

## 工作波长为 2.94 $\mu\text{m}$ 保偏空芯负曲率光纤

韩颖<sup>1\*</sup>, 李正然<sup>1</sup>, 朱维震<sup>1</sup>, 宋朋<sup>2</sup>, 周凡迪<sup>1</sup>, 杨骐豪<sup>1</sup>, 王彦<sup>1</sup>, 龚琳<sup>1</sup>,  
杨慢<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 侯蓝田<sup>1</sup>

(1. 燕山大学 信息科学与工程学院 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

2. 济南大学 物理科学与技术学院, 山东 济南 250022)

**摘要:**提出一种保偏空芯负曲率光纤,可用于传输工作波长为 2.94  $\mu\text{m}$  的中红外激光。首先通过调整  $y$  方向包层管的厚度和嵌套管到包层管内径的最大距离使  $y$  方向偏振模式与包层管表面模式发生微弱耦合,再通过优化纤芯直径和包层管的外径诱导  $y$  方向偏振模式与包层管表面模式发生相位匹配,造成  $y$  方向偏振模式泄露出纤芯。包层管间的缝隙引导高阶模式泄露出纤芯,而  $x$  方向偏振模式因包层管和嵌套管的厚度具有抑制耦合的作用而保持低损耗传输。最终得到一种工作波长为 2.94  $\mu\text{m}$  的保偏空芯负曲率光纤, $x$  方向偏振模式的限制损耗为  $2.8 \times 10^{-2}$  dB/m,偏振消光比大于  $2 \times 10^3$ ,高阶模抑制比大于 100,双折射为  $1.4 \times 10^{-5}$ 。当光纤  $y$  方向弯曲,且半径为 25 cm 时,弯曲损耗为 0.62 dB/m。

**关键词:**中红外激光;空芯;保偏;负曲率光纤

**中图分类号:**TN253 **文献标识码:**A

## Polarization-maintaining hollow core negative curvature fiber with an operating wavelength of 2.94 $\mu\text{m}$

HAN Ying<sup>1\*</sup>, LI Zheng-Ran<sup>1</sup>, ZHU Wei-Zhen<sup>1</sup>, SONG Peng<sup>2</sup>, ZHOU Fan-Di<sup>1</sup>, YANG Qi-Hao<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, GONG Lin<sup>1</sup>, YANG Man<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, HOU Lan-Tian<sup>1</sup>

(1. The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Institute of Information Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan 250022, China)

**Abstract:** A polarization-maintaining hollow-core negative curvature fiber is proposed, which can be used to transmit mid-infrared laser with an operating wavelength of 2.94  $\mu\text{m}$ . By adjusting the thickness of the cladding tube in the  $y$ -direction and the maximum distance from the nested tube to the inner diameter of the cladding tube, the polarization mode in the  $y$ -direction is weakly coupled with the surface mode of the cladding tube. By optimizing the core diameter and the outer diameter of the cladding tube, the  $y$ -direction polarization mode is strongly coupled with the cladding tube surface mode, causing the  $y$ -direction polarization mode to leak out of the core. The gap between the cladding tubes guides the high-order mode to leak out of the core, while the  $x$ -direction polarization mode keeps the low confinement loss due to the coupling suppression effect of the thickness of the cladding tube and the nested tube. Finally, a polarization-maintaining hollow core negative curvature fiber with an operating wavelength of 2.94  $\mu\text{m}$  is obtained. The confinement loss of the  $x$ -direction polarization mode is  $2.8 \times 10^{-2}$  dB/m, the polarization extinction ratio is greater than  $2 \times 10^3$ , the high-order mode rejection ratio is greater than 100, and the birefringence is  $1.4 \times 10^{-5}$ . When bending in the  $y$  direction with a radius of 25 cm, the bend loss is 0.62 dB/m.

**Key words:** mid-infrared laser, hollow core, polarization maintaining, negative curvature fiber

**PACS:**42.25.Dd, 42.70.Km, 42.81.Dp, 42.81.Qb

收稿日期:2020-05-12,修回日期:2020-09-09

Received date:2020-05-12, Revised date:2020-09-09

基金项目:国家重点研发计划(2019YFB2204001),国家自然科学基金(61405173,61971373),河北省自然科学基金(F2019203549,F2019203440)

**Foundation items:** Supported by National Key Research and Development Project (2019YFB2204001), National Natural Science Foundation of China (61405173,61971373), Natural Science Foundation of Hebei Province (F2019203549,F2019203440)

作者简介(Biography):韩颖(1976-),女,天津人,副教授,博士,主要研究领域为特种光纤方面

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: hanyingysu@163.com

## 引言

工作波长为2.94 μm的中红外激光对生物组织中的水分具有强吸收性,因此具有穿透深度小,烧灼率高,治疗精度高和热影响区小等特点,从而减少手术过程中附带损伤,目前广泛应用于医疗领域中<sup>[1-2]</sup>。使用光纤导引激光,可准确治疗病灶且不破环正常的人体组织。然而,以石英玻璃为基质的微结构光纤,如空芯带隙型微结构光纤,虽然可用来传输中红外激光,却存在对制备工艺要求异常严格<sup>[3]</sup>和导光机理为多层石英包层产生光子带隙效应,在中红外波段仍存在高材料吸收的问题<sup>[4]</sup>。近年来,光纤领域出现一种叫空芯负曲率光纤<sup>[5-7]</sup>(Hollow Core Negative Curvature Fiber, HC-NCF)的新型光纤,也称为空芯反谐振光纤。此类光纤包层结构简单、石英玻璃材料在光纤中所占比例较小,因此,在中红外波段具有更小材料吸收损耗<sup>[8]</sup>和更高的损伤阈值,且容易制备,可以有效地克服空芯带隙型微结构光纤在中红外波段传输存在的缺陷。

在传输激光过程中,光纤本身的制备缺陷和外界环境的干扰容易引入随机双折射,导致两种偏振本征模式之间的竞争,影响传输质量和功率<sup>[9]</sup>,使得传输的激光不够稳定。保偏光纤(Polarization Maintain Fiber, PMF)可有效解决该问题<sup>[10]</sup>,因此具有偏振特性的HC-NCF成为研究热点<sup>[11-12]</sup>。2015年,丁伟和汪滢莹等人第一次提出了通过调节空芯反谐振光纤正交方向上包层管的壁厚可以引入高双折射的方法<sup>[13]</sup>。同年,南安普敦大学的Mousavi等人提出了一种偏振特性的HC-NCF,在1550 nm波长处的双折射为 $10^{-4}$ 量级,偏振消光比(Polarization Extinction Ratio, PER)为875,最低损耗为0.076 dB/m<sup>[14]</sup>。2018年,北京交通大学的Yan等人提出一种单模单偏振空芯反谐振光纤,在工作波长1550 nm处的PER为17662,高阶模抑制比(High Order Mode Extinction Ratio, HOMER)为363,其基模最低损耗为0.04 dB/m<sup>[15]</sup>。2020年,巴斯大学的Yerolatsitis等人控制的高双折射HC-NCF,在波长1550 nm处的双折射为 $2.35 \times 10^{-5}$ ,传输损耗为0.46 dB/m<sup>[16]</sup>。

本文基于HC-NCF模式耦合理论和谐振原理,设计可用于传输2.94 μm中红外激光的保偏HC-NCF。通过调整y方向包层管的厚度和嵌套管到包层管内径的最大距离引起y方向偏振模式与包层管表面模式发生微弱耦合;再优化纤芯和包层管外径的大小,诱导y方向偏振模式与包层管表面模式的

相位匹配,使y方向偏振模式能量泄露出纤芯。x方向偏振模式因包层管和嵌套管的厚度具有抑制耦合的作用而保持低损耗。最终得到一种材料单一,结构简单,具有良好应用价值的保偏HC-NCF。

## 1 设计可传输高能量中红外激光的保偏HC-NCF

本文设计了由4个包层管和4个嵌套管构成的保偏HC-NCF,并利用有限元方法对保偏HC-NCF进行数值分析,结构如图1所示。纤芯直径为 $D_{core}$ ,包层管的外径为 $D_{tube}$ ,x方向的两个包层管的厚度为 $t_{lx}$ ,y方向的两个包层管厚度为 $t_{ly}$ ,嵌套管厚度均等于 $t_{lx}$ ,嵌套管与包层管内径的最大距离为 $Z$ 。

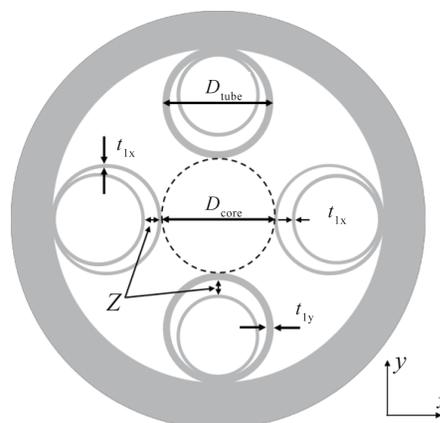


图1 保偏HC-NCF端面图

Fig. 1 Polarization maintain hollow core negative curvature fiber end view

灰色区域代表的材料为纯石英,不同波长所对应的折射率由Sellmeier方程近似得到<sup>[17]</sup>:

$$n_{\text{silica}} = \sqrt{1 + A_1 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + A_2 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + A_3 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2}} \quad (1)$$

式中 $A_1=0.6961663$ , $A_2=0.4079426$ , $A_3=0.8974794$ ; $\lambda_1=0.0684043$ , $\lambda_2=0.1162414$ , $\lambda_3=9.896161$ 。白色区域代表的材料为空气,其折射率一般取为1。

HC-NCF在特定波长下可得到最低的限制损耗,一般需满足谐振带公式<sup>[18]</sup>:

$$\frac{c(m-1)}{2t\sqrt{n_{\text{silica}}^2 - n_{\text{air}}^2}} < f < \frac{cm}{2t\sqrt{n_{\text{silica}}^2 - n_{\text{air}}^2}} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

式中 $c$ 代表真空中光的传播速度, $t$ 代表包层管厚度, $f$ 指光波频率, $n_{\text{silica}}$ 为石英折射率, $n_{\text{air}}$ 为空气折射率, $m$ 是正整数。

限制损耗(Confinement Loss) $\alpha$ 为<sup>[19]</sup>:

$$\alpha = 8.686 \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad , \quad (3)$$

式中 $\lambda$ 代表工作波长, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 代表模式有效折射率的虚部,光纤损耗单位为dB/m。

偏振消光比(PER)为<sup>[14]</sup>:

$$\text{PER} = \frac{\alpha_x}{\alpha_y} \quad , \quad (4)$$

式中 $\alpha_x$ 为 $x$ 方向偏振模式的限制损耗, $\alpha_y$ 为 $y$ 方向偏振模式的限制损耗。

高阶模抑制比(HOMER)为<sup>[15]</sup>:

$$\text{HOMER} = \frac{\alpha_h}{\alpha_x} \quad , \quad (5)$$

式中 $\alpha_h$ 为最低限制损耗的高阶模式, $\alpha_x$ 为 $x$ 方向偏振模式的限制损耗。

双折射 $B$ 为<sup>[13]</sup>:

$$B = |n_{\text{eff}}^y - n_{\text{eff}}^x| \quad , \quad (6)$$

式中 $n_{\text{eff}}^y$ 和 $n_{\text{eff}}^x$ 分别为 $y$ 方向偏振模式与 $x$ 方向偏振模式有效折射率的实部。

光纤弯曲后的等效折射率<sup>[20]</sup>为:

$$n_{\text{eq}}^2(r, \phi) = n_r^2 \times \left[ 1 + \frac{2r}{\rho R} \cos \phi \right] \quad , \quad (7)$$

式中 $n_r$ 为垂直光纤的折射率, $r$ 为光纤径向长度, $\phi$ 为方位角, $\rho$ (1.25)是应力产生的系数, $R$ 为曲率半径。

## 2 保偏HC-NCF的结构优化

### 2.1 $y$ 方向包层管厚度与嵌套管尺寸对保偏HC-NCF的影响

根据HC-NCF谐振原理,将 $x$ 方向包层管厚度和嵌套管厚度 $t_{1x}$ 设为 $0.743 \mu\text{m}$ ,光纤纤芯直径 $D_{\text{core}}$ 和包层管外径 $D_{\text{tube}}$ 固定为 $91.14 \mu\text{m}$ ,研究 $y$ 方向包层管厚度 $t_{1y}$ 与嵌套管到包层管内径的最大距离 $Z$ 对HC-NCF偏振特性的影响,其结果如图2所示。左侧的彩色图是 $x$ 与 $y$ 方向偏振模式随 $t_{1y}$ 和 $Z$ 变化的PER,当 $t_{1y}/t_{1x} < 2.15$ 时, $y$ 方向偏振模式的限制损耗略大于 $x$ 方向偏振模式的限制损耗;当 $t_{1y}/t_{1x} = 2.15$ ,且 $t_{1y}$ 为 $1.60 \mu\text{m}$ , $Z$ 为 $11.76 \mu\text{m}$ 时, $y$ 方向偏振模式与包层管表面模式发生微弱耦合,导致 $x$ 和 $y$ 方向偏振模式的PER最大值为23;当 $t_{1y}/t_{1x} > 2.15$ 时, $x$ 和 $y$ 方向包层管和嵌套管的厚度均具有抑制耦合的能力,两种模式的限制损耗均很低。随着 $Z$ 的增加,PER在 $t_{1y}/t_{1x} = 2.15$ 附近较高,且极大值出现在 $Z$ 为 $11.76 \mu\text{m}$ 。右侧是两种本征模式的模场图, $x$ 方向

偏振模式因包层管厚度具有抑制耦合的作用,使得光能量集中在纤芯,未发生模式的耦合; $y$ 方向偏振模式因与包层管表面模式发生耦合,导致部分模场能量泄露至包层管表面。

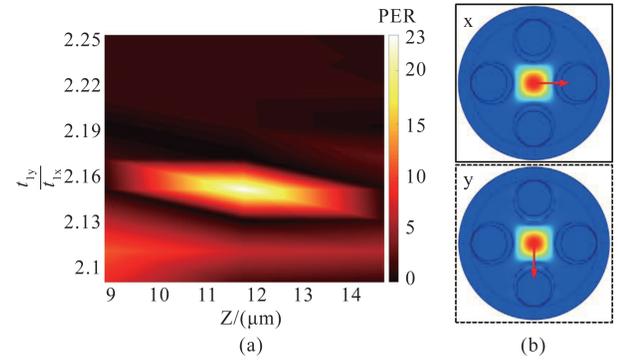


图2 (a) $y$ 方向包层管厚度 $t_{1y}$ 和嵌套管到包层管内径最大距离 $Z$ 对HC-NCF PER的影响,(b)当 $t_{1y}/t_{1x}$ 为2.15( $t_{1y}$ 为 $1.60 \mu\text{m}$ ), $Z$ 为 $11.76 \mu\text{m}$ 时, $x$ 和 $y$ 方向偏振模式

Fig. 2 (a) $y$ -directional clad tube thickness  $t_{1y}$  and nested tube to the inner diameter of the tube maximum distance  $Z$  on the influence of HC-NCF PER, (b) when  $t_{1y}/t_{1x}$  is 2.15 ( $t_{1y}$  is  $1.60 \mu\text{m}$ ),  $Z$  is  $11.76 \mu\text{m}$ ,  $x$  and  $y$  direction polarization mode

### 2.2 纤芯尺寸对保偏HC-NCF的影响

经过对 $y$ 方向包层管厚度 $t_{1y}$ 和嵌套管到包层管内径的最大距离 $Z$ 的优化,使得 $y$ 方向偏振模式与 $y$ 方向包层管表面模式发生微弱的耦合。接下来,通过对 $D_{\text{core}}$ 的优化来增强 $y$ 方向偏振模式与包层管表面模式的耦合,从而获得更大的PER。将所设计光纤的包层管直径 $D_{\text{tube}}$ 固定为 $91.14 \mu\text{m}$ , $x$ 方向包层管和嵌套管的壁厚 $t_{1x}$ 为 $0.743 \mu\text{m}$ , $y$ 方向包层管壁厚 $t_{1y}$ 为 $1.60 \mu\text{m}$ , $Z$ 为 $11.76 \mu\text{m}$ ,研究 $D_{\text{core}}$ 变化对保偏HC-NCF偏振特性的影响。

$x$ 和 $y$ 方向偏振模式和包层管表面模式的限制损耗随 $D_{\text{core}}$ 从 $73 \mu\text{m}$ 增加至 $109 \mu\text{m}$ 变化的结果,如图3(a)所示。 $x$ 方向偏振模式因包层管和嵌套管厚度具有抑制耦合作用而保持低损耗传输; $y$ 方向偏振模式随着 $D_{\text{core}}$ 的增加逐渐与 $y$ 方向包层管表面模式发生耦合,限制损耗达到顶峰后随之降低。当 $D_{\text{core}} = 85.86 \mu\text{m}$ 时, $y$ 方向偏振模式与 $y$ 方向包层管表面模式完全耦合, $y$ 方向偏振模式的限制损耗为 $57.5 \text{ dB/m}$ 。 $D_{\text{core}}$ 的变化对PER的影响,如图3(b)所示。PER呈现先升高后降低的趋势,当 $D_{\text{core}} = 85.86 \mu\text{m}$ 时, $y$ 方向偏振模式与包层管表面模式完全耦合,获得PER的最大值为2037。 $D_{\text{core}}$ 对不同模式有效折射率的影响,如图3(c)所示,当 $D_{\text{core}} < 85.86 \mu\text{m}$

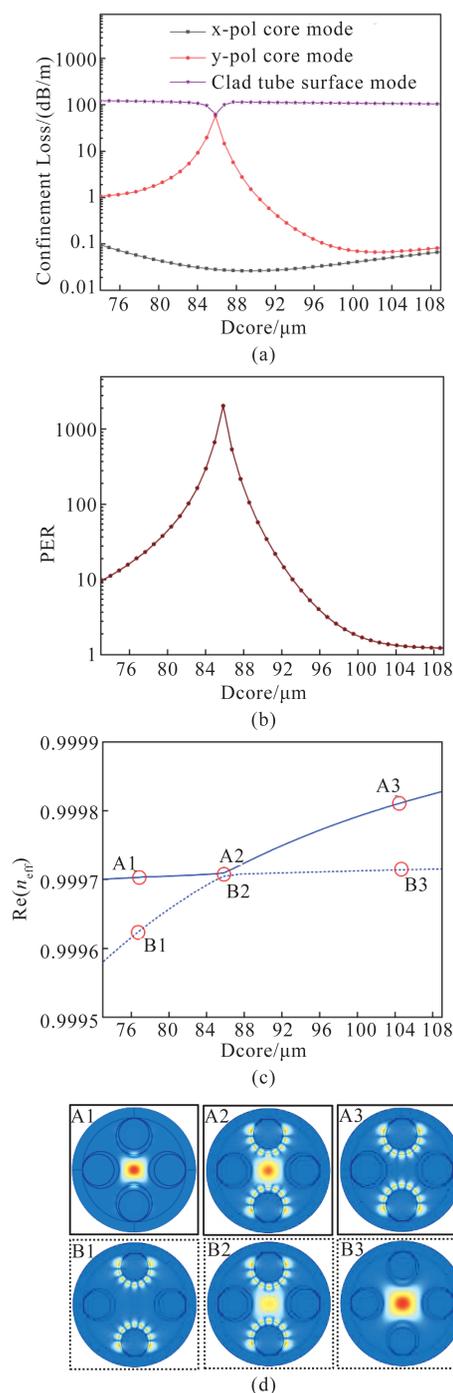


图3 纤芯直径 $D_{\text{core}}$ 对保偏HC-NCF的影响 (a) 模式的限制损耗随 $D_{\text{core}}$ 发生变化, (b) PER和HOMER随 $D_{\text{core}}$ 发生变化, (c)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 随 $D_{\text{core}}$ 发生变化, (d) 模式耦合过程

Fig. 3 The effect of core diameter  $D_{\text{core}}$  on polarization maintain HC-PCF (a) The confinement loss of the modes changes with  $D_{\text{core}}$ , (b) PER and HOMER changes with  $D_{\text{core}}$ , (c)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  change with  $D_{\text{core}}$ , (d) the mode-field coupling process

时,包层管表面模式的有效折射率大于纤芯 $y$ 方向偏振模式的有效折射率,两种模式没有发生耦合。随着 $D_{\text{core}}$ 的增加, $y$ 方向偏振模式的有效折射率随

加,与包层管表面模式发生反交叉,使得 $y$ 方向偏振模式与 $y$ 方向包层管表面模式相位匹配。而随着 $D_{\text{core}}$ 的进一步增加, $y$ 方向偏振模式的有效折射率也随之降低,耦合的能力也减弱,导致 $y$ 方向偏振模式的限制损耗会逐渐减小,使得PER也随之降低。图3(d)中的模场直观的描述了 $y$ 方向偏振模式和 $y$ 方向包层管表面模式随纤芯直径变化发生分离-耦合-分离的过程,当 $D_{\text{core}}$ 为85.86  $\mu\text{m}$ 时,纤芯 $y$ 偏振模式与 $y$ 方向包层管表面模式的能量完全互换。从A1到A3,纤芯模式逐渐转变为包层管表面模式;而从B1到B3,包层管表面模式则逐渐变为了纤芯模式;在耦合点A2和B2处, $y$ 方向偏振模式与包层管表面模式完全耦合<sup>[21]</sup>。

### 2.3 包层管尺寸对保偏HC-NCF的影响

将光纤的纤芯直径 $D_{\text{core}}$ 固定为85.86  $\mu\text{m}$ , $x$ 方向包层管厚度和嵌套管厚度 $t_{\text{ix}}$ 为0.743  $\mu\text{m}$ , $y$ 方向包层管壁厚 $t_{\text{iy}}$ 为1.60  $\mu\text{m}$ ,距离 $Z$ 为11.76  $\mu\text{m}$ 。接下来研究包层管外径 $D_{\text{tube}}$ 对保偏HC-NCF的影响。

$x$ 和 $y$ 方向偏振模的限制损耗随 $D_{\text{tube}}$ 变化的结果,如图4(a)所示。 $x$ 方向偏振模的限制损耗随着 $D_{\text{tube}}$ 的增加呈现出先增高后降低的趋势。当 $D_{\text{tube}} < 79.57 \mu\text{m}$ 时, $x$ 方向偏振模式先与包层管表面模式1耦合逐渐增强;当 $D_{\text{tube}} = 79.57 \mu\text{m}$ 时, $x$ 方向偏振模式先与包层管表面模式1发生耦合,限制损耗极大值为66.6 dB/m;当 $D_{\text{tube}} > 79.57 \mu\text{m}$ 时, $x$ 方向偏振模式与包层管表面模式1耦合逐渐减弱。 $y$ 方向偏振模的限制损耗随着 $D_{\text{tube}}$ 的增加也呈现出先增高后降低的趋势。当 $D_{\text{tube}} < 91.14 \mu\text{m}$ 时, $y$ 方向偏振模式与包层管表面模式2耦合逐渐增强;当 $D_{\text{tube}}$ 增大至91.14  $\mu\text{m}$ 时, $y$ 方向偏振模式与包层管表面模式2发生完全耦合,限制损耗最大值为57.5 dB/m,而 $x$ 方向偏振模的限制损耗仅为0.028 dB/m;当 $D_{\text{tube}} > 91.14 \mu\text{m}$ 时, $y$ 方向偏振模式与包层管表面模式2耦合逐渐减弱。 $x,y$ 方向偏振模和包层管表面模式的有效折射率随 $D_{\text{tube}}$ 从73  $\mu\text{m}$ 增加至95  $\mu\text{m}$ 变化的结果,如图4(b)所示。随着 $D_{\text{tube}}$ 的增加, $x$ 方向偏振模式的有效折射率与包层管表面模式1的有效折射率先发生反交叉; $y$ 方向偏振模式的有效折射率与包层管表面模式2的有效折射率发生反交叉,两次模式匹配引起两次能量的交换。

随着 $D_{\text{tube}}$ 的不断增大, $x$ 和 $y$ 方向偏振模式先后与包层管表面模式1和2发生耦合,模场耦合过程如图5所示。当 $D_{\text{tube}}$ 为79.57  $\mu\text{m}$ 时, $x$ 方向偏振模式

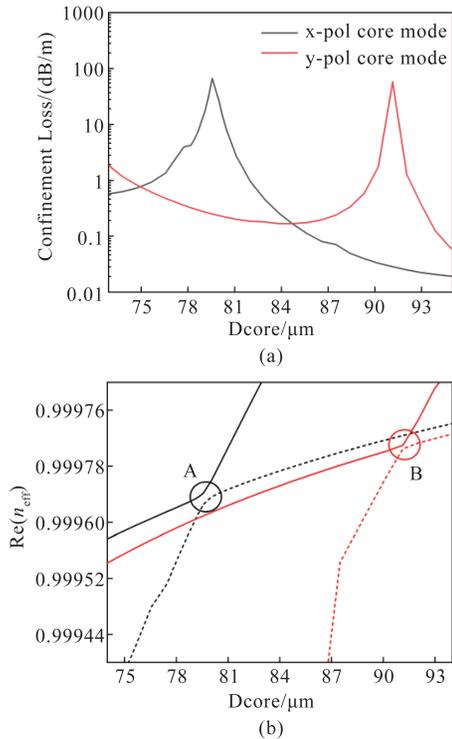


图4 包层管直径  $D_{\text{tube}}$  对保偏 HC-NCF 的影响 (a) 限制损耗随  $D_{\text{tube}}$  发生变化, (b)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  随  $D_{\text{tube}}$  发生变化

Fig. 4 The effect of the cladding tube diameter  $D_{\text{tube}}$  on polarization maintain HC-NCF (a) the confinement loss of the mode changes with  $D_{\text{tube}}$ , (b)  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  changes with  $D_{\text{tube}}$

与包层管表面模式1的有效折射率发生反交叉,  $x$  方向偏振模式图5(a)与包层管表面模式图5(b)发生完全耦合, 导致  $x$  方向偏振模式的能量泄露出纤芯。当  $D_{\text{tube}}$  增大至 91.14  $\mu\text{m}$  时,  $y$  方向偏振模式与包层管表面模式2的有效折射率发生反交叉,  $y$  方向偏振模式图5(c)与包层管表面模式2发生完全耦合图5(d), 导致  $y$  方向偏振模式的能量泄露出纤芯。

### 3 保偏 HC-NCF 的偏振特性

接下来对保偏 HC-NCF 随波长变化的偏振特性进行分析。纤芯直径  $D_{\text{core}}$  固定为 85.86  $\mu\text{m}$ , 包层管外径  $D_{\text{tube}}$  为 91.14  $\mu\text{m}$ ,  $x$  方向包层管和嵌套管的厚度  $t_{1x}$  为 0.743  $\mu\text{m}$ ,  $y$  方向包层管厚度  $t_{1y}$  为 1.60  $\mu\text{m}$ , 嵌套管到包层管内径的最大距离  $Z$  为 11.76  $\mu\text{m}$ 。

$y$  方向偏振模式和包层管表面模式的有效折射率随波长增加发生变化, 如图6(左)所示。当  $\lambda < 2.94 \mu\text{m}$  时, 包层管表面模式的有效折射率小于  $y$  方向偏振模式的有效折射率, 两种模式没有发生耦合; 随着波长的增加, 包层管表面模式的有效折射

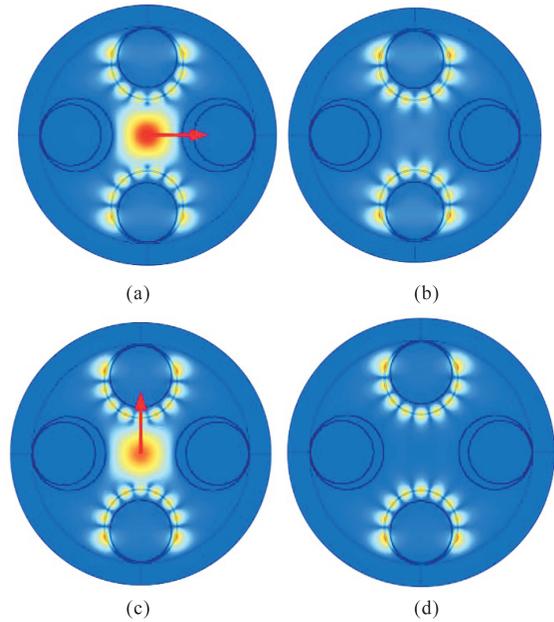


图5 模式随  $D_{\text{tube}}$  变化的耦合过程: 当包层管外径  $D_{\text{tube}}$  为 79.57  $\mu\text{m}$  时, (a) x-pol core mode, (b) Clad surface mode1; 当包层管外径  $D_{\text{tube}}$  为 91.14  $\mu\text{m}$  时, (c) y-pol core mode, (d) Clad surface mode2

Fig. 5 Coupling process of mode changing with  $D_{\text{tube}}$ : When  $D_{\text{tube}}=79.57 \mu\text{m}$ , (a) x-pol core mode, (b) Clad surface mode1; When  $D_{\text{tube}}=91.14\mu\text{m}$ , (c) y-pol core mode, (d) Clad surface mode2

率也随之增加, 当  $\lambda=2.94 \mu\text{m}$  时, 包层管表面模式的有效折射率接近  $y$  方向偏振模式的有效折射率而发生反交叉现象, 两种模式相位匹配而发生了强烈的模式耦合效应, 造成  $y$  方向偏振模式和  $y$  方向包层管表面模式的完全耦合; 当  $\lambda > 2.94 \mu\text{m}$  时, 包层管表面模式和  $y$  方向偏振模式的有效折射率差越来越大, 导致两种模式耦合越来越弱。  $y$  方向偏振模式和包层管表面模式的模场耦合过程如图6(右)所示。A1、A2、A3、B1、B2 和 B3 处的模场也能清晰地看出包层管表面模式与  $y$  偏振模式能量转换的过程, 从 A1 到 A3, 纤芯模式逐渐转变为包层管表面模式, 而从 B1 到 B3, 包层管表面模式则逐渐变为纤芯模式; 当波长为 2.94  $\mu\text{m}$ , 在耦合点 A2 和 B2 处,  $y$  方向偏振模式和包层管表面模式完全耦合。

$x$  和  $y$  方向偏振模式、包层管表面模式和高阶模式的限制损耗随波长发生变化, 结果如图7(a)所示。  $x$  方向偏振模式因包层管和嵌套管厚度具有抑制耦合作用而保持低损耗传输。但随着波长的增加, 限制损耗略微有所增加。  $y$  方向偏振模式和包层管表面模式的有效折射率在波长 2.94  $\mu\text{m}$  处发生反交叉现象, 两种模式相位匹配而完全耦合, 纤芯

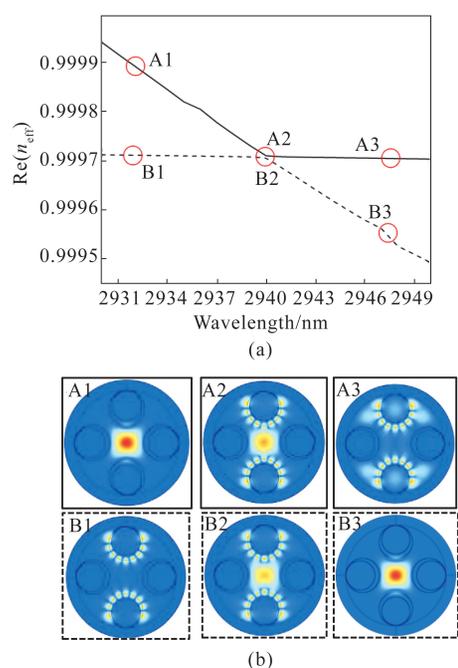


图6 保偏HC-NCF随波长变化而发生的模式耦合过程(a)模式的有效折射率,(b)耦合过程

Fig. 6 Polarization maintain HC-NCF mode coupling process with wavelength change (a) effective refractive index, (b) coupling process of mode

模式中的能量泄露出纤芯,导致 $y$ 方向偏振模式的限制损耗出现极大值。由于包层管间的大间距,高阶模式很容易泄露出纤芯,由于波长变化对高阶模式影响不大,其限制损耗几乎不随波长发生变化。PER和HOMER随波长发生变化的结果,如图7(b)所示。PER随着波长的增加呈现先增后减的趋势,在波长 $2.94\ \mu\text{m}$ 处,获得PER的极大值为2037,这是由于 $y$ 方向偏振模式与包层管表面模式发生了完全耦合而产生的现象。而HOMER的随着波长的增加而略微减小,主要是因为随着波长增大, $x$ 方向偏振模式的限制损耗略有提高,其中在波长 $2.94\ \mu\text{m}$ 处HOMER为129。保偏HC-NCF的双折射随波长发生变化,如图7(c)所示。在 $y$ 方向偏振模式与包层管表面模式的有效折射率发生反交叉之前, $y$ 方向偏振模式的有效折射率降低的幅度大于 $x$ 方向偏振模式的有效折射率,双折射 $B$ 逐渐增加;在 $y$ 方向偏振模式与包层管表面模式的有效折射率发生反交叉,耦合增强,导致 $y$ 方向偏振模式的有效折射率突然增加,双折射 $B$ 逐渐降低;在 $y$ 方向偏振模式与包层管表面模式的有效折射率发生反交叉结束后, $y$ 方向偏振模式与包层管表面模式的耦合变弱, $y$ 方

向偏振模式的有效折射率降低,双折射 $B$ 再次增加;其中, $x$ 和 $y$ 方向的偏振模式在波长 $2.94\ \mu\text{m}$ 处的双折射 $B$ 为 $1.4 \times 10^{-5}$ 。当波长为 $2.94\ \mu\text{m}$ 时, $x$ 方向偏振模式和最低限制损耗高阶模式的模场图,如图7(d)所示。图7(d)上图是 $x$ 方向偏振模式的模场图,光能量明显限制在纤芯中;图7(d)下图是最低限制损耗高阶模式的模场图,包层管间的大间距导致光

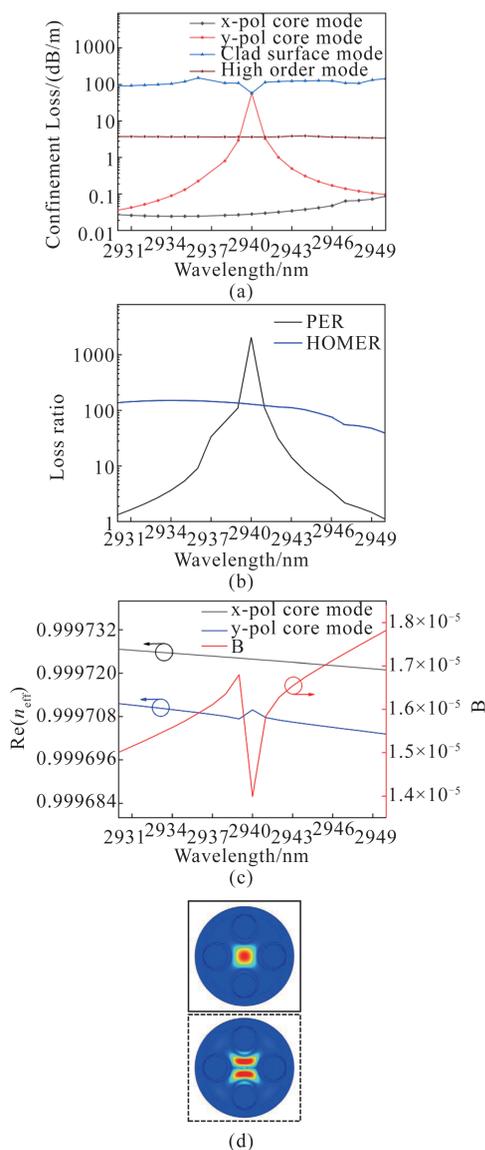


图7 保偏HC-NCF随波长变化的传输特性(a)模式的限制损耗随波长发生变化,(b)PER和HOMER随波长发生变化,(c)双折射 $B$ 随波长发生变化,(d)当波长为 $2.94\ \mu\text{m}$ 时, $x$ 方向偏振模式和高阶模式的模场图

Fig. 7 Polarization maintain HC-NCF transmission characteristics with wavelength change (a) Mode-limited loss changes with wavelength, (b) PER and HOMER change with wavelength, (c) Birefringence change with wavelength, (d) x-pol core mode(top) and high order mode(bottom)

能量泄露出纤芯,还有部分能量泄露到了包层管和嵌套管之间,包层管和嵌套管也存在能量耦合。

## 4 保偏HC-NCF的制备方法与弯曲损耗

### 4.1 保偏HC-NCF的制备方法

保偏HC-NCF可以通过采用微结构光纤常用的堆叠拉制方法得到<sup>[22]</sup>:首先,拉制出两种厚度的毛细管作为预制棒中的包层管;再将毛细管按照本文设计的结构依次放入较大尺寸的石英玻璃管中,并采用预定型技术进行固定;最后将预制棒放入拉丝塔中,并接入氮气来控制石英玻璃管中各个部分的气压,并通过调节拉制温度、拉制速度、送棒速度和气压四个参量完成拉制,得到本文设计的具有双折射性能的HC-NCF。国际上研制的HC-NCF多采用堆叠拉制工艺制备。2020年,南安普顿大学的研究人员使用此类似方法制备出在通信波段具有最低损耗的HC-NCF,其结构含有一层嵌套管<sup>[23]</sup>。

### 4.2 保偏HC-NCF的弯曲损耗

弯曲损耗是光纤在实际应用中一个重要的参数,本文设计的保偏HC-NCF为非对称的结构,分别讨论了 $x$ 和 $y$ 方向的弯曲损耗,结果如图8所示。图8(a)是 $y$ 方向弯曲得到的损耗,图8(b)是 $x$ 方向弯曲得到的损耗。当光纤 $y$ 方向弯曲,弯曲半径为15~25 cm时, $x$ 和 $y$ 方向偏振模式的弯曲损耗趋于稳定,且最低弯曲损耗为0.62 dB/m;当光纤 $x$ 方向弯曲,弯曲半径为20~25 cm时, $x$ 和 $y$ 方向偏振模式的弯曲损耗趋于稳定,且最低弯曲损耗为2.08 dB/m。

## 5 结论

基于HC-NCF的模式耦合理论和谐振原理,提出了一种含一层嵌套管的保偏HC-NCF。采用有限元法分析了光纤主要结构参数如包层管厚度、纤芯直径和包层管外径等对保偏HC-PCF传输特性的影响。通过诱导 $y$ 方向包层管表面模式与 $y$ 方向偏振模式发生反交叉,使得两种模式的相位匹配,从而得到保偏HC-PCF。分析出偏振模式与包层管表面模式发生耦合的原因,并给出了对应的折射率变化过程。数值结果表明,本文所设计光纤在2.94  $\mu\text{m}$ 处可获得 $x$ 方向偏振模式的限制损耗为 $2.8 \times 10^{-2}$  dB/m,PER大于 $2 \times 10^3$ ,HOMER大于 $1 \times 10^2$ , $x$ 和 $y$ 方向偏振模式的双折射为 $1.4 \times 10^{-5}$ ,当光纤 $y$ 方向弯曲,且半径为25 cm时,弯曲损耗为0.62 dB/m。设计的保偏HC-NCF结构简单,材料单一,能很好地应用于

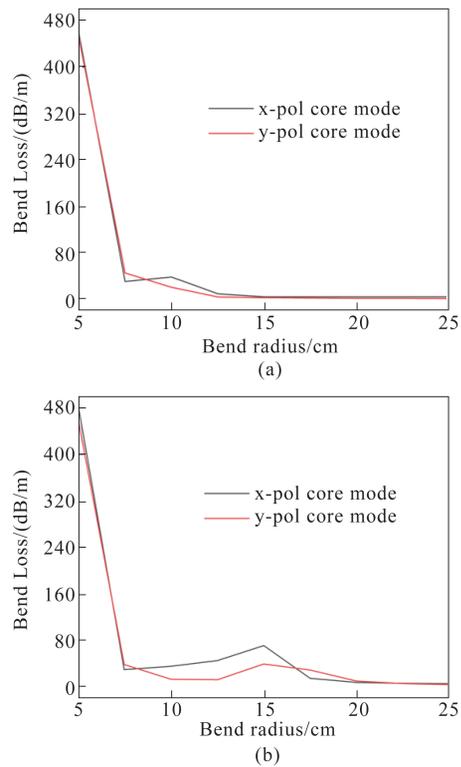


图8 保偏HC-NCF的弯曲损耗 (a)  $y$ 方向弯曲得到的损耗, (b)  $x$ 方向弯曲得到的损耗

Fig. 8 Bend loss of polarization-maintaining HC-NCF (a) the loss obtained by bend in the  $y$  direction, (b) the loss obtained by bend in the  $x$  direction

传输工作波长为2.94  $\mu\text{m}$ 的高能量中红外激光。

## References

- [1] Robertson C W, Williams D. Lambert absorption coefficients of water in the infrared[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, **61**(10):1316-1320.
- [2] Stübinger S, von Rechenberg B, Zeilhofer H F, et al. Er:YAG laser osteotomy for removal of impacted teeth: clinical comparison of two techniques[J]. *Lasers in Surgery & Medicine*, 2007, **39**(7):583-588.
- [3] Yu F, Knight J C. Negative curvature hollow-core optical fiber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, **22**(2):1-10.
- [4] Humbach O, Fabian H, Grzesik U, et al. Analysis of OH absorption bands in synthetic silica[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1996, **203**:19-26.
- [5] Yu F, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss silica hollow core fibers for 3-4  $\mu\text{m}$  spectral region[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(10):11153-11158.
- [6] Belardi W, Knight J C. Negative curvature fibers with reduced leakage loss [C]. In *Optical Fiber Communication Conference 2014*, San Francisco, California United States, 2014, doi: 10.1364/OFC.2014.Th2A.45.
- [7] Song P, Phoong K Y, Bird D, et al. Quantitative analysis of anti-resonance in single-ring, hollow-core fibres [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(20):27745-27760.

- [8] Wei C L, Jonathan H, Menyuk C R. Comparison of loss in silica and chalcogenide negative curvature fibers as the wavelength varies [J]. *Frontiers in Physics*, 2016, **4**(24): 30–39.
- [9] JIANG Ling-Hong. Study on polarization-Preserving photonic crystal fiber and its Related Polarization devices [D]. Beijing Jiaotong University(姜凌红. 保偏光子晶体光纤及其相关偏振器件的研究. 北京交通大学), 2017, 6–14.
- [10] Noda J, Okamoto K, Sasaki Y. Polarization-maintaining fibers and their applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, **4**(8):1071–1089.
- [11] Mousavi S A, Richardson D, Sandoghchi S R, *et al.* First design of high birefringence and polarising hollow core anti-resonant fiber [C]. In 41st European Conference on Optical Communication (ECOC 2015), doi: 10.1109/ECOC.2015.7341708.
- [12] Wei C L, Menyuk C R, Hu J. Polarization-filtering and polarization-maintaining low-loss negative curvature fibers [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(8):9528–9540.
- [13] Ding W, Wang Y Y. Hybrid transmission bands and large birefringence in hollow-core anti-resonant fibers [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(16):21165.
- [14] Mousavi S A, Sandoghchi S R, David J R, *et al.* Broad band high birefringence and polarizing hollow core anti-resonant fibers [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(20):22943.
- [15] Yan S B, Lou S Q, Zhang W, *et al.* Single-polarization single-mode double-ring hollow-core anti-resonant fiber [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(24):31160–31171.
- [16] Yerolatsitis S, Shurvinton R, Song P, *et al.* Birefringent anti-resonant hollow-core fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, doi: 10.1109/JLT.2020.3000706.
- [17] Zhang J B, Wang Z F, Chen Jin-Bao. Simulations of negative curvature hollow-core fiber [C]. Shang Hai, China, 2014.
- [18] Poletti F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber [J]. *Opt. Express*, 2014, **22**(20):23807–23828.
- [19] Saitoh K, Koshihara M. Single-polarization single-mode photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2003, **15**(10):1384–1386.
- [20] Marcuse D. Influence of curvature on the losses of doubly clad fibers [J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(23), 4208–4213.
- [21] Lou J B, Li S G, Cheng T L, *et al.* Plasmonic photonic crystal fiber polarization filter with asymmetry around Au-coated and liquid-filled air holes [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, **49**(415):1–11.
- [22] GUO Wei. Study on the preparation of microstructural fiber [D]. Yanshan university(郭巍. 关于微结构光纤制备的研究. 燕山大学), 2006, 16–18.
- [23] Jasion G T, Bradley T D, Harrington K, *et al.* Hollow Core NANF with 0.28 dB/km Attenuation in the C and L Bands [C]. In Optical Fiber Communication Conference 2020, San Diego, California United States, 2020, doi:10.1364/OFC.2020.Th4B.4.