

偏振可调的太赫兹单偏振单模光子晶体光纤

李珊珊¹ 郝霞¹ 白晋军² 常胜江^{1,3*}

¹南开大学现代光学研究所, 天津 300071

²天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387

³天津市光电传感器与传感网络技术重点实验室, 天津 300071

摘要 采用折射率匹配耦合法, 提出了一种偏振可调的单偏振单模太赫兹光纤。通过在纤芯设计非对称微结构来实现芯模 x 、 y 偏振模式的分裂; 在包层空气孔中填充折射率匹配液来引入缺陷模式, 通过调整液体折射率来分别实现它与芯模 x 、 y 偏振模式的匹配。结果表明, 当液体折射率为 1.288 时, x 偏振模式匹配。当入射光频率大于 0.73 THz 时, 偏振损耗比大于 100, 光纤以 y 偏振模式运转; 当入射光频率为 1 THz 时, 偏振损耗比达到最大值 1020。当液体折射率为 1.338 时, y 偏振模式匹配。当入射光频率在 0.87~0.93 THz 时, 偏振损耗比大于 100, 光纤以 x 偏振模式运转; 当入射光频率为 0.9 THz 时, 偏振损耗比达到最大值 118。该设计实现了光纤单偏振运转模式的切换, 具有宽带、可调、易于实现的特点。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 单偏振单模光纤; 折射率匹配耦合法

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0901005

Terahertz Single-Polarization Single-Mode Photonic Crystal Fiber with Tunable Polarization

Li Shanshan¹ Hao Xia¹ Bai Jinjun² Chang Shengjiang^{1,3}

¹Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

²School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

³Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology, Tianjin 300071, China

Abstract A terahertz single-polarization single-mode (SPSM) fiber with tunable polarization is proposed based on the index-matching coupling method. The asymmetric microstructure is designed in fiber core to split the x and y polarized core modes. The index matching liquid is filled into the air-hole of the fiber cladding, so that the x or y polarized core modes match the defect mode. The matching switch between the two polarized modes is realized by changing the refraction index of filled liquid. The results show that the x polarized mode matches when the refractive index of the liquid is 1.288. When the frequency of the incident light is higher than 0.73 THz, the polarization loss ratio of the fiber is bigger than 100, and the optical fiber operates in y -polarization mode. At the frequency of 1 THz, the polarization loss ratio reaches the maximum of 1020. The y polarized mode matches when the refractive index of the liquid is 1.338. From 0.87 THz to 0.93 THz, the polarization loss ratio of the fiber is bigger than 100, and the optical fiber operates in x -polarization mode. At the frequency of 0.9 THz, the polarization loss ratio reaches the maximum of 118. This design has realized the switch of the single fiber polarization operation mode, and has features such as broadband, tunable and easy to fabricate.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; single-polarization single-mode fiber; index-matching coupling method

OCIS codes 060.2280, 060.5295, 230.5440

收稿日期: 2016-04-25; 收到修改稿日期: 2016-05-19

基金项目: 国家 973 计划(2014CB339800)、国家自然科学基金(61171027)、高等学校博士学科点专项科研基金(20131201120004)、天津市科技计划项目(13RCFGX01127)

作者简介: 李珊珊(1980—), 女, 博士, 工程师, 主要从事光纤器件方面的研究。E-mail: ss@nankai.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: sjchang@nankai.edu.cn

1 引 言

随着光纤制造工艺和通信基础元器件性能的提高,光纤通信系统不断向着高速率、长距离的方向发展。在这种趋势下,光网络逐步由“距离受限系统”转变为“色散受限系统”,而偏振模色散(PMD)将会对整个系统的性能产生重大影响。为避免 PMD 和偏振串扰的影响,人们通常会采用保偏光纤来代替普通单模光纤。然而,即使是模式双折射较高的高双折射光纤,在经过长距离传输后,也无法稳定地保持光信号的偏振状态。为了解决该问题,一些学者提出采用单偏振单模(SPSM)光纤来传输光信号^[1-9]。SPSM 光纤只允许一种可能的偏振模式稳定存在,因此从根本上避免了 PMD 的影响。

SPSM 光纤通常有两种实现方式。1) 对结构进行特殊的设计,使光纤中两个偏振模式具有不同的截止波长。在某一波段内,光纤能够实现单偏振运转^[1,6,8]。2) 基于模耦合理论,在光纤中引入某种缺陷,使光纤中某个偏振模式与缺陷模式相互耦合,增大其传输损耗。与之正交的偏振模式为非匹配模式,损耗较小。在传输一段距离后,匹配偏振模式将被完全耗散掉,光纤中就只保留了一种偏振模式^[2,3,5,9,10]。Fini 等^[2]采用折射率匹配耦合法,实现了对空芯微结构光纤高阶模的抑制。Chen 等^[5]提出了一种在高双折射光子晶体光纤(PCF)中实现单偏振操作的方法,通过引入缺陷波导来实现对某一偏振态的抑制,该偏振态的限制损耗能够提高 4 个数量级。Hou 等^[9]设计了一种宽带可调的 SPSM 光纤,这种光纤能够实现 1.25~1.6 μm 的 SPSM 传输,工作波长覆盖了 1310 nm 和 1550 nm 两个重要的通信窗口,可调范围为 350 nm。Zheng 等^[6]提出并通过实验验证了一种基于液晶填充的可调 SPSM-PCF,当温度变化时,液晶的折射率也发生变化,从而影响光纤中偏振模式的匹配。实验表明,当温度由 25 $^{\circ}\text{C}$ 变为 65 $^{\circ}\text{C}$ 时,SPSM-PCF 的起始波长由 1591 nm 变为 1679 nm,调节敏感度为 1.975 nm/ $^{\circ}\text{C}$,两个正交偏振模式的消光比为 17 dB。

最初提出的 PCF 分为实芯和空芯两种,它们有着完全不同的导光机制^[11-13]。大多数常见材料都强烈吸收太赫兹(THz)波,因此基于全内反射原理的实芯光纤在该波段损耗巨大。在这种背景下,人们将注意力转向空芯 THz 光纤^[14-15]。空芯光纤是基于光子带隙原理(PBG)导光的,由于导模的大部分能量都集中在空气中传输,因此它的损耗极低,但这种光纤的带宽较窄,且对包层结构的周期性结构有较高的要求。Chen 等^[16]于 2007 年提出了纤芯带有微结构的高双折射 PCF,它能够同时实现较高的模式双折射和较低的限制损耗。该光纤基于全内反射原理传导光信号,在带宽方面更有优势,且对包层结构的周期性和形变要求不高。

本文采用折射率匹配耦合法,设计了一种纤芯微结构为四方晶格排列的 THz-SPSM-PCF。由于纤芯微结构为非对称排列,因此能够引入足够高的模式双折射,从而实现 x 、 y 两个偏振模式的分裂;再通过对包层空气孔中填充匹配液来引入缺陷模式,实现光纤中某一偏振模式的匹配。

2 光纤设计和数值模拟结果

采用微结构纤芯 PCF,通过对纤芯结构参数的调整和液体填充来实现光纤的单偏振单模特性和偏振可调。与传统实芯和空芯 PCF 相比,这种光纤在 THz 功能器件设计方面具有更明显的优势,如带宽较宽、损耗较低、对包层周期性结构要求不高等。在设计中,为实现宽带特性,需要保证光纤基于全内反射原理导光,即纤芯的有效折射率要大于包层的有效折射率,因此纤芯空气孔的占空比要小于包层的占空比。在 THz 波段,需保证光纤包层空气孔的尺寸和 THz 波长在同一数量级。

SPSM-PCF 横截面结构如图 1(a)所示。光纤包层空气孔为三角晶格排列,光纤的直径为 $D=3700 \mu\text{m}$,包层空气孔的直径 $d_1=320 \mu\text{m}$,晶格常数 $\Lambda_1=400 \mu\text{m}$,空气孔直径与晶格常数之比 $d_1/\Lambda_1=0.8$;纤芯空气孔为四方晶格排列,其直径 $d_2=32 \mu\text{m}$,沿 x 方向的晶格常数 $\Lambda_{2x}=40 \mu\text{m}$,沿 y 方向的晶格常数 $\Lambda_{2y}=80 \mu\text{m}$ 。光纤基底材料采用环烯烃共聚物 COC(商品名:TOPAS),它是一种柔软且易于弯曲的聚合物材料,在 THz 波段具有较低的材料吸收损耗系数,折射率为 $n=1.53$,且色散很小^[17-18]。

由于纤芯微结构是非对称的,因此该光纤为高双折射光纤。它的基模包括 x 、 y 两个分裂的偏振模式,要想实现光纤的单偏振特性,就需要增大其中一个偏振模式的损耗,而使另一个偏振模式的损耗较小。基于折射率匹配耦合法(ICMC)对包层空气孔填充特定折射率的液体。该方法的原理是在光纤包层中引入缺陷模式,当纤芯某一偏振模式的有效折射率与缺陷模式相一致时,该模式即为匹配偏振模式,它将与缺陷模式

发生耦合,其模场更容易向外耗散,因此匹配偏振模式具有更大的传输损耗。

对光纤包层中两个空气孔进行填充后的光纤结构如图 1(a)所示。为研究光纤的多芯耦合现象,将 SPSM 光纤拆分为两个等效光纤,即如图 1(c)和 1(d)所示的等效高双折射光纤 A 和实芯匹配光纤 B。通过大量计算和数值模拟,发现调整填充液体的折射率能够改变等效光纤 B 有效折射率曲线的位置,使得缺陷模式分别与纤芯的 x 偏振模式和 y 偏振模式发生耦合,从而实现 SPSM 光纤偏振模式可调。当填充液体的折射率为 1.288 时, x 偏振模式为匹配偏振模式,与缺陷模式发生耦合,从而具有较大的损耗,此时光纤以 y 偏振模式单偏振运转;当填充液体的折射率为 1.337 时, y 偏振模式为匹配偏振模式,与缺陷模式发生耦合,从而具有较大的损耗,此时光纤以 x 偏振模式单偏振运转;当液体的折射率为其它值时,缺陷模式将不与纤芯基模的任何一个偏振模式相匹配,光纤不再具有 SPSM 特性。因此,下文重点研究在 $n = 1.288$ 和 $n = 1.337$ 这两个折射率匹配点上光纤的特性。

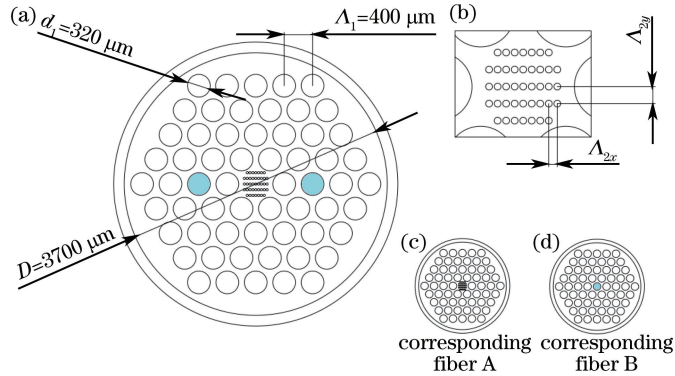


图 1 (a) SPSM 光纤横截面; (b) 纤芯放大图; (c) 等效光纤 A (高双折射 PCF); (d) 等效光纤 B (实芯匹配 PCF)

Fig. 1 (a) Cross section of the proposed SPSM fiber; (b) enlarged figure of the fiber core region; (c) corresponding fiber A (PCF with highly birefringent core); (d) corresponding fiber B (PCF with solid core matched)

采用全矢量有限元(FEM)法对光纤进行模式分析。FEM 被广泛应用于光学器件的设计和研究领域,它的有效性已经被大量研究所证明^[1-10,14-16]。求解光纤稳态的模场分布情况,从频域上描述更为方便,能够大大提高计算效率。在计算时给出材料和空气的折射率就能够构建波动方程的本构关系。采用散色边界条件,增加完美匹配层(PML),以此来模拟光纤被放置在无限大空间的情况。采用 FEM 方法进行数值模拟时,网格的划分是非常重要的一步,因为网格的形状和数量将会影响计算的精度。该文采用自由剖分的三角网格,因为这种网格对模拟复杂的平面图形具有较高的精度。

图 2 给出了等效光纤 A 的有效折射率和模式双折射。由于等效光纤 A 纤芯微结构为四方晶格排列, x 方向和 y 方向具有不同的晶格常数,因此该结构具有非对称性。如图 2 所示,光纤中 x 偏振模式和 y 偏振模式的有效折射率发生了明显的分裂,光纤具有很高的模式双折射。当入射光频率在 $0.5 \sim 1$ THz 时,光纤的模式双折射始终都在 10^{-2} 量级,在该工作频段,模式双折射呈现出先增大后减小的趋势;当入射光频率为 0.8 THz 时,光纤的模式双折射达到最大值 1.71×10^{-2} 。图 2 右下角插图给出了当入射光频率为 0.8 THz 时,光纤 A 中 x 偏振和 y 偏振基模稳态的模场分布。

图 3 给出了当纤芯填充液体的折射率为 1.288 时,等效光纤 B 的有效折射率和模式双折射。光纤 B 包层为三角晶格结构,纤芯为对称结构,因此光纤中 x 、 y 两个偏振模式是近似简并的。从图 3 可以看出,当入射光频率在 $0.5 \sim 1$ THz 时, x 、 y 两个偏振模式的有效折射率曲线几乎是重合的,光纤的模式双折射在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 量级,变化趋势没有明显规律。图 3 右下角插图给出了入射光频率为 0.8 THz 时光纤 B 中 x 偏振和 y 偏振基模稳态的模场分布。

光纤 A 为高双折射光纤,在光纤 A 包层的空气孔中填充液体,主要是为了使光纤芯模的某一偏振模式与缺陷模式相匹配,从而耦合到缺陷模式中,增大其传输损耗;同时,与之正交的另一偏振模式与缺陷模式不匹配,它们的折射率有较大差值,因此不会与缺陷模式发生耦合,从而能够保持较低的传输损耗。这样就构建了单偏振单模的光纤结构。

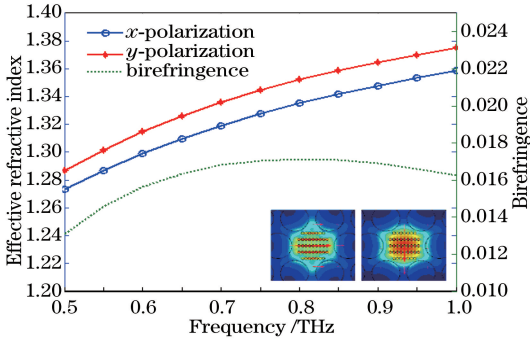


图 2 等效光纤 A 的有效折射率和模式双折射
Fig. 2 Effective refractive index and modal birefringence of the corresponding fiber A

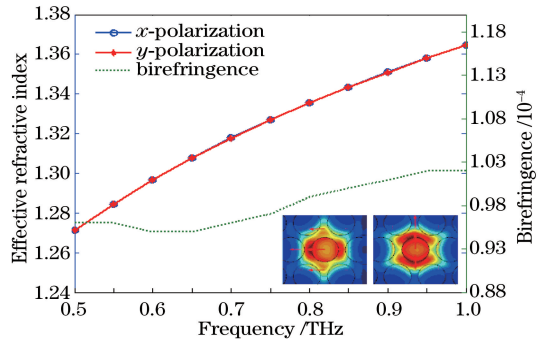


图 3 等效光纤 B 的有效折射率和模式双折射 ($n_B = 1.288$)
Fig. 3 Effective refractive index and modal birefringence of the corresponding fiber B ($n_B = 1.288$)

图 4 给出了当光纤 B 中填充液体的折射率为 1.288 时,等效光纤 A 和 B 的有效折射率曲线。由图 4 可知,光纤 A 和 B 中 x 偏振模式的有效折射率曲线在 0.5~1 THz 工作频段始终都非常接近,因此 x 偏振为匹配偏振模式;光纤 A 中 y 偏振模式与缺陷模式的有效折射率有较大差值,因此 y 偏振为非匹配模式,不会与缺陷模式发生耦合;当入射光频率为 0.8 THz 时,光纤 A 和 B 中 x 偏振模式会出现一个交点,此时 x 偏振模式的耦合最强烈。

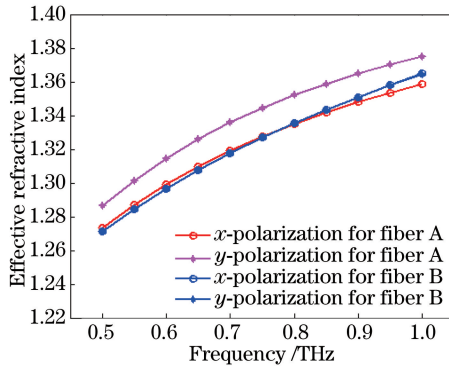


图 4 光纤 A 和光纤 B 的有效折射率曲线 ($n_B = 1.288$)

Fig. 4 Effective refractive index curves for fibers A and B ($n_B = 1.288$)

图 5 给出了 SPSM 光纤中 x 、 y 两偏振基模稳态的模场分布,其中,第一行为 x 偏振模式,第二行为相应工作频率的 y 偏振模式。由图 5 可知,光纤中 y 偏振模式始终都被很好地限制在纤芯中; x 偏振模式作为匹配模式,会与缺陷模式发生耦合;当入射光频率为 0.8 THz 时(图 4 中的折射率匹配点),光纤中 x 偏振模式与缺陷模式的耦合最为强烈。

图 6 给出了 $n_B = 1.288$ 时 SPSM 光纤的限制损耗。由图 6 可知,两个偏振模式的限制损耗随着入射光频率的增大而减小,且 x 偏振模式的限制损耗始终远大于 y 偏振模式。

定义光纤中两个偏振模式的限制损耗比 $\eta = C_{\text{loss}_x} / C_{\text{loss}_y}$ 。图 7 给出了当填充液体折射率为 1.288, x 偏

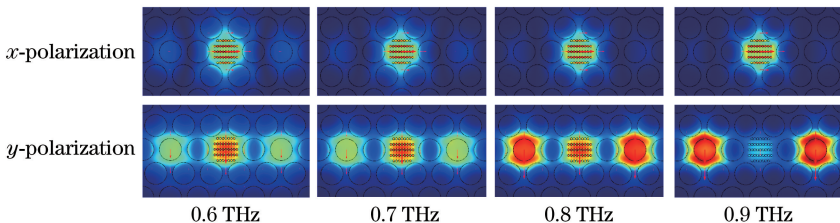


图 5 x 偏振模式匹配时,SPSM 光纤在不同工作频率基模稳态的模场分布 ($n_B = 1.288$)

Fig. 5 Steady-state fundamental mode field profiles of SPSM fiber at different operation frequencies when the x -polarization mode is matching ($n_B = 1.288$)

振模式为匹配偏振模式时 SPSM 光纤的偏振损耗比。由图 7 可知,当入射光频率大于 0.73 THz 时,光纤中两个偏振模式的损耗比大于 100,此时光纤以 y 偏振模式单偏振运转;当入射光频率为 1 THz 时,光纤的偏振损耗比达到最大值 1020,此时 x 偏振模式的限制损耗为 4.05×10^{-4} dB/km, y 偏振模式的限制损耗为 3.96×10^{-7} dB/km。

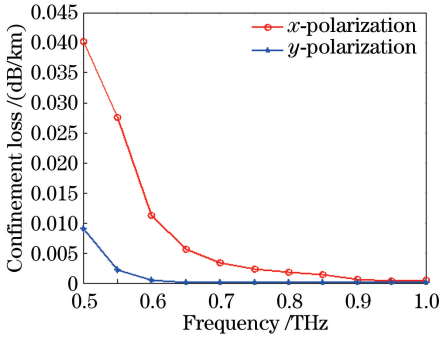


图 6 SPSM 光纤的限制损耗($n_B=1.288$)

Fig. 6 Confinement loss of the SPSM fiber ($n_B=1.288$)

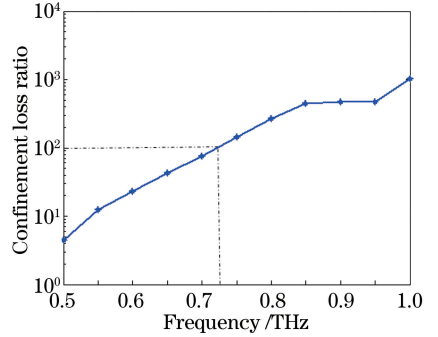


图 7 SPSM 光纤的偏振损耗比($n_B=1.288$)

Fig. 7 Polarization loss ratio of the SPSM fiber ($n_B=1.288$)

通过调整光纤中填充液体的折射率可以实现 SPSM 光纤偏振态的转换。增大填充液体的折射率,光纤 B 的有效折射率曲线上移。当 $n_B=1.338$ 时,光纤中的 y 偏振模式为匹配偏振模式,此时光纤中只有 x 偏振模式能够稳定传输。

图 8 给出了当 $n_B=1.338$ 时,等效光纤 A 和 B 的有效折射率匹配图。由图 8 可知,当入射光频率在 0.5 ~ 1 THz 时,两根光纤的 y 偏振模式几乎是重合的,此时 y 偏振模式为匹配偏振模式; x 偏振模式的有效折射率与缺陷模式有较大差值,因此 x 偏振模式不匹配;当入射光频率为 0.75 THz 时,光纤 A 和 B 中 y 偏振模式会出现一个交点,此时 y 偏振模式的耦合最强烈。

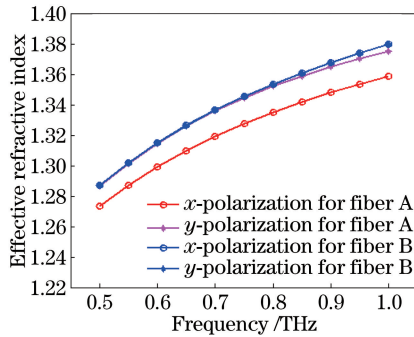


图 8 光纤 A 和光纤 B 的有效折射率匹配图($n_B=1.338$)

Fig. 8 Effective refractive index matching curves for fibers A and B ($n_B=1.338$)

图 9 给出了当填充液体的折射率为 1.338 时,SPSM 光纤中 x 、 y 偏振基模稳态的模场分布,其中,第一行为 x 偏振模式,第二行为相应工作频率的 y 偏振模式。与图 5 的情况相反,当光纤中 y 偏振模式为匹配偏振模式时,它将会与缺陷模式发生强烈耦合,从而具有较大的损耗,而光纤中 x 偏振模式始终被良好地限制在纤芯中,因此损耗较小。

图 10 给出了当填充液体折射率为 1.338 时,SPSM 光纤中 x 、 y 两个偏振模式的限制损耗。当入射光频率小于 0.55 THz 时,光纤中 x 偏振的限制损耗大于 y 偏振,但都在同一数量级,这主要是因为低频区,光纤对两个偏振模式的限制能力都不强;当入射光频率大于 0.55 THz 时,光纤中 y 偏振模式的限制损耗大于 x 偏振模式,此时 y 偏振模式更容易被耗散掉,光纤将以 x 偏振模式运转。

图 11 给出了当 $n_B=1.338$, y 偏振模式匹配时光纤的偏振损耗比。由图 11 可知,两偏振模式的损耗比小于 x 偏振模式匹配时的损耗比,这主要是因为包层的两个缺陷沿水平方向排列,破坏了水平方向空气孔的周期性,因此,即使芯模的 x 偏振模式和缺陷模式不匹配,也更容易扩散到光纤外,从而具有更大的限制

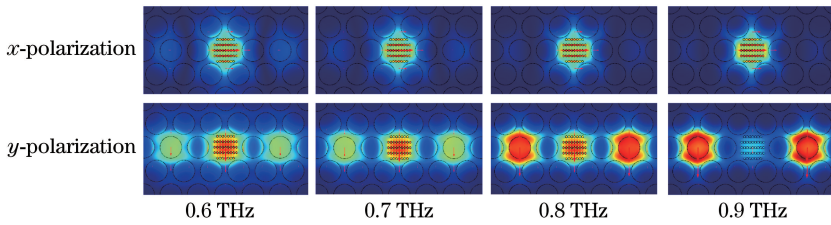


图 9 y 偏振模式匹配时, SPSM 光纤在不同工作频率基模稳态的模场分布 ($n_B=1.338$)

Fig. 9 Steady-state fundamental mode field profiles of SPSM fiber at different operation frequencies when the y -polarization mode is matching ($n_B=1.338$)

损耗; 当入射光频率在 0.87~0.93 THz 时, 两偏振模式的损耗比大于 100; 当入射光频率为 0.9 THz 时, 光纤的偏振损耗比最大, 达到 118。

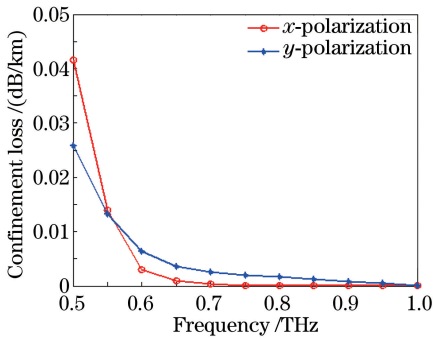


图 10 SPSM 光纤的限制损耗 ($n_B=1.338$)

Fig. 10 Confinement loss of the SPSM fiber ($n_B=1.338$)

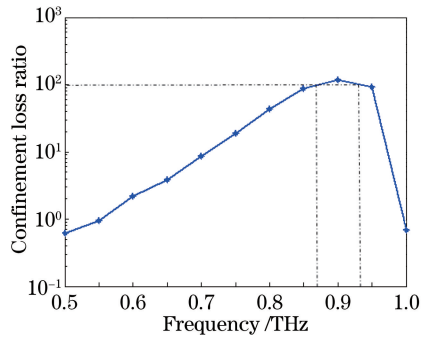


图 11 x, y 偏振模式的损耗比 ($n_B=1.338$)

Fig. 11 x, y -polarization loss ratio of the SPSM fiber ($n_B=1.338$)

3 分析与讨论

采用折射率匹配耦合法, 通过在微结构纤芯的 PCF 包层中填充液体的方法, 设计了一种偏振模式可调的 THz-SPSM 光纤。通过纤芯微结构的非对称设计来实现光纤芯模 x, y 两偏振模式有效折射率曲线的分裂, 再通过调整填充液体的折射率来实现与光纤中两个偏振模式的匹配, 进而实现光纤单偏振运转模式的切换。在数值模拟时, 考虑了偏振模式的限制损耗, 没有考虑填充材料的吸收损耗。在实验中, 如果采用高吸收损耗系数的填充液体, 光纤的 SPSM 特性将会更好, 可得到更大的偏振损耗比。又因为 THz 波段的高损耗材料是非常容易得到的, 因此, 在未来的实验研究中将会考虑该因素的影响, 采用高损耗折射率匹配液来进行进一步的实验研究。

4 结 论

通过在光纤包层填充折射率匹配液体的方法引入缺陷模式, 提出了一种偏振可调的 THz-SPSM 光纤。研究发现, 当填充液体折射率为 1.288 时, 光纤中 x 偏振模式为匹配偏振模式, x 偏振模式的限制损耗远大于 y 偏振模式, 光纤以 y 偏振模式单偏振运转; 当填充液体折射率变为 1.338 时, y 偏振模式为匹配偏振模式, y 偏振模式的限制损耗远大于 x 偏振模式, 光纤以 x 偏振模式单偏振运转。该设计具有宽带、可调、易于实现的特点, 对 THz 偏振及传感器件的设计和应用具有重要意义。

参 考 文 献

- Saitoh K, Koshiba M. Single-polarization single-mode photonic crystal fibers[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15 (10): 1384-1386.
- Fini J M. Aircore microstructure fibers with suppressed higher-order modes[J]. Opt Express, 2006, 14(23): 11354-11361.

- 3 Liu Xiaoyi, Zhang Fangdi, Zhang Min, *et al.* Numerical investigation on single-mode single-polarization photonic crystal fiber using resonant absorption effect[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(1): 301-307.
刘小毅, 张方迪, 张 民, 等. 基于谐振吸收效应的单模单偏振光子晶体光纤研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(1): 301-307.
- 4 Wang Hanyi, Ren Liyong, Zhang Yani, *et al.* Design of single-polarization single-mode micro-structured polymer optical fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(5): 684-687.
王韩毅, 任立勇, 张亚妮, 等. 单偏振单模微结构聚合物光纤的设计[J]. *中国激光*, 2007, 34(5): 684-687.
- 5 Chen M Y, Zhang Y K. Improved design of polarization-maintaining photonic crystal fibers[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(21): 2542-2544.
- 6 Zheng X B, Liu Y G, Wang Z, *et al.* Tunable single-polarization single-mode photonic crystal fiber based on liquid infiltrating[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(11): 709-711.
- 7 Geng Pengcheng, Zhang Weigang, Zhang Shanshan, *et al.* Design of new type single-polarization single-mode photonic crystal fiber with wide bandwidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0706001.
耿鹏程, 张伟刚, 张珊珊, 等. 新型宽带单偏振单模光子晶体光纤的设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0706001.
- 8 Chen H B, Wang H, Hou H L, *et al.* A terahertz single-polarization single-mode photonic crystal fiber with a rectangular array of micro-holes in the core region[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(18): 3726-3729.
- 9 Hou Y, Wang G Z. Broadband tunable single-mode single-polarization fiber[J]. *Opt Commun*, 2015, 351: 91-95.
- 10 Hou Y, Fan F, Zhang H, *et al.* Terahertz single-polarization single-mode hollow-core fiber based on index-matching coupling[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(8): 637-639.
- 11 Knight J C, Birks T A, Russell P S J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(7): 484-485.
- 12 Knight J C, Broeng J, Birks T A, *et al.* Photonic band gap guidance in optical fibers[J]. *Science*, 1998, 282(5393): 1476-1478.
- 13 Russell P S J. Photonic-crystal fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(12): 4729-4749.
- 14 Bai Jinjun, Wang Changhui, Huo Bingzhong, *et al.* A broadband low loss and high birefringence terahertz photonic bandgap photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(9): 098702.
白晋军, 王昌辉, 霍丙忠, 等. 低损宽频高双折射太赫兹光子带隙光纤[J]. *物理学报*, 2011, 60(9): 098702.
- 15 Wang Doudou, Wang Lili, Zhang Tao, *et al.* Low loss and high birefringence topas photonic bandgap fiber at terahertz frequency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 0606002.
王豆豆, 王丽莉, 张 涛, 等. 低损耗高双折射太赫兹 Topas 光子带隙光纤[J]. *光子学报*, 2014, 43(6): 0606002.
- 16 Chen D R, Shen L F. Ultrahigh birefringent photonic crystal fiber with ultralow confinement loss[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(4): 185-187.
- 17 Nielsen K, Rasmussen H K, Adam A J L, *et al.* Bendable, low-loss Topas fibers for the terahertz frequency range[J]. *Opt Express*, 2009, 17(10): 8592-8601.
- 18 Cunningham P D, Valdes N N, Vallejo F A, *et al.* Broadband terahertz characterization of the refractive index and absorption of some important polymeric and organic electro-optic materials[J]. *J Appl Phys*, 2011, 109(4): 043505.