

doi:10.3788/gzxb20164509.0923002

基于氟掺杂双芯光子晶体光纤偏振光分束器的设计及其研究

贺锋涛, 孙力, 惠战强, 韩永兰

(西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

摘 要:在光子晶体光纤二氧化硅材料中掺入氟元素、在光纤中引入七个椭圆空气孔以及三角形和矩形周期性空气圆孔,设计了一种氟掺杂双芯光子晶体光纤偏振光分束器.对该分束器结构参量进行优化,对分束器分离两正交偏振光的性能进行分析.结果表明:在优化结构尺寸下,当光纤长度为 $102.717\ \mu\text{m}$ 的超短长度时,在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处具有超强的分离两束正交偏振光的能力,消光比可以达到 $126.442\ \text{dB}$,具有 $60\ \text{nm}$ 的有效带宽.此偏振光分束器在大容量光通信系统中具有重要的应用价值.

关键词:光纤光学;双芯光子晶体光纤;偏振光分束器;有限元法;掺氟二氧化硅;模耦合长度;消光比

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)09-0923002-6

Design and Research of Polarization Optical Splitter Based on Fluorine Doped Dual Core Photonic Crystal Fiber

HE Feng-tao, SUN Li, XI Zhan-qiang, HAN Yong-lan

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: A type of fluorine doped dual core photonic crystal fiber polarization light splitter was designed by introducing fluorine in photonic crystal fiber silica materials and seven elliptical air holes and triangle and rectangular periodic air hole in this fiber. The structural parameters were optimized through the study of some parameters in the split structure and the performance of the split two orthogonal polarized light was analyzed. The results show that: in the optimized structure size, when the length of optical fiber is taken as the length of ultrashort $102.717\ \mu\text{m}$, it has a super separate ability which the two beams of orthogonal polarized light at the wavelength of $1.55\ \mu\text{m}$, the extinction ratio can reach $126.442\ \text{dB}$. Also, with $60\ \text{nm}$ effective bandwidth. Therefore, this polarized optical splitter has an important application value in large capacity optical communication system.

Key words: Fiber optics; Dual core photonic crystal fiber; Polarized optical splitter; Finite element method; Fluorine doped silica; Mode coupling length; Extinction ratio

OCIS Codes: 230.1360; 060.0060; 060.5295; 060.2290; 160.2290

0 引言

随着现代光通信向着大容量一体化方向的发展,相干光通信系统取得了深入的研究和关键技术上的进步.在运用光学相干性进行通信的系统中,偏振光分束器是其中不可或缺的光功能器件.它可以将两种垂直偏振态的光波分离到两个不同的传输路径中,从而将两正交偏振光分离^[1].

1990年,Peng等设计的双椭圆芯光纤实现了工作波长在 $633\ \text{nm}$ 的偏振光分束功能,其所需的光纤长度为 $262\ \text{mm}$ ^[2].虽然这一光纤结构的工作光波长不在通信波段($850\ \text{nm}$ 、 $1310\ \text{nm}$ 、 $1550\ \text{nm}$),并且光纤长度不利于光学器件的高度集成化、芯片化,但它从理论上证明通过合理设计光学光纤的结构可以实现通信波段偏振光分束的功能.光子晶体光纤结构的双折射特性比传统光学光纤高很多,利用光子晶体光纤设计偏振

基金项目:国家自然科学基金(No.61201193)资助

第一作者:贺锋涛(1974-),男,副教授,博士,主要研究方向为光波导及光学非线性器件等. Email:hefengtiao@xupt.edu.cn

通讯作者:孙力(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学非线性器件等. Email:sunli913@163.com

收稿日期:2016-03-30;录用日期:2016-05-31

<http://www.photon.ac.cn>

光分束器可以有效地缩短其所需要的长度,使光学器件的高度集成化得以实现.光子晶体光纤有许多优良的光学性质,比如:高非线性^[3]、大的双折射^[4-5]及反常色散^[6]等,加之,1995年首个光子晶体光纤样品的偏振性质被报道^[7],从而得到了许多科研工作者的深入研究.由光子晶体光纤组成的偏振光分束器,已有相关报道.2004年,Saitoh等提出了一种光子晶体光纤偏振光分束器,此分束器在1.9 mm长的光纤上,消光比好于一20 dB的情况下,实现了37 nm的有效带宽^[8].同一年,Zhang等成功设计出了在1.7 mm长的光纤上实现40 nm有效带宽的光子晶体光纤偏振光分束器^[9];2005年,Florous等设计的光纤偏振光分束器实现了在15.4 mm光纤长度下的偏振光分束功能^[10];2006年,L. Rosa等提出了一种在20 mm的光纤长度下,可实现一23 dB的消光比,同时具有90 nm的有效带宽的光子晶体光纤偏振光分束器^[11].2010年,Chen等在5.9 mm长的光子晶体光纤下设计实现了101 nm的偏振光有效分束带宽^[12];2011年,Li等提出了一种在4.72 mm光纤长度下可实现190 nm的有效分束带宽的偏振光分束器^[13];2013年,Lu等设计的分束器在72 mm长的情况下有效带宽更是达到了400 nm^[14];2014年,Jiang等提出的分束器在1.55 μm 光波长处消光比达到118.7 dB,并且只需要119.1 μm 的超短光纤长度^[1].

在光子晶体偏振光分束器的研究进展中,基于光子晶体光纤的偏振光分束器正逐步向着高消光比、宽带宽、短长度的方向发展.本文提出一种基于氟掺杂的双芯光子晶体光纤偏振光分束器.此分束器由7个椭圆空气孔组成,通过调节椭圆空气孔的椭圆率及周边圆形空气孔的半径,对结构进行优化.

1 模型建立与理论分析

在光子晶体光纤偏振光分束器中,影响分离两正交偏振光性能的因素不仅与选用的材料有关,还与设计的光子晶体光纤的结构有着紧密的联系.当设计的光子晶体光纤的结构不同时,会对光子晶体光纤的双折射产生影响^[15].本文在文献[1]的结构基础上考虑水平方向上存在着模式泄露从而会有附加限制损耗等不利因素进而对所提出的结构进行改进.同时考虑到光纤材料也会对分束器的性能产生较大的影响,因此在传统二氧化硅(Silicon Dioxide, SiO_2)材料中进行氟掺杂,进而对材料的色散性质进行适当的调节,所设计的光子晶体光纤偏振光分束器截面示意图如图1.

此光子晶体光纤由三角形空气孔晶格及纤芯中间的矩形空气孔晶格构成,圆形及椭圆形空气孔之外部分为氟掺杂 SiO_2 材料,即衬底材料.对于三角形晶格部分,其晶格周期为1.1 μm ,矩形晶格垂直方向相邻

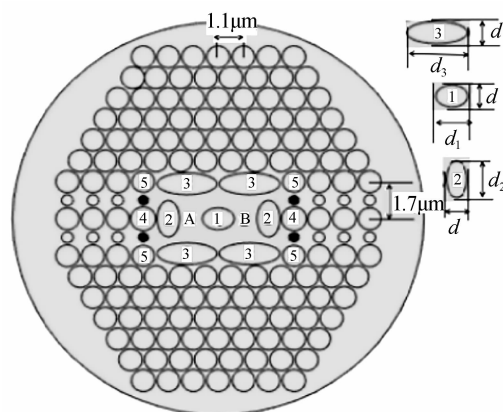


图1 氟掺杂双芯光子晶体型光纤截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the cross section composition of fluorine doped double core photonic crystal fiber. 大圆形空气孔间的距离为1.7 μm ,水平方向相邻圆形空气孔之间的距离为1.1 μm .椭圆空气孔1位于光子晶体光纤的圆心处,对应的椭圆率定义为 $\eta_1 = d_1/d$.两个椭圆空气孔2分别位于椭圆空气孔1的水平方向两侧,与椭圆1间的距离为2.2 μm ,椭圆率 $\eta_2 = d_2/d$.椭圆空气孔3分别位于椭圆空气孔1的左上、左下、右上及右下四个地方,与椭圆空气孔1间的距离为1.6 μm ,椭圆率 $\eta_3 = d_3/d$.上述所述的椭圆率公式中 $d = 0.5 \mu\text{m}$ 为固定值.并且这四个椭圆3关于椭圆1中心对称,同时同一水平方向上的椭圆3相距2.75 μm .对于对光子晶体光纤有效折射率具有较大调节作用的功能性空气圆孔4和5,其半径分别记为 d_4 和 d_5 .对有效折射率具有微调作用的四个小圆空气孔(如图1中的黑圆点),其半径记为 d_6 .同时,在矩形晶格中,大圆空气孔与小圆空气孔间的距离为0.85 μm .除上述所述的具体空气孔位置外,其余空气孔间的距离为1.1 μm ,空气孔的半径为0.5 μm .上述所述的具体数字及符号所代表的空气孔位置及尺寸详见图1.由上述空气孔组成的直径为18 μm 的光子晶体光纤形成了可用于限制并传输光的A和B两个导光芯路径.偏振光分束器正是通过这两个路径将两正交偏振态的光波分离.

偏振光分束器分离两个正交态光波的原理可以用耦合模理论解释.即在光纤中,相互紧邻的两芯之间光波发生耦合,具体表现为当光波从其中一个芯输入时,随着传输距离的增加,此芯中的部分或全部光波能量会转移到光子晶体光纤的另外一个纤芯中,随后又会返回到原纤芯中,从而光波能量在两纤芯中反复交换.在此原理的基础上,对于具有中心对称的导光结构,简并结构的 x 偏振光及 y 偏振光将被解除简并态.从而在这样的导光结构中将存在四个非简并态模式,即: x 偏振偶模、 x 偏振奇模、 y 偏振偶模及 y 偏振奇模.由于偶偏振模和奇偏振模具有相同的偏振方向,当这些偏振模在光纤中传输时,发生模耦合现象.对于 x 偏振模

和 y 偏振模,模耦合长度 L_c 表示为^[10]

$$L_c^{x,y} = \frac{\lambda}{|2(n_e^{x,y} - n_o^{x,y})|} \quad (1)$$

式中, λ 为入射光自由空间波长, $n_e^{x,y}$ 和 $n_o^{x,y}$ 为 x 偏振和 y 偏振对应的偶模及奇模的有效模折射率.上标 x 、 y 分别表示 x 偏振及 y 偏振.耦合长度 L_c 表示光能量从芯 A 传输到芯 B 或从芯 B 传输到芯 A 所需要的光纤长度.式(1)是光子晶体光纤分离两正交偏振光的机制在数学上的描述.即通常 x 偏振光和 y 极化光由于有效模折射率的不同,耦合长度 L_c^x 和 L_c^y 通常是不相等的,当两正交偏振光同时注入 A、B 两芯中的其中一个芯时,通过选取适当的光纤长度,从而在输出端使得两偏振光中的一个偏振态的光波尽可能多的从另一纤芯中输出,而保持另一偏振态的光沿输入芯的输出端输出,进而使得两正交偏振光在输出端得到有效的分离.因此,结合上述理论,通过调节 η_1 、 η_2 、 η_3 、 d_4 、 d_5 及四个小圆形空气孔 d_6 (图 1 中的四个小黑色圆)的半径对设计的光子晶体光纤的有效折射率进行调节进而对两正交偏振模的耦合长度进行调节.

2 结构优化及数值仿真结果与分析

2.1 氟掺杂双芯型光子晶体光纤结构优化

为设计出超短长度高消光比的偏振光分束器,本文采用的光子晶体光纤背景材料为掺氟 SiO_2 ,其折射率表达式为^[14,16]

$$n_{\text{F-SiO}_2} = (1 - 0.96\%)n_{\text{SiO}_2} \quad (2)$$

式中

$$n_{\text{SiO}_2}^2(\lambda) = 1 + \sum_{n=1}^3 \frac{B_n \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_n^2} \quad (3)$$

$B_1 = 0.6961663$, $B_2 = 0.4079426$, $B_3 = 0.8974794$, $\lambda_1 = 0.0684043 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.1162414 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 9.896161 \mu\text{m}$.通过式(2),结合基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 建模仿真,调节设计结构的 η_1 、 η_2 等结构参量即可对此光子晶体光纤结构进行优化.本文设计的氟掺杂双芯型光子晶体光纤,在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处的 TE 偏振奇模、偶模及 TM 偏振奇模、偶模的截面偏振模场分布如图 2.

通常,TE 模中电场方向与水平方向平行,TM 模中电场方向与水平方向垂直;A、B 两芯中偶模模斑电场方向一致,奇模模斑电场方向相反.模场分布及电场方向从图 2 可明显地观察到.因此,本文设计的掺氟光子晶体光纤可以很好地将 TE、TM 奇偶模限制在 A、B 芯中,可以用来设计偏振光分束器.

对于两正交偏振光,在光子晶体光纤中传输时的耦合长度是不相同的,即: $L_x \neq L_y$ (L_x 表示 TE 偏振光的耦合长度, L_y 表示 TM 偏振光的耦合长度).这说明一个完整的光能量从纤芯 A 传输进纤芯 B 或从纤芯 B

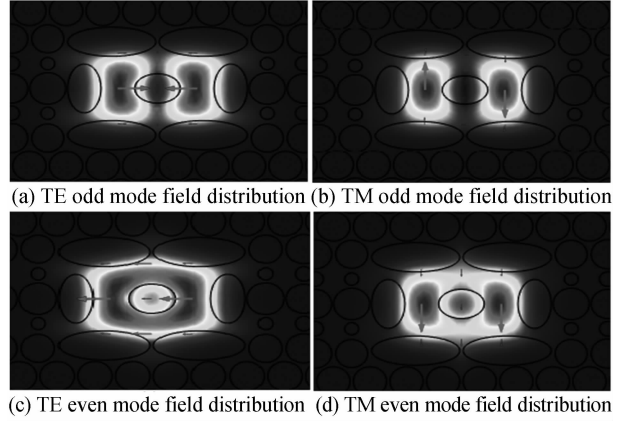


图 2 TE、TM 奇、偶偏振模模场分布图

Fig. 2 TE, TM odd, even Polarization mode field distribution diagram

传输到纤芯 A 对于 x 偏振光和 y 偏振光,所需的光纤长度是不同的.因此,为了设计出具有高消光比的偏振光分束器,需要找到一种设计依据.由于耦合长度反映了光传输路径,选取耦合长度比 (Coupling Length Ratio, CLR) 作为设计有效偏振光分束器的一个参考依据,表示为^[1]

$$\text{CLR} = \frac{L_y}{L_x} = \frac{m}{n} \quad (4)$$

式中, m 、 n 为正整数.为获取超短长度、高消光比的偏振光分束器,通常 CLR 的最优值为 2 或 1/2.因为当偏振光分束器的 CLR 为此优化值时,取其中一个偏振光耦合长度作为光纤的长度,就可以将两偏振光高效分离.因此,通过调节结构中的一些参量使 CLR 值尽可能地接近 2 或 1/2.考虑到 $1.55 \mu\text{m}$ 是一个重要的通信波长,因此,选定 $1.55 \mu\text{m}$ 的光波长作为参考波长对所设计的光子晶体光纤偏振光分束器的结构参量进行优化.

氟掺杂双芯光子晶体光纤偏振光分束器的优化参量有:椭圆 1 的椭圆率 η_1 、椭圆 2 的椭圆率 η_2 、椭圆 3 的椭圆率 η_3 、空气圆孔 4 的半径 d_4 、空气圆孔 5 的半径 d_5 以及小空气圆孔(图 1 中的黑点所示)半径 d_6 .参量的优化对耦合长度及 CLR 的影响如图 3.

从图 3(a)可看出在其它结构参量不变的情况下,当增大椭圆 1 的椭圆率时,TE 偏振光的耦合长度(即: L_c^x)随着椭圆 1 的椭圆率增大而缓慢减小,TM 偏振光的耦合长度(即: L_c^y)随着椭圆 1 的椭圆率增大而增大,并相对于 TE 偏振,变化量要大一些.同时耦合比也随椭圆 1 偏振率的增加而变大.考虑到要设计高消光比短长度的偏振光分束器,本文选取耦合比 (CLR) 接近 2 所对应的椭圆 1 的椭圆率 $\eta_1 = 1.37$.从图 3(b)及(c)可看出在保持其它参量一定的情况下,增大椭圆 2 的椭圆率时,TE、TM 偏振光的耦合长度同时减小,增大椭圆 3 的椭圆率时,TE、TM 偏振光的耦合长度同时增

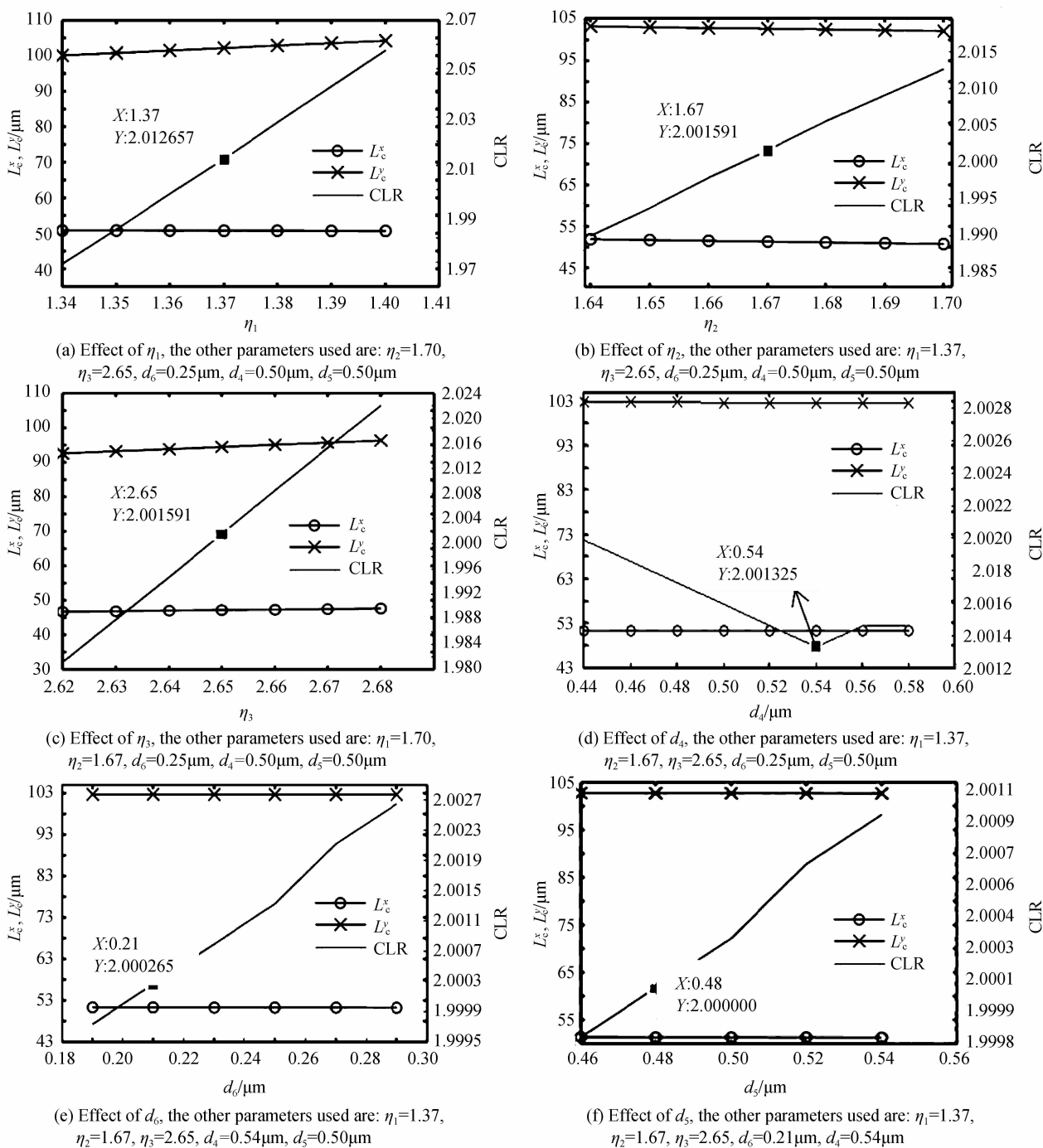


图 3 不同结构参数的优化对耦合长度及耦合比的影响

Fig. 3 The effect of different structural parameters optimization on coupling length and coupling ratio

加,但是耦合比都随着椭圆率的增大而变大.因此,结合仿真图取耦合比靠近 2 所对应的椭圆率参数作为对应结构优化时的结构参数.即: $\eta_2=1.67$ 、 $\eta_3=2.65$.图 3(d)为 $\eta_1=1.37$ 、 $\eta_2=1.67$ 、 $\eta_3=2.65$ 的优化椭圆率,其它参量一定情况下绘制的耦合长度及耦合比随 d_4 变化的结果.由图 3(d)可看出整体上 TE、TM 偏振光的耦合长度都随空气圆孔 4 半径的增大而增大,但耦合比却随着空气孔 4 半径的增大先减小后增大,这说明当空气圆孔 4 的半径小于 $0.54\mu\text{m}$ 时,随着空气孔 4 半径的增大 TM 偏振光的耦合长度增长量小于 TE 偏

振光耦合长度的增长量;当空气圆孔 4 的半径大于 $0.54\mu\text{m}$ 时,随着空气孔 4 半径的增大 TM 偏振光的耦合长度增长量大于 TE 偏振光耦合长度的增长量.结合图 3(d),很明显可看出取 $d_4=0.54\mu\text{m}$.从图 3(e)和 (f),可看到,当增大小圆孔或空气圆孔 5 的半径时,TE、TM 偏振光的耦合长度有略微的变化,耦合比随着对应半径的增加微小增加.这就可以借助小圆孔和空气圆孔 5 的微调作用,使得 CLR 更接近 2.因此,通过调节这两类空气孔,取 $d_6=0.21\mu\text{m}$ 、 $d_5=0.48\mu\text{m}$,最终将 CLR 调节到等于 2.此时,所设计的偏振光分束

器认为具有最优结构尺寸,所对应的结构参量为: $\eta_1 = 1.37$ 、 $\eta_2 = 1.67$ 、 $\eta_3 = 2.65$ 、 $d_6 = 0.21 \mu\text{m}$ 、 $d_4 = 0.54 \mu\text{m}$ 、 $d_5 = 0.48 \mu\text{m}$ 。

2.2 氟掺杂双芯型光子晶体光纤在优化结构下的仿真结果与分析

对于所设计的偏振光分束器,当 TE 偏振光和 TM 偏振光同时进入芯 A 或芯 B 时,光束在光纤中传输一段距离后,在给定光纤长度的输出端两种偏振光分开分别通过 A 和 B 芯输出,达到将正交偏振光分开的作用。因此,需要确定给定的光子晶体光纤在优化结构下所需要的光纤长度 L 。假设给定输入光的能量 $P_{\text{in}} = P_{\text{in}}^{\text{TE}} + P_{\text{in}}^{\text{TM}}$,那么在输出端芯 A 和芯 B 的光能量表示为^[14]

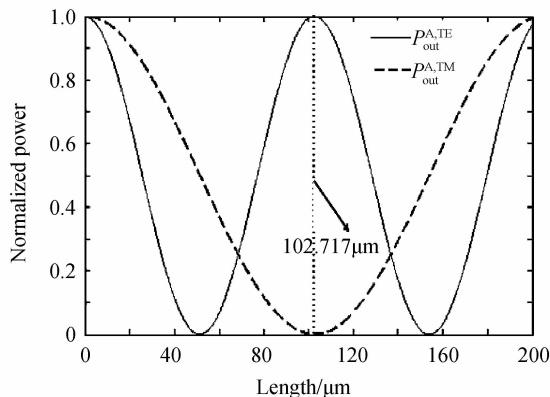
$$P_{\text{out}}^{\text{A}} = P_{\text{out}}^{\text{A,TE}} + P_{\text{out}}^{\text{A,TM}} = P_{\text{in}}^{\text{TE}} \cos^2\left(\frac{\pi L}{2L_c^{\text{TE}}}\right) + P_{\text{in}}^{\text{TM}} \cos^2\left(\frac{\pi L}{2L_c^{\text{TM}}}\right) \quad (5)$$

$$P_{\text{out}}^{\text{B}} = P_{\text{out}}^{\text{B,TE}} + P_{\text{out}}^{\text{B,TM}} = P_{\text{in}}^{\text{TE}} \sin^2\left(\frac{\pi L}{2L_c^{\text{TE}}}\right) + P_{\text{in}}^{\text{TM}} \sin^2\left(\frac{\pi L}{2L_c^{\text{TM}}}\right) \quad (6)$$

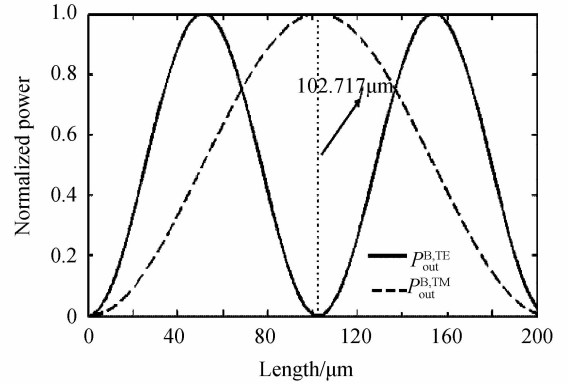
式中, L 为光传输距离。

为找出能够将两正交偏振光高效率分离的光纤长度,本文对在优化结构参量下的氟掺杂双芯光子晶体光纤中两偏振光在两芯中随长度的传输过程进行研究。以 $1.55 \mu\text{m}$ 波长的通信光波作为入射光波,则两偏振光在 A、B 两芯中的归一化能量分布与光纤长度 L 的对应关系如图 4。

从图 4 可看出,两正交偏振光在不同光纤长度处,在芯 A 或芯 B 中各自存在的光能量不同,并且从图 4 可知,在 $L = 102.717 \mu\text{m}$ 时,TE 偏振光几乎完全局限在芯 A 中,同时,TM 偏振光也几乎完全被限制在芯 B 中。因此,当截取光纤的长度为 $102.717 \mu\text{m}$ 时,就设计出了高效率的偏振光分束器。需要注意的是,由于设计的偏振光分束器的长度只有一百多个微米,属于超短型,从而传输损耗可以不予考虑。同时,设计的偏振光



(a) The core A output polarized light normalized output optical energy and fiber length curve



(b) The core B output polarized light normalized output optical energy and fiber length curve

图 4 优化结构尺寸下 A、B 两芯中两偏振光归一化输出光能量与光纤长度的关系

Fig. 4 The relation graph of polarized light normalized output optical power and fiber length in the two core of A and B at optimized structure size

分束器绕 A、B 两芯的各个方向都是由周期性的空气孔组成,因此限制损耗也很小。综合考虑,本文仿真时忽略分束器的光学损耗。

衡量偏振光分束器性能好坏的一个重要参量为偏振光分束器的消光比(Extinction Ratio, ER),即当一束正交光注入芯 A 或芯 B,经过一定长度的传输后,在对应输出端芯 A 或芯 B 输出的两偏振光能量的比值取对数再扩大十倍所得的数值,数学表达式为^[8]

$$\text{ER} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{(A/B)x\text{-out}}}{P_{(A/B)y\text{-out}}} \right) \quad (7)$$

设计的偏振光分束器在优化结构尺寸下的消光比随波长的变化关系曲线如图 5。

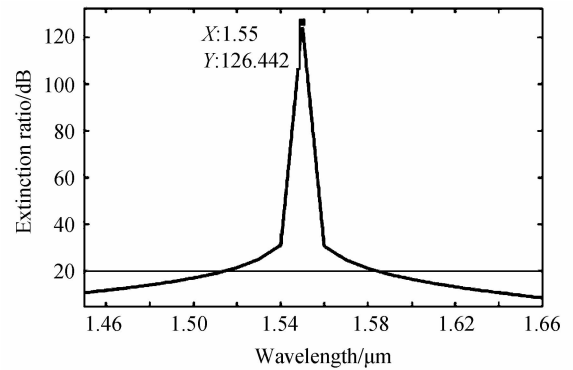


图 5 优化的双芯型光子晶体光纤结构下两偏振光消光比与光波波长的关系

Fig. 5 The relationship between the polarization extinction ratio and wavelength under the optimized structure of dual core photonic crystal fiber

通常,对于两正交态偏振光,当消光比达到 20 dB 以上时,就可认为这两个偏振态的光得到了有效分离^[1]。从图 5 可看到,设计的氟掺杂双芯光子晶体光纤长度取 $102.717 \mu\text{m}$ 时,在 $1.550 \mu\text{m}$ 通信波长处两偏振光的消光比达 126.442 dB。并且设计的偏振分束器

可实现 60 nm 的有效带宽 ($ER > 20$ dB), 对应的波长范围为 1.520~1.580 μm . 因此, 本文设计的偏振光分束器可在超短长度下高效率分离两正交偏振光.

3 结论

本文提出了一种基于氟掺杂双芯光子晶体光纤的偏振光分束器, 通过调节设计光子晶体光纤的一些结构参量对此结构进行优化, 并研究了此分束器分离两束正交偏振光的性能. 研究表明, 在优化结构尺寸下, 光纤长度为 102.717 μm 时, 可有效地将 1.550 μm 附近 60 nm 带宽的正交偏振光进行有效的分离, 并且在 1.550 μm 处消光比可达 126.442 dB. 设计的偏振光分束器在光通信网络以及光功能集成器件的研究中将具有实际应用价值.

参考文献

- [1] JIANG H, WANG E, ZHANG J, *et al.* Polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(25): 30461-30466.
- [2] PENG G D, TJUQIARTO T, CHU P L. Polarisation beam splitting using twin-elliptic-core optical fibres[J]. *Electronics Letters*, 1990, **26**(10): 682-683.
- [3] LIU Jie, YANG Chang-xi, CLAIRE G, *et al.* A novel photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened dispersion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **26**(10): 1569-1574.
刘洁, 杨昌喜, Claire Gu, 等. 一种新型高非线性色散平坦光子晶体光纤结构[J]. *光子学报*, 2006, **26**(10): 1569-1574.
- [4] ORTIGOSA-BLANCH A, KNIGHT J C, WADSWORTH W J, *et al.* Highly birefringent photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(18): 1325-1327.
- [5] LIANG Jian, YUN Mao-jin, KONG Wei-jin, *et al.* A novel highly birefringent photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(sup1): 39-42.
梁健, 云茂金, 孔伟金, 等. 新型高双折射光子晶体光纤特性分析[J]. *光子学报*, 2010, **39**(sup1): 39-42.
- [6] ALIRAMEZANI M, NEJAD S M. Numerical analysis and optimization of a dual-concentric-core photonic crystal fiber for broadband dispersion compensation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, **42**(8): 1209-1217.
- [7] BIRKS T A, ROBERTS P J, RUSSELL P S J, *et al.* Full 2-D photonic bandgaps in silica/air structures [J]. *Electronics Letters*, 1995, **31**(22): 1941-1942.
- [8] SAITOH K, SATO Y, KOSHIBA M. Polarization splitter in three-core photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(17): 3940-3946.
- [9] ZHANG L, YANG C. Polarization-dependent coupling in twin-core photonic crystal fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(5): 1367-1373.
- [10] FLOROUS N, SAITOH K, KOSHIBA M. A novel approach for designing photonic crystal fiber splitters with polarization-independent propagation characteristics[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(19): 7365-7373.
- [11] ROSA L, POLI F, FORONI M, *et al.* Polarization splitter based on a square-lattice photonic-crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(4): 441-443.
- [12] CHEN M Y, SUN B, ZHANG Y K, *et al.* Design of broadband polarization splitter based on partial coupling in square-lattice photonic-crystal fiber [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(16): 3042-3048.
- [13] LI J, WANG J, WANG R, *et al.* A novel polarization splitter based on dual-core hybrid photonic crystal fibers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, **43**(4): 795-800.
- [14] LU W, LOU S, WANG X, *et al.* Ultrabroadband polarization splitter based on three-core photonic crystal fibers [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(3): 449-455.
- [15] WANG J, JIANG C, Hu W, *et al.* Dispersion and polarization properties of elliptical air-hole-containing photonic crystal fibers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(5): 913-917.
- [16] AGRAWAL G P. *Lightwave technology: components and devices*[M]. John Wiley & Sons, 2004.