

反共振空芯光子晶体光纤与拉锥光纤低损耗耦合

张乃千¹, 秦天令², 王泽锋¹, 刘文博¹, 曹润秋¹, 陈子伦¹

¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 反共振空芯光子晶体光纤(HC-PCF)在中红外光纤气体激光器中具有重要的应用价值,其与实芯光纤的低损耗耦合是实现全光纤结构光纤气体激光器的关键技术。采用将实芯光纤拉锥后插入空芯光纤的方案开展研究。理论和实验结果表明,利用光纤拉锥处理技术改变普通光纤模场直径,可使拉锥光纤与空芯光纤的模场直径近似匹配,从而实现实芯光纤与大模场直径反共振 HC-PCF 的低损耗耦合。对于模场直径约为 35 μm 的 Ice-cream 型反共振 HC-PCF,仿真结果表明,当锥腰直径为 30~50 μm 时,耦合效率高于 95%,最高可达 98%,实验测得锥腰直径为 35 μm 时的耦合效率为 96.05%。该结论为大模场直径空芯光纤与实芯光纤的低损耗耦合和实现全光纤结构气体激光器的全光纤化提供了一条可行的技术途径。

关键词 光纤光学; 空芯光纤; 反共振空芯光子晶体光纤; 拉锥光纤; 低损耗耦合; 模场直径

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.100608

Low-Loss Coupling Between Tapered Fibers and Anti-Resonant Hollow-Core Photonic Crystal Fibers

Zhang Naiqian¹, Qin Tianling², Wang Zefeng¹, Liu Wenbo¹, Cao Jianqiu¹, Chen Zilun¹

¹College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Anti-resonant hollow-core photonic crystal fibers (HC-PCF) have important application in middle-infrared fiber gas lasers. The low-loss coupling between HC-PCF and solid-core fiber is a key technology to realize all-fiber structure fiber gas lasers. A scheme of inserting tapered solid-core fibers into hollow-core fibers is proposed and studied. Theoretical and experimental results show that the low-loss coupling between solid-core fiber and anti-resonant HC-PCF with large mode field diameter is realized when we use optical fiber tapering technology to change the diameter of ordinary fiber mode field and make the mode field diameter of the tapered fiber approximately match that of the hollow-core fiber. For the ice-cream type anti-resonant HC-PCF with mode field diameter of about 35 μm , the simulation results indicate that when the waist diameters of tapered fibers are around 30-50 μm , the coupling efficiency is over 95% and the maximum coupling efficiency can reach to 98%. In the experiment, the coupling efficiency is 96.05% when the waist diameter of tapered fibers is 35 μm . This conclusion provides a feasible technical approach for the low-loss coupling between anti-resonant HC-PCF with large mode field diameter and solid-core-fiber and the realization of all-fiber structure gas lasers.

Key words fiber optics; hollow-core fibers; anti-resonant hollow-core photonic crystal fibers; tapered fibers; low-loss coupling; mode field diameter

OCIS codes 060.5295; 060.2310; 060.2360

收稿日期: 2017-04-06; **收到修改稿日期:** 2017-05-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11274385)

作者简介: 张乃千(1993—),男,硕士研究生,主要从事光纤器件应用方面的研究。E-mail: zonga_cn@foxmail.com

导师简介: 王泽锋(1980—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光纤光栅和光纤气体激光器方面的研究。

E-mail: zefengwang_nudt@163.com(通信联系人)

1 引言

空芯光子晶体光纤(HC-PCF)是一类特殊的微结构光纤,目前主要包括带隙型 HC-PCF、Kagome 型 HC-PCF 和反共振 HC-PCF 3 种类型。空芯光纤具有中空结构、很小的色散、很小的非线性系数以及低传输损耗等特点,在光与气体的相互作用、高能激光传输、脉冲压缩、光纤传感及下一代光通信等方面具有重要的应用价值和广阔的应用前景^[1-4]。以 Ice-cream 型反共振 HC-PCF 为代表的空芯光纤为气体介质与光的相互作用提供了近乎理想的环境,可以有效地将光约束在微米量级的纤芯中,大大提高了抽运强度,且作用距离长达数十米。自 2002 年 Benabid 等^[5]报道了空芯光纤中气体受激拉曼散射实验以来,英国、德国、美国 and 墨西哥等国均开展了相关的研究工作^[6-13]。反共振 HC-PCF 具有中红外波段传输损耗低、传输谱灵活可控等特点^[12-13],特别适用于中红外光纤气体激光器。2012 年, Jackson^[1]指出基于空芯光纤的气体激光器为进一步提高光纤激光功率,特别是实现大功率的中红外光纤激光输出提供了一条可行的解决途径。

Wang 等^[14-18]开展了基于 Ice-cream 型反共振 HC-PCF 的光纤气体激光器研究,实现了 2 μm 波段和 1.5 μm 波段的光纤气体拉曼激光输出和 3 μm 波段的光纤乙炔激光输出。但是到目前为止,上述实验方案都是采取自由空间耦合的方式将抽运光耦合至空芯光纤,系统结构复杂、光路调节困难且稳定性差。因此,全光纤结构的光纤气体激光器是下一步主要发展的方向,实现空芯光纤与实芯光纤的低损耗耦合是迫切需要解决的关键问题之一。

目前,空芯光纤与实芯光纤的耦合方式主要包括利用同轴结构实现的对接耦合和熔接耦合。其中,采用光纤耦合器和陶瓷插芯套管^[19]等对接耦合的方式可提高耦合效率,但易出现器件尺寸难以小型化、长期稳定性差、调试应用不方便等诸多问题,且不利于全光纤结构的实现。熔接耦合主要包括二氧化碳熔接^[20]和电弧放电耦合两种方案^[21-22]。由于空芯光纤与普通单模光纤的结构和模场直径不同,熔接过程会对空芯光纤结构产生破坏,导致的模场不匹配、折射率分布不同、波导介质不均匀以及切割端面不平整等问题都会使熔接产生较大损耗,尤其对于结构特殊、模场直径较大的反共振 HC-PCF,其耦合损耗更大。2016 年, Xie 等^[23]提出了将单模光纤拉锥后注入带隙型 HC-PCF 的耦合方案,得到了 87.8% 的单端注入耦合效率,为实现反共振 HC-PCF 与实芯光纤低损耗耦合提供了一种新的技术思路。

本文采用了基于拉锥技术的实芯光纤与反共振 HC-PCF 的低损耗耦合方案对单模光纤进行拉锥处理,单模光纤输出端模场直径随拉锥光纤腰区直径的改变而改变,从而实现了普通空芯光纤与大模场直径反共振 HC-PCF 的低损耗耦合。利用光束传输仿真软件 BeamPROP 建立耦合模型,仿真计算得到了最佳耦合状态下拉锥光纤的腰区直径和耦合效率,搭建了反共振 HC-PCF 与拉锥光纤的高精度注入耦合系统,并进行了实验验证。实验测得锥腰直径为 35 μm 时,耦合效率为 96.05%,略小于理论最大值(98%)。

2 基本原理

2.1 拉锥光纤的模场传递

拉锥是重要的光纤后处理技术,可改变光纤的形状和光学性能,在研制各种光纤器件及拓展光纤应用等领域具有重要作用。普通光纤内的模式和模场分布可以通过求解波动方程得到。模式特征方程为

$$\left[\frac{J'_m(U)}{UJ_m(U)} + \frac{K'_m(W)}{WK_m(W)} \right] \left[n_1^2 \frac{J'_m(U)}{UJ_m(U)} + n_2^2 \frac{K'_m(W)}{WK_m(W)} \right] = \left(\frac{m\beta}{k_0} \right)^2 \left(\frac{1}{U^2} + \frac{1}{W^2} \right)^2, \quad (1)$$

式中 $J_m(\cdot)$ 为 m 阶贝塞尔函数; $J'_m(U)$ 为 m 阶贝塞尔函数的一阶导数; $K_m(\cdot)$ 为 m 阶变型贝塞尔函数; $K'_m(W)$ 为 m 阶变型贝塞尔函数的一阶导数; U 为波导的径向归一化传播常数, $U = a(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}$; W 为波导的衰减常数, $W = a(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2}$; V 为归一化频率, $V = (U^2 + W^2)^{1/2} = ak_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$, a 为光纤半径, k_0 为波数, n_1 、 n_2 分别为纤芯和包层的折射率; β 为传播常数。由于注入单模光纤的光源为基模,可得电磁 (HE_{11}) 模在拉锥光纤中的模场分布^[24]。

经过拉锥处理后,光纤的纤芯和包层等比例缩小带来的波导形状和大小变化将直接引起其内部模场分布的变化。在单模光纤拉锥过程中,当锥区长度达到一定数值后,模场分布的变化主要经历纤芯单模、包层多模和包层单模 3 个阶段^[24]。随着纤芯和包层尺寸的减小,光场几乎全部扩散到包层中,从而实现光在包

层中的多模传输;随着纤芯和包层尺寸的进一步减小,包层中的模式也将逐渐减少,最后只存在基模。此时纤芯已经非常细,纤芯对光的作用可以忽略,从而可实现普通光纤模场直径的改变。

针对拉锥光纤模场直径这一关键变量,对不同尺寸拉锥光纤的腰区长度、锥区长度和锥区直径进行了仿真计算。当拉锥光纤的锥区长度为 21 mm 时,不同腰区长度下拉锥光纤的等效模场直径随腰区直径的变化如图 1(a)所示,由图可见,腰区长度并不是影响等效模场直径的决定因素。当拉锥光纤腰区长度为 6 mm 时,不同锥区长度下拉锥光纤等效模场直径随腰区直径的变化如图 1(b)所示,由图可见,当锥区长度小于 10 mm 时,拉锥光纤模场分布的变化尚未达到最终的包层单模阶段,等效模场直径尚不稳定;当拉锥光纤的锥区长度大于 10 mm 时,等效模场直径随拉锥光纤腰区直径的改变较为稳定,此时拉锥光纤的腰区直径成为等效模场直径的决定因素,由图 1(b)可见单模光纤在腰区直径为 40 μm 左右时等效模场直径最大。

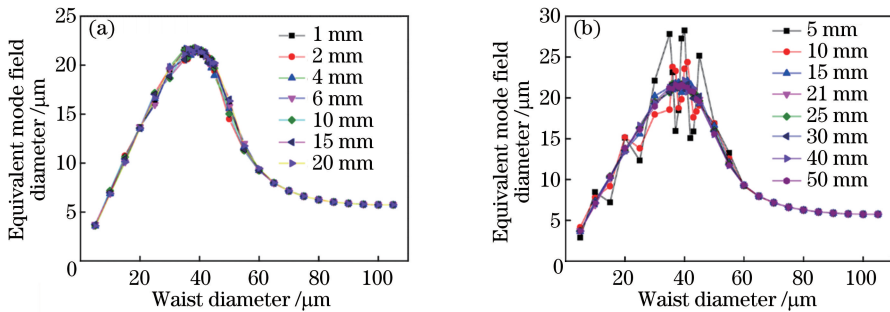


图 1 不同腰区长度下拉锥光纤等效模场直径随腰区直径的变化。(a)拉锥光纤的锥区长度为 21 mm;(b)拉锥光纤的腰区长度为 6 mm

Fig. 1 Equivalent mode field diameter of tapered fiber versus waist diameter at different waist lengths.

(a) Tapering length of tapered fiber is 21 mm; (b) waist length of tapered fiber is 6 mm

2.2 反共振 HC-PCF 的导光机理

目前,针对反共振 HC-PCF 理论模型的研究尚不完善,可用来定性解释其导光机理的理论模型主要包括 Benabid 等^[4]提出的模式耦合理论和 Duguay 等^[25]提出的反共振反射光学波导模型理论,更精确的输出特性需借助仿真软件进行建模计算。

反共振反射光学波导模型主要用于解释在折射率存在高低起伏分布的情况下,平面波导对光增强的束缚作用^[25]。2002 年,Litchinitser 等^[26]将反共振反射光学波导模型由二维模型拓展到三维模型,并将其用于解释空芯光纤的导光机理。在反共振反射光学波导模型中,空芯光纤被近似等效为一系列高低折射率分布的法布里-珀罗腔,从而在共振条件下减弱了对纤芯光的束缚。波导的共振波长为

$$\lambda_m = \frac{2n'_1 d}{m} \sqrt{\left(\frac{n'_2}{n'_1}\right)^2 - 1}, \quad (2)$$

式中 n'_1 、 n'_2 分别为不同区域的低、高折射率; d 为高折射率层的厚度; m 为整数,代表共振阶数。利用(2)式可以对反共振 HC-PCF 的传输带进行设计和预估。

3 仿 真

3.1 仿真模型参数设定

实验采用英国 Bath 大学拉制的纯石英材料 Ice-cream 型反共振 HC-PCF,其内部有 8 个冰淇淋筒形状的毛细管相互接触并形成封闭的纤芯区域,并以圆点为中心呈对称分布,反共振 HC-PCF 扫描电子显微镜(SEM)图如图 2(a)所示。Ice-cream 型反共振 HC-PCF 是泄漏型空芯光纤的一种,由于其纤芯折射率低于包层,泄漏及损耗是其本质属性。上述反共振 HC-PCF 的导光机理表明,Ice-cream 型反共振 HC-PCF 内部结构和导光机理较为复杂,具体的模式求解主要依靠数值仿真计算。采用 BeamPROP 软件建立该结构光纤的数值仿真模型。图 2(a)中深色区域为空气孔结构,内部填充材料为气体,折射率设置为 1;浅色区域为石英材料,折射率设置为 1.444。根据得到的相关尺寸建立 Ice-cream 型反共振 HC-PCF 仿真模型,仿真模型折射率分布图如图 2(b)所示。同时,还对实验中使用的 HI-1060 光纤建立数值仿真模型,其纤芯折射率设

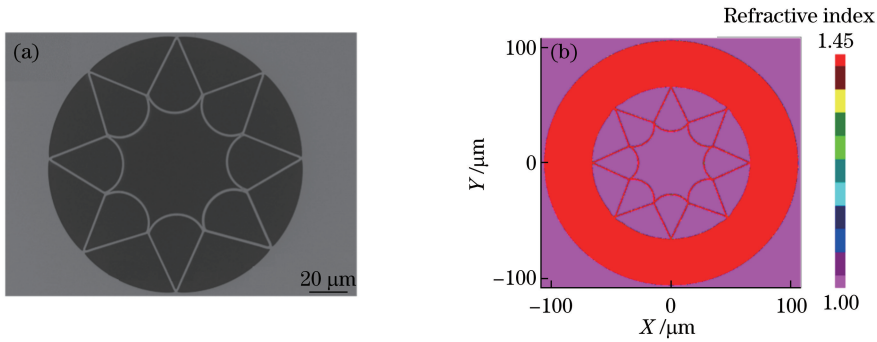


图2 (a)反共振 HC-PCF 的 SEM 图;(b)仿真模型折射率分布图

Fig. 2 (a) SEM figure of anti-resonant HC-PCF; (b) refractive index distribution figure of simulation model

置为 1.452,包层折射率设置为 1.445。

3.2 不拉锥时光纤耦合效率

采用熔接耦合方式对接实芯光纤与空芯光纤时,引起损耗的一个重要因素是两种光纤之间的模场失配^[9],产生耦合损耗的计算公式为

$$\alpha_{\text{loss}} = -20 \lg \left(\frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} \right), \quad (3)$$

式中 ω_1 、 ω_2 分别为两种光纤的模场直径。由此可得,当两种光纤的模场直径相等或相差很小时,由模场失配引起的耦合损耗较小。

实验中使用 Ice-cream 型反共振 HC-PCF,通过全矢量有限元计算得到该空芯光纤在 1064 nm 波长时基模模场的等效模场直径约为 $35 \mu\text{m}$,使用的 HI-1060 光纤模场直径约为 $6.2 \mu\text{m}$ 。将模场直径代入(3)式中,计算可得 HI-1060 光纤与反共振 HC-PCF 之间由模场失配引起的耦合损耗接近 10 dB。在实际放电熔接过程中,由于空芯光纤结构被破坏,实际损耗值比上述计算值更大,因此 Ice-cream 型反共振 HC-PCF 与实芯光纤不适合采取熔接耦合方案进行低损耗耦合。

3.3 拉锥光纤与空芯光纤耦合仿真

利用 BeamPROP 软件建立拉锥光纤与空芯光纤的耦合模型,根据不同参数设定模型中经拉锥处理的 HI-1060 光纤锥区长度和腰区长度。仿真过程中,在 HI-1060 光纤纤芯处注入 1064 nm 波长的线偏振(LP₀₁)基模光源,计算光通过长度为 10 cm 的反共振 HC-PCF 后的耦合效率。

结合拉锥光纤模场直径仿真结果,设置拉锥光纤的锥区长度为 21 mm,腰区长度为 6 mm,对不同拉锥光纤腰区直径的耦合进行了仿真,得到了拉锥光纤与空芯光纤的耦合效率随拉锥光纤腰区直径的变化如图 3(a)所示。由图可见,当拉锥光纤的腰区直径为 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 时,实芯光纤与反共振 HC-PCF 的耦合效率超过 95%,最大可达 98%,此时拉锥光纤的腰区模场直径与反共振 HC-PCF 的模场直径较为匹配,因模场失配带来的传输损耗较小。拉锥光纤的腰区直径为 $40 \mu\text{m}$ 时光纤内的能量传输过程如图 3(b)所示,在该过程中,纤芯内存在的多模干涉使得稳定的能量与光场产生周期性变化,横向输出光场的周期性变化如图 3(c)所示。

4 实 验

4.1 实验装置

采用截断法测得的实验所用 Ice-cream 型反共振 HC-PCF 的实测传输带如图 4 所示,可见在波长为 650~1350 nm 范围内有 3 个共振波长和 2 个传输带,1064 nm 位于其中一个传输带内,传输损耗约为 $0.12 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

搭建的实验系统等效模型和拉锥光纤与反共振 HC-PCF 的耦合测量装置如图 5 所示,反共振 HC-PCF 耦合测量装置主要由两个高精度的三维调节架和二维显微镜观测系统构成。实验中,将反共振 HC-PCF 与拉锥光纤分别放置在不同三维调节架的光学平台夹具上,并通过二维显微镜进行耦合观测。耦合效率测量采用波长为 1064 nm 的光纤激光器作为光源,通过法兰盘与一端拉锥的 HI-1060 裸光纤相连接。由拉锥光

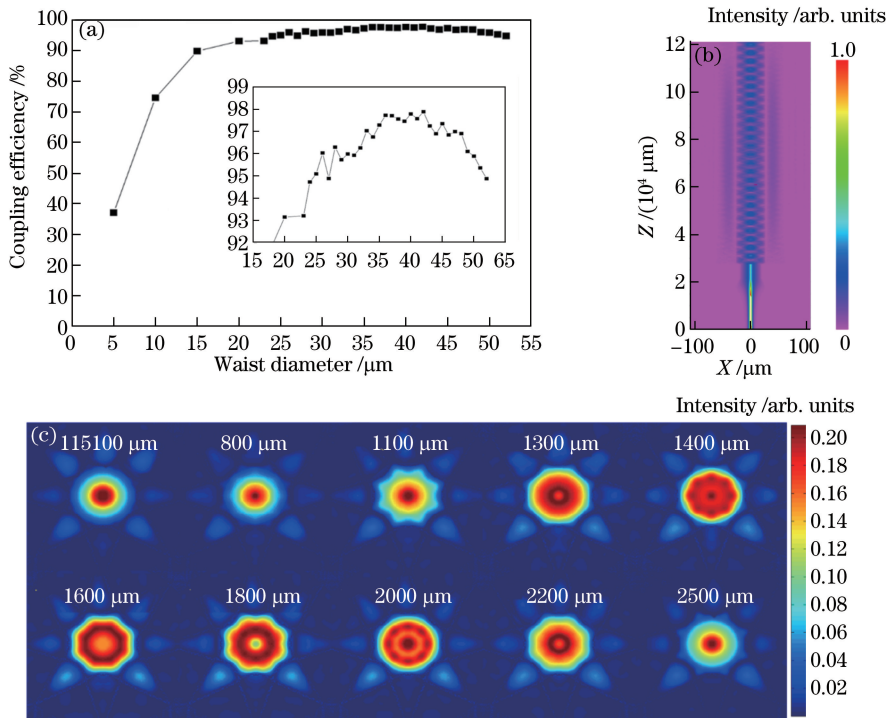


图 3 (a)锥区长度为 21 mm、腰区长度为 6 mm 的情况下,拉锥光纤与空芯光纤的耦合效率随拉锥光纤腰区直径的变化(插图为局部放大图);(b)拉锥光纤的腰区直径为 40 μm 时光纤内的能量传输过程;(c)横向输出光场的周期性变化图

Fig. 3 (a) Coupling efficiency between tapered fiber and hollow-core fiber versus waist diameter of tapered fiber when tapering length and waist length are 21 mm and 6 mm respectively (illustration is partial enlargement); (b) energy transmission process in fiber when waist diameter of tapered fiber is 40 μm ; (c) diagram of periodical change of transverse output optical field

纤等效模场直径和耦合数值仿真结果可知,拉锥光纤的腰区长度对耦合效率的影响不大,当拉锥光纤的锥区长度大于 10 mm 时,耦合结果主要取决于腰区直径的变化。实验中使用的多根拉锥光纤均采用锥区长度为 21 mm、腰区长度为 6 mm 的拉锥光纤,其腰区直径 w_0 以 5 μm 为步长从 10 μm 增加到 45 μm ,Ice-cream 型反共振 HC-PCF 的长度为 10 cm,结构如图 2(a)所示。实验过程中使用光电探测器测量 HI-1060 裸光纤拉锥端输出的光功率 P_1 ,之后通过三维调节架和二维 CCD 成像系统将拉锥光纤插入 Ice-cream 型反共振 HC-PCF 纤芯空气孔内,并通过光电探测器测量反共振空芯光纤输出端光功率 P_2 ,利用 P_1 和 P_2 即可计算出耦合效率。

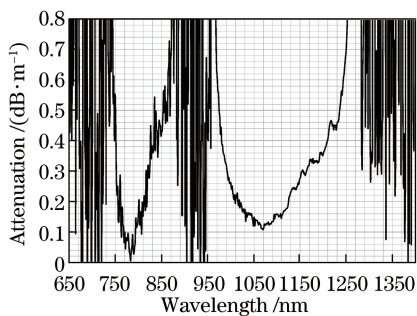


图 4 Ice-cream 型反共振 HC-PCF 实测传输带
Fig. 4 Measured transmission bands of Ice-cream type anti-resonant HC-PCF

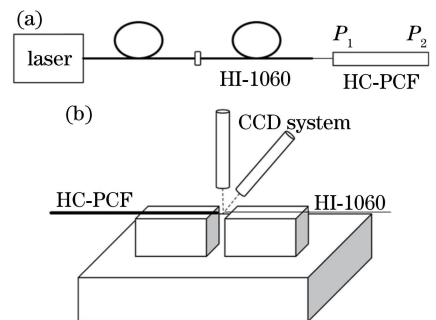


图 5 (a) 实验系统等效模型;
(b) 拉锥光纤与反共振 HC-PCF 耦合测量装置
Fig. 5 (a) Equivalent model of experimental system;
(b) coupling measurement setup of tapered fiber and anti-resonant HC-PCF

4.2 实验结果

经过多次实验,得到 Ice-cream 型反共振 HC-PCF 与拉锥光纤在不同腰区直径下的耦合效率如图 6(a)所示,当腰区直径为 $40\ \mu\text{m}$ 时测得空芯光纤的横向输出光场如图 6(b)所示。实验过程中,由于拉锥光纤注入空芯光纤时存在倾斜注入的情况,拉锥光纤的端面和腰区侧端面存在明显的结构损伤,结构损伤的拉锥光纤端面 SEM 图如图 7(a)所示。同时,空芯光纤的夹持方式不当引入的应力也会带来较大的损耗,在拉锥光纤腰区直径为 $40\ \mu\text{m}$ 时测得的耦合效率为 80%。拉锥光纤受损条件下测量得到的横向输出光场如图 6(c)所示。经过改进,在后期的实验中通过精确控制在一定程度上避免了倾斜注入和空芯光纤所受夹持应力的影响,对拉锥光纤的端面结构也进行了有效保护,端面整洁的拉锥光纤端面 SEM 图如图 7(b)所示,拉锥光纤的腰区直径为 $35\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 时的耦合效率分别为 96.05% 和 91.35%,相比于熔接耦合方案,耦合效率得到了大幅提高。

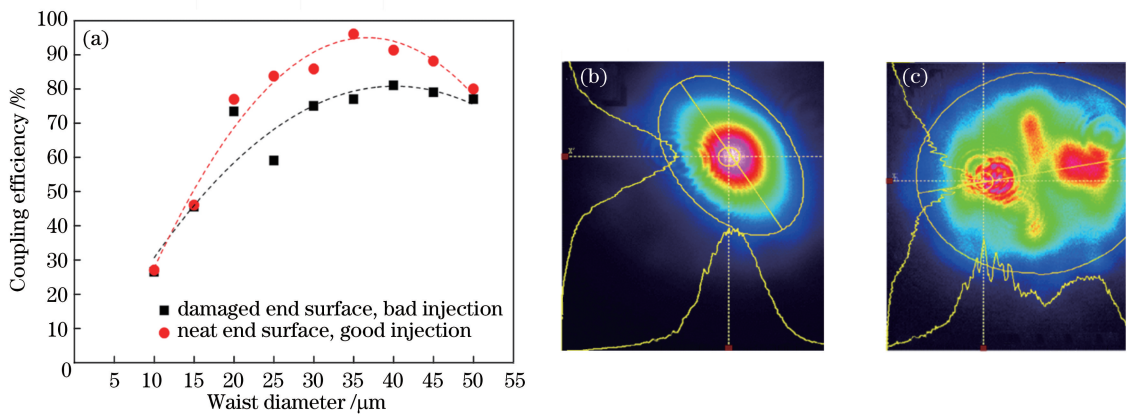


图 6 (a)拉锥光纤与空芯光纤在不同腰区直径下的耦合效率;(b)腰区直径为 $40\ \mu\text{m}$ 时测量得到的横向输出光场;
(c)拉锥光纤端面受损条件下测量得到的横向输出光场

Fig. 6 (a) Coupling efficiency between tapered fiber and hollow-core fiber at different waist diameters; (b) measured transverse output optical field when waist diameter is $40\ \mu\text{m}$; (c) measured transverse output optical field with damaged tapered fiber end surface

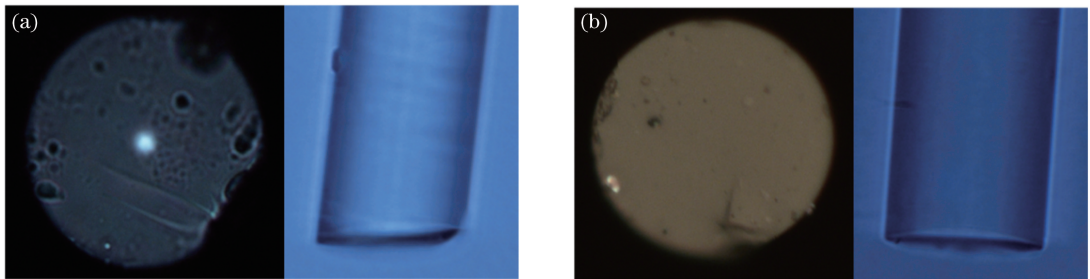


图 7 (a)结构损伤的拉锥光纤端面 SEM 图;(b)端面整洁的拉锥光纤端面 SEM 图

Fig. 7 (a) SEM image of damaged end surface of tapered fiber; (b) SEM image of neat end surface of tapered fiber

4.3 实验结果分析

实验中采用的 Ice-cream 型反共振 HC-PCF 的长度为 10 cm,测得的传输损耗为 0.012 dB,对耦合效率的影响基本可以忽略。实验过程中,当拉锥光纤的腰区直径小于 $20\ \mu\text{m}$ 时,腰区直径过小导致操作困难,极易对拉锥光纤造成损坏,降低了实验得到的耦合效率。当拉锥光纤的腰区直径大于 $40\ \mu\text{m}$ 时,腰区直径过大使得注入耦合操作较为困难,多次注入时对拉锥光纤端面造成了一定的损伤,也会降低耦合效率。此外,本实验的数值仿真模型为完全理想情况,实验采用的光纤在微结构、端面处理等方面都与理想模型存在一定差距,且在拉锥光纤注入反共振 HC-PCF 过程中,可明显观察到在没有正对 HC-PCF 纤芯空气孔中心点注入光的条件下,拉锥光纤的腰区出现了倾斜注入的情况。图 8 为倾斜注入错位 $1\ \mu\text{m}$ 和弯曲错位 $1\ \mu\text{m}$ 时光

纤内能量传输过程及横向输出光场。通过仿真可得当拉锥光纤腰区直径为 $40\ \mu\text{m}$ 时,拉锥光纤倾斜注入错位 $1\ \mu\text{m}$ 和弯曲错位 $1\ \mu\text{m}$ 条件下,耦合效率从完全理想条件时的 97.79% 分别降为 96.45% 和 96.42% 。由仿真结果还可发现,一旦发生倾斜注入错位,反共振 HC-PCF 包层中的注入光能量明显增多,且原有的因多模干涉引起的能量与光场的周期性变化遭到破坏,只要使用的空芯光纤长度增加,势必带来更大的耦合损耗。

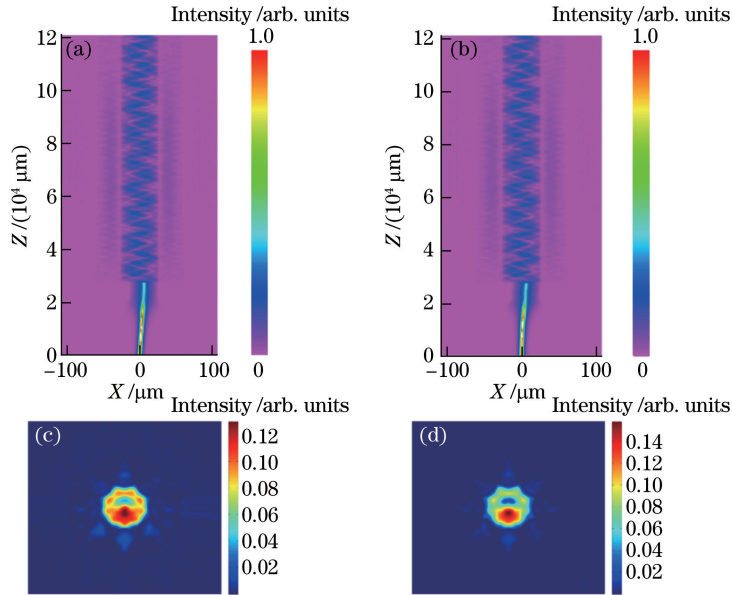


图 8 (a)倾斜注入错位 $1\ \mu\text{m}$ 的能量传输过程;(b)弯曲错位 $1\ \mu\text{m}$ 的能量传输过程;
(c)倾斜注入错位 $1\ \mu\text{m}$ 的横向输出光场;(d)弯曲错位 $1\ \mu\text{m}$ 的横向输出光场

Fig. 8 (a) Energy transmission process when tilt injecting misplacement is $1\ \mu\text{m}$; (b) energy transmission process when bending misplacement is $1\ \mu\text{m}$; (c) transverse output optical field when tilt injecting misplacement is $1\ \mu\text{m}$; (d) transverse output optical field when bending misplacement is $1\ \mu\text{m}$

同时,拉锥光纤在拉锥过程中的工艺情况会产生流变缺陷,拉锥光纤过渡区不同形状锥区带来的模场演变和损耗关系的不同以及渐变条件的不同都会对耦合效率产生一定影响。此外,光纤在拉制过程中,如果表面有灰尘或杂质,会在加热过程中形成碳化物质,环境中的灰尘也会增大拉锥光纤与空芯光纤耦合时的损耗,实验操作中发现耦合效率受以上因素的影响较大,必须在实验操作中予以克服。通过改善光纤拉锥工艺、增加消反射措施和改进实验耦合系统等,可以进一步提高耦合效率。

5 结 论

提出了一种全新的实芯光纤与反共振 HC-PCF 的低损耗耦合方案,该方案主要利用光纤拉锥后处理技术改变普通光纤的模场直径,实现了普通实芯光纤与大模场直径反共振 HC-PCF 的低损耗耦合。数值仿真结果和实验结果均表明,当拉锥光纤的腰区直径与空芯光纤的模场直径较为接近时,可达到最高耦合效率,计算得到的最佳耦合效率可达 98% 。但受拉锥光纤锥区的均匀性、锥腰在重力下发生微弱的弯曲等因素的影响,实验测得在锥腰直径为 $35\ \mu\text{m}$ 时的耦合效率为 96.05% 。提出的大模场直径空芯光纤与实芯光纤的耦合方案具有易操作、低损耗等特点,有助于促进反共振 HC-PCF 的进一步应用,特别是为实现光纤气体激光器的全光纤化提供了一条可行的技术途径。

致谢 感谢英国巴斯大学 Jonathan Knight 教授课题组为本论文提供了实验所需的空芯光纤。

参 考 文 献

- [1] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 423-431.

- [2] Nampootheri A V V, Jones A M, Fourcade-Dutin C, *et al.* Hollow-core optical fiber gas lasers (HOFGLAS): A review[J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(7): 948-961.
- [3] Russell P S J, Hölzer P, Chang W, *et al.* Hollow-core photonic crystal fibres for gas-based nonlinear optics[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(4): 278-286.
- [4] Benabid F, Roberts P J. Linear and nonlinear optical properties of hollow core photonic crystal fiber[J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(2): 87-124.
- [5] Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, *et al.* Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Science*, 2002, 298(5592): 399-402.
- [6] Benabid F, Bouwmans G, Knight J C, *et al.* Ultrahigh efficiency laser wavelength conversion in a gas-filled hollow core photonic crystal fiber by pure stimulated rotational Raman scattering in molecular hydrogen[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(12): 123903.
- [7] Couny F, Benabid F, Roberts P J, *et al.* Generation and photonic guidance of multi-octave optical-frequency combs[J]. *Science*, 2007, 318(5853): 1118-1121.
- [8] Couny F, Benabid F, Light P S. Subwatt threshold cw Raman fiber-gas laser based on H₂-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(14): 143903.
- [9] Beaudou B, Couny F, Wang Y Y, *et al.* Matched cascade of bandgap-shift and frequency-conversion using stimulated Raman scattering in a tapered hollow-core photonic crystal fibre[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12381-12390.
- [10] Trabold B M, Abdolvand A, Euser T G, *et al.* Efficient anti-Stokes generation via intermodal stimulated Raman scattering in gas-filled hollow-core PCF[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29711-29718.
- [11] Trabold B M, Abdolvand A, Euser T G, *et al.* Amplification of higher-order modes by stimulated Raman scattering in H₂-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 600-602.
- [12] Yu F, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss silica hollow core fibers for 3-4 μm spectral region[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11153-11158.
- [13] Yu F, Knight J C. Spectral attenuation limits of silica hollow core negative curvature fiber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21466-21471.
- [14] Wang Z F, Yu F, Wadsworth W J, *et al.* Efficient 1.9 μm emission in H₂-filled hollow core fiber by pure stimulated vibrational Raman scattering[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(10): 105807.
- [15] Gu B, Chen Y B, Wang Z F. Characteristics of 1.9- μm laser emission from hydrogen-filled hollow-core fiber by vibrational stimulated Raman scattering[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(12): 126114.
- [16] Chen Yubin, Gu Bo, Wang Zefeng, *et al.* 1.5 μm fiber gas Raman laser source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0506002.
陈育斌, 顾博, 王泽锋, 等. 1.5 μm 光纤气体拉曼激光光源[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0506002.
- [17] Chen Y B, Wang Z F, Gu B, *et al.* Achieving a 1.5 μm fiber gas Raman laser source with about 400 kW of peak power and a 6.3 GHz linewidth[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5118-5121.
- [18] Gu Bo, Chen Yubin, Wang Zefeng. Red, green and blue laser emissions from H₂-filled hollow-core fiber by stimulated Raman scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0806005.
顾博, 陈育斌, 王泽锋. 基于空芯光纤中氢气级联 SRS 的红绿蓝色激光[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0806005.
- [19] Wang Haibin, Liu Ye, Wang Jinzu, *et al.* Preparation of all-fiber low-pressure CO₂ gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706007.
王海宾, 刘晔, 王进祖, 等. 光纤型空芯光子晶体光纤低压 CO₂ 气体腔的制备[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706007.
- [20] Light P S, Couny F, Benabid F. Low optical insertion-loss and vacuum-pressure all-fiber acetylene cell based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2538-2540.
- [21] Benabid F, Couny F, Knight J C, *et al.* Compact, stable and efficient all-fibre gas cells using hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2005, 434(7032): 488-491.
- [22] Wheeler N V, Grogan M D W, Light P S, *et al.* Large-core acetylene-filled photonic microcells made by tapering a hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1875-1877.
- [23] Xie S, Pennetta R, Russell P S J. Self-alignment of glass fiber nanospike by optomechanical back-action in hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Optica*, 2016, 3(3): 277-282.

- [24] Xi Xiaoming. Studies on characters and applications of tapered optical fibers [D]. Changsha: National University of Defense and Technology, 2010.
奚小明. 拉锥光纤的特性和应用研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [25] Duguay M A, Kokubun Y, Koch T L, *et al.* Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO₂-Si multilayer structures [J]. Applied Physics Letters, 1986, 49(1): 13-15.
- [26] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, *et al.* Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides [J]. Optics Letters, 2002, 27(18): 1592-1594.