤耦合器耦合后,TE 和 TM 偏振模不能完全分开,会在同一个输出端口中同时存在两种偏振模式,且当入射光波长不同时,这两种偏振模式的比例也会不同,这会造成起偏器对不同波长的光偏振效果不同的现象。如果器件的几何结构参数完全符合图 3 中的起偏点,且入射波长为 1550 nm 的完全偏振光,则器件在理论上可使 TE 和 TM 偏振模的光分别从两个端口输出,即在两个端口分别输出线偏光。

3 器件制作

耦合所用的两根直径相同的微米光纤为利用两根普通通信光纤在火焰下同时拉伸而成。这可使两根光纤在拉伸过程中受热相同,被拉伸的速度和拉伸距离完全相同,所以这样的制作过程可以保证拉伸的两根微米光纤直径和渐变区完全相同,使耦合效率最大。图 4 中火焰灯 (burner) 用于加热光纤,火焰灯旁边两个是二维调节架,用于拉伸光纤,光源 (LS) 为可调激光器 (ANDO AQ4321D TUNABLE LASER SOURCE 波长范围: $1520 \sim 1620 \text{ nm}$), 扰偏仪 (OPS) (FIBERPRO PS 3200) 用于将输入器件的光退偏,偏振分析仪 (SOPA) (FIBERPRO SA 2000) 用于实时分析输出光的偏振状态。

当光纤拉伸到几微米量级时,因为范德华力和静电力的作用,两根光纤自然地互相吸引紧贴一起,

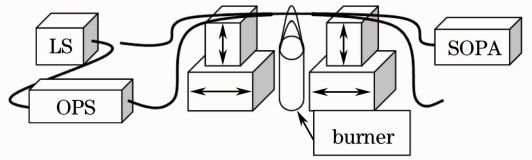


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Diagram of the experimental setup

形成一段由两根平行紧贴微纳光纤的耦合区域,称作光耦合区,光在耦合区传播时,会从一根光纤耦合到另外一根光纤。利用这种方法拉制的微纳光纤由于两端的尾纤仍是普通通信光纤,所以易于与测试系统连接。

实验中制作并测试了两个不同几何参数的微纳光纤耦合器件。一号器件由两根各自直径 $3 \mu\text{m}$ 左右的微米光纤构成,两微米光纤的中部相互接触,形成光耦合区,测量得到两微米光纤在耦合区的接触长度为 27.8 mm ,如图 5(a)、(b)所示。此样品用于测试耦合区长度与微纳光纤耦合器件偏振特性的关系。

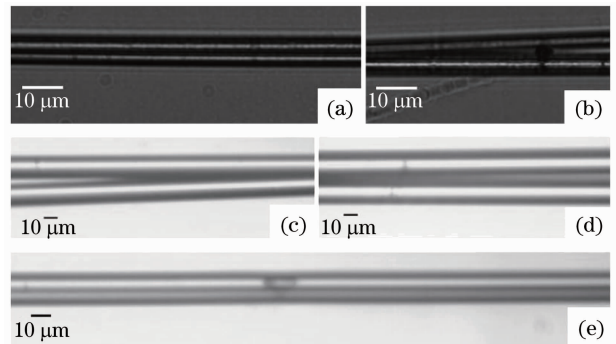


图 5 两个耦合型微纳光纤偏振滤波器的显微照片

Fig. 5 Microscopic image of two micro-fiber polarization filter based on evanescent field coupling

为了制作成的器件的直径和耦合区长度符合图 3 中的点所对应的参数,二号器件在光纤直径拉至 $10 \mu\text{m}$ 左右时,将器件接入测试系统,然后再通过继续缓慢拉伸两根微纳光纤(每次拉伸长度不超过 $10 \mu\text{m}$),同时调节器件的耦合区长度,当偏振分析仪得到的输出光偏振度 (DOP) 达到 90% 以上时,停止拉伸,最后拉制成了两根各自直径 $8.5 \mu\text{m}$ 左右的微米光纤,两者的中部相互接触,形成光耦合区,耦合区紧密接触长度约为 9.4 mm ,其传输损耗约为 4.2 dB 。此参数基本与图 2 中直径 $9 \mu\text{m}$,耦合区长度 13 mm 的点相符。用以上方法制作器件的成功率很高,因为光纤拉伸过程中,光纤直径和耦合长度都在变化,总有可能得到满足图 3 起偏点的几何参数。二者有差别是因为理论计算所确定的耦合

区长度与实验中测量的耦合区长度概念并不相同。理论计算的耦合区长度只考虑了两根光纤完全紧贴部分的长度,并没有考虑两根光纤耦合区分离点附近,两光纤相距很近的部分的长度,这部分长度也对耦合起作用,但计算的 DOP 是不考虑的;而实际实验中,测量的 DOP 是包含在两根光纤逐渐靠近的过渡区域发生的耦合效应的,但由于测量中较难得到此过渡区域的长度,因此本实验中只给出耦合区接触部分的几何长度,它是小于理论计算长度的。

图 5 为两个制作的器件的显微照片,图 5(a)和图 5(b)为一号器件,其耦合区接触长度约为 27.8 mm,两根接触光纤各自最小直径为 $3\ \mu\text{m}$ 左右。图 5(c)、(d)和(e)是二号器件,其耦合区接触长度约为 9.4 mm,两根光纤各自最小直径为 $8.5\ \mu\text{m}$ 左右。其中图 5(a)和(e)分别为两个器件各自光纤直径最小时的照片,图 5(b)、(c)和(d)分别为两个器件各自两根光纤开始互相接触处的照片,耦合区接触长度就为这些接触点之间光纤的长度。照片表明,一、二号器件接触点处光纤直径基本相同,分别约为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $13\ \mu\text{m}$,说明器件光纤直径从两端向中间由大到小渐变,这与理论计算的情况不同。

4 结果分析及讨论

4.1 耦合区长度对输出光偏振特性的影响

为了讨论耦合区长度对器件输出光的偏振特性的影响,利用已经拉制好的两根直径都为 $3\ \mu\text{m}$ 的微纳光纤进行了实验研究。如前所述,实际耦合区长度为接触部分长度和过渡区长度之和,但实验中较难测得过渡区长度,而耦合作用的主要贡献来自于接触部分,因此在本实验研究中,用接触部分长度替代实际耦合区长度,这并不失结果的一般性。图 6 中,制作好的偏振器放置在 MAS-2 三维调节架上,两根微米光纤各自直径为 $3\ \mu\text{m}$,初始的耦合区接触长度为 27.8 mm 左右,逐渐分离两根接触的微米光纤,调节耦合区长度,以找到起偏效果最好的耦合区长度。输入光经过 OPS 被退偏(DOP 小于 6%)后,再输入制作好的两根耦合在一起的微米光纤耦合器件,两个端口输出光分别接入 SOPA 中进行偏振态的测量。

器件分为三个端口,光输入的端口称作“输入端”,和输入端在同一微米光纤上的光输出端口称为“直通端”,另外一个微光纤上的光输出端口则称为“耦合端”。

波长为 1550 nm 的光经过扰偏仪后,DOP 降为

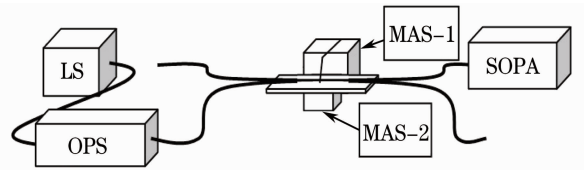


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Diagram of the experimental setup

4.45%,初始的耦合区接触长度为 27.8 mm,然后通过逐渐移动的方法分离耦合段来调节耦合区接触长度,每次分离的步长 $10\ \mu\text{m}$,测量两个端口输出光的偏振态随耦合区长度的变化。分离移动 100 步后耦合区长度变为 26.8 mm。图 7 给出了器件二个端口输出光的 DOP 与耦合区长度的关系。

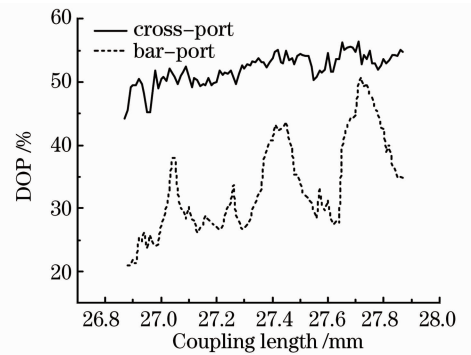


图 7 两个端口输出光 DOP 随耦合区长度的变化

Fig. 7 DOP of output light from cross-port and bar-port versus coupling length

从图 7 中可以看出,两个端口输出光的 DOP 由输入光的 4.45% 的入射光,经两根微纳光纤间的消逝场耦合作用,成为 50% 左右的部分偏振光。图中还显示,两个端口输出光的 DOP 都随着耦合区长度的变化而起伏变化,这说明器件的耦合区长度对器件中传输光的偏振态有着重要的影响。从图 3 中可以看出,耦合端的 DOP 起伏较小,原因是当微纳光纤直径 $3\ \mu\text{m}$ 时,耦合区长度在 26.8~27.8 mm 间满足起偏条件的点很密集,所以调节器件耦合区长度时,长度交替地落在起偏点和不满足耦合起偏条件的耦合区长度附近,因此会出现 DOP 的起伏变化。而两个端口输出光 DOP 始终在 60% 以下,可由图 2 中的拍长差给出解释:图 2 表明,当微纳光纤直径为 $3\ \mu\text{m}$ 时,两个偏振模的拍长差较小,小于 1 mm,而当直径为 $6\ \mu\text{m}$ 以上时,二个偏振模的拍长差就大于 1 mm 了,因此由于二者拍长差造成的起偏效应在直径为 $3\ \mu\text{m}$ 时就没有直径为 $6\ \mu\text{m}$ 的明显。二号器件的制作过程表明,用直径为 $6\ \mu\text{m}$ 以上的微米光纤可以产生较高的 DOP。

4.2 器件偏振特性与传输光波长的关系

测量了 DOP 达到 90% 时停止拉伸的二号器件样品,其两根光纤各自直径约 $8.5 \mu\text{m}$,耦合接触长度约为 9.4 mm 。研究此器件在入射光的波长为 $1520 \sim 1620 \text{ nm}$ 范围内该器件的偏振特性,可获得波长相关性。实验测试了直通端和耦合端输出光在此波长范围内的偏振度、线性消光比(LPER)。

通信波长 1550 nm 附近的二号器件输出光 DOP 的波长相关特性如图 8 所示。图 8 中短横线为器件输入光,这是经扰偏仪退偏后的退偏光,虚线为直通端输出光,实线为耦合端输出光曲线。图 8 表明,输入退偏光的 DOP 波长相关曲线较平缓,保持 DOP 小于 6%;而输出直通端和耦合端的 DOP 波长相关曲线都随着波长的改变呈振荡变化,且变化幅度较大,最大变化幅值约为 90%。这表明,两个端口的输出光 DOP 相对于退偏输入光都有了提高,而耦合端输出光在一些波长范围内的 DOP 更高,例如,耦合端在 $1545 \sim 1560 \text{ nm}$ 范围内输出光 DOP 达到了 91.56% 以上,而在此波长范围内的输入退偏光 DOP 小于 4%,即存在一个宽度为 15 nm 的微米光纤高起偏工作波长范围,这表明所制备的器件有起偏效应,可以将退偏光转变成偏振光。这验证了第 2 节理论分析的结果。

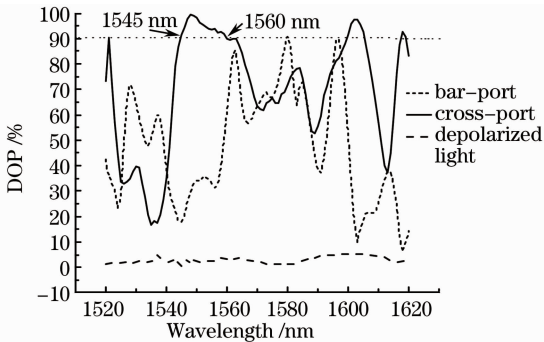


图 8 器件输出光的 DOP 随输入光光波长的变化
Fig. 8 DOP of output light from the component versus wavelength of input light

波长 1550 nm 附近器件输出光 LPER 的波长相关特性如图 9 所示。图 9 中实线和虚线分别为耦合端输出光和直通端输出光的 LPER 与输入光光波长的关系曲线。由图 9 可以看出,器件两个输出光的 LPER 随着波长的改变而振荡变化。这说明输出光的偏振部分的偏振态随着波长的改变而改变。图 9 中标出了耦合端输出光 4 个波长处的偏振态状态,其中在峰值处输出线偏振光,在峰谷处输出的是椭圆偏振光。

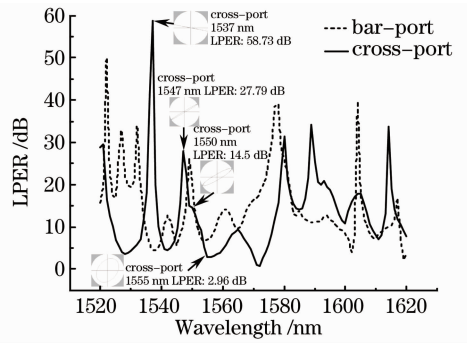


图 9 器件输出光的 LPER 随输入光波长的变化
Fig. 9 LPER of output light from the component versus wavelength of input light

根据图 8,耦合端的起偏 DOP 可达 90%,起偏效果较好,所以对耦合端输出光进行进一步的分析。图 10 中给出耦合端输出光的 DOP 和 LPER 随波长变化的曲线。

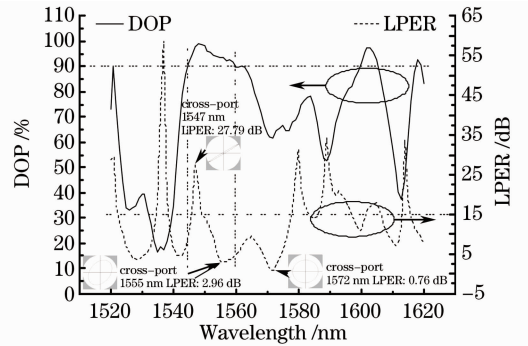


图 10 耦合端输出光的 DOP 和 LPER 随波长的变化
Fig. 10 DOP and LPER of output light from cross-port versus wavelength respectively

图 10 中实线和点划线分别为耦合端输出光的 DOP 和 LPER 随输入光光波长变化的曲线。图 10 中还标注出了在起偏工作波长范围内 LPER 最高和最低的两个点(1547 nm 和 1555 nm)的偏振光偏振特性图;图中两根水平和两根竖直的点划线标示出几个重要的参数:DOP 为 90%、LPER 为 15 dB、波长 1545 nm 和 1559 nm 。从图中可以看出,在耦合端输出光 DOP 大于 90% 的起偏工作波长范围 $1545 \sim 1559 \text{ nm}$ 内, $1546 \sim 1549 \text{ nm}$ 范围内的 LPER 都达到了 15.05 dB 以上,接近为线偏振光,达到了一般实验中对线偏振光的要求,其中 LPER 在 1547 nm 波长处达到了最高的 27.79 dB;在 1555 nm 波长处,LPER 为 2.96 dB,为椭圆偏振光;而在 1572 nm 波长处,LPER 为 0.76 dB,为接近圆偏振光。图 10 表明,退偏光经过此器件起偏后,根据波长的不同,有可能变为线偏振光、椭圆偏振光或者圆偏振光,这也表明产生了分色起偏效应。

5 结 论

理论和实验研究了利用两根微米光纤消逝场耦合的方法,制作出了耦合型微米光纤偏振滤光器。

根据超模耦合理论,利用全矢量有限元的数值方法,研究了将两根微纳光纤平行耦合时,当输入非偏振光时,输出端的光偏振特性。理论研究表明,输出端将产生光的起偏效应;理论设计分析给出了这种效应的几何参量值,并讨论了实现起偏效果的起偏器优化几何结构参数(微纳光纤直径和耦合长度)。实验研究了两根微纳光纤平行耦合时输出光与耦合长度的关系,验证了起偏效应。成功演示制作了基于消逝场耦合的微纳光纤偏振滤光器。实验还研究了微纳光纤耦合器件的偏振特性在通信波段的波长相关性。此器件耦合区长度约为 9.4 mm,光纤最小直径为 8.5 μm 左右;在通信波长 1550 nm 附近有一个宽度为 15 nm 的起偏工作波长范围(1545~1560 nm),在此工作波长范围内的退偏光(DOP 小于 4%),经过微米光纤耦合器件起偏后,在耦合端,输出光的 DOP 达到了 90% 以上;且在 1547 nm 处,输出光 LPER 达到了 27.79 dB,几乎为线偏振光,而在 1555 nm 处,LPER 为 2.96 dB,为椭圆偏振光,也即产生了分色起偏效应。因为 LPER 随波长变化曲线在 1545~1560 nm 波段处有一个尖锐的波峰,峰峰值达到 24.83 dB,因此,如果在耦合端输出口加入方向与 1547 nm 处输出光偏振方向垂直的检偏器,可起到滤波的作用,将 1547 nm 波长的信号滤除,可制成波长滤波器或者带通(阻)滤波器。

参 考 文 献

- 1 Tong Limin, Lou Jingyi, Mazur Eric. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(6): 1025~1035
- 2 S. A. Harfenist, S. D. Cambron, Eric W. Nelson *et al.*. Direct drawing of suspended filamentary micro- and nanostructures from liquid polymers[J]. *Nano Lett.*, 2004, **4**(10): 1931~1937
- 3 Tong Limin, Gattass R. Rafael, Jonathan B. Ashcom *et al.*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, **426**(6968): 816~819
- 4 Tong Limin, Hu Lili, Zhang Janjie *et al.*. Photonic nanowires directly drawn from bulk glasses [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(1): 82~87
- 5 Xing Xiaobo, Wang Yuqing, Li Baojun. Nanofibers drawing and nanodevices assembly in poly(trimethylene terephthalate) [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14): 10815~10822
- 6 Tong Limin, Lou Jingyi, R. R. Gattass *et al.*. Assembly of silica nanowires on silica aerogels for microphotonic devices[J]. *Nano Lett.*, 2005, **5**(2): 259~262

- 7 Li Yuhang, Tong Limin. Mach-Zehnder interferometers assembled with optical microfibers or nanofibers[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 303~305
- 8 Wang Yuqing, Zhu Heng, Li Baojun. Cascaded Mach-Zehnder interferometers assembled by submicrometer PTT wires [J]. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 2009, **21**(16): 1115~1117
- 9 M. Sumetsky, Y. Dulashko, J. M. Fini *et al.*. The microfiber loop resonator theory, experiment, and application [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 242~250
- 10 Yan Yingzhan, Ji Zhe, Wang Baohua *et al.*. Evanescent wave excitation of microsphere high-Q model using tapered fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1789~1793
严英占, 吉 喆, 王宝花 等. 锥形光纤倏逝场激发微球腔高 Q 模式[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1789~1793
- 11 Z. Chen, V. K. S. Hsiao, X. Q. Li *et al.*. Optically tunable microfiber-knot resonator [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(15): 14217~14222
- 12 Jiang Xiaoshun, Yang Qing, Vienne Guillaume *et al.*. Demonstration of microfiber knot laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(14): 143513
- 13 X. D. Jiang, Y. Chen, G. Vienne *et al.*. All-fiber add-drop filters based on microfiber knot resonators[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1710~1712
- 14 Yu J., Feng R., She W.. Low-power all-optical switch based on the bend effect of a nm fiber taper driven by outgoing light[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(6): 4640~4645
- 15 He Hualong, Feng Guoying, Deng Guoliang *et al.*. Improvement of the beam quality factor by using tapered micro/nano fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805008
何华龙, 冯国英, 邓国亮 等. 微纳光纤改善光束质量的研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805008
- 16 Gu Fuxing, Zhang Lei, Yin Xuefeng *et al.*. Polymer single-nanowire optical sensors [J]. *Nano Lett.*, 2008, **8**(9): 2757~2761
- 17 X. Guo, L. Tong. Supported microfiber loops for optical sensing [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 14429~14434
- 18 Joel Villatoro, David Monzón-Hernández. Fast detection of hydrogen with nano fiber tapers coated with ultra thin palladium layers[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(13): 5087~5092
- 19 Zhao Zheming, Wu Pinghui, Sui Chenghua. A novel microfiber sensor based on white light interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2001~2004
赵浙明, 吴平辉, 隋成华. 基于白光干涉的新型微纳光纤传感器 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2001~2004
- 20 She Weilong, Yu Jianhui, Feng Raohui. Observation of a push force on the end face of a nanometer silica filament exerted by outgoing light[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **101**(24): 243601
- 21 K. Huang, S. Yang, L. Tong. Modeling of evanescent coupling between two parallel optical nanowires[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(9): 1429~1434
- 22 X. B. Xing, H. Zhu, Y. Wang *et al.*. Ultracompact photonic coupling splitters twisted by PTT nanowires[J]. *Nano Lett.*, 2008, **8**(9): 2839~2843
- 23 H. Fukuda, K. Yamada, T. Tsuchizawa *et al.*. Ultrasmall polarization splitter based on silicon wire waveguides[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25): 12401~12408
- 24 William S. C. Chang. Fundamentals of Guided-Wave Optoelectronic Devices[M]. New York; Cambridge University Press, 2009. 52~58

栏目编辑: 韩 峰