

用于气体痕量检测的中红外空心布拉格光纤*

邢文鑫¹⁾ 张 巍^{1)†} 石立超¹⁾ 王 雯¹⁾ 赵 红²⁾ 李志广²⁾ 黄翊东¹⁾ 彭江得¹⁾

1) (清华大学电子工程系, 北京 100084)

2) (北京玻璃研究院, 北京 101111)

(2009 年 11 月 12 日收到; 2010 年 7 月 8 日收到修改稿)

布拉格光纤是一种一维光子晶体带隙导引光纤. 针对布拉格光纤在气体痕量检测领域的应用, 设计了传输波段中心波长位于中红外波段的半导体玻璃/有机聚合物基空心布拉格光纤. 通过预制棒熔拉法, 制备出了中红外空心布拉格光纤的样品. 传输谱和弯曲特性测试表明布拉格光纤样品具有两个明显的传输波段, 体现了带隙导光的特征. 低阶传输波段的中心波长为 $4.4 \mu\text{m}$.

关键词: 布拉格光纤, 中红外, 气体痕量检测, 一维光子晶体

PACC: 4281P, 4270Q

1. 引 言

布拉格光纤是一种具有一维光子晶体包层的带隙导引光纤. 它在结构特征、导光机制和传输特性上与传统光纤完全不同, 有可能突破石英光纤的性能局限, 极大地拓展光导纤维的应用领域. 布拉格光纤的概念早在 20 世纪 70 年代末由 Yeh 等^[1] 提出. 近十余年来, 随着光子晶体光纤的发展, 布拉格光纤结构逐渐引起人们重视. 特别是 1998 年 Winn 等^[2] 提出并论证了一维光子晶体的全向反射现象, 使人们意识到布拉格光纤结构能够支持独特的全向反射导光机制, 具有类金属波导的特征. 2002 年, Temelkuran 等^[3] 基于这一理论首次制备出在中红外波段导光的空心布拉格光纤. 近年来, 这种基于半导体玻璃和有机聚合物材料的布拉格光纤引起人们的特别关注, 已在高功率二氧化碳激光传输上取得商业应用^[4], 并在光传感^[5] 以及光电功能器件^[6,7] 等领域展现出十分广阔的应用前景.

中红外空心布拉格光纤的重要潜在应用之一是气体痕量检测. 高灵敏度的气体检测基于气体吸收谱测量, 检测装置的核心部件为气体吸收室. 气体对光的吸收与光波和气体的相互作用长度呈指数关系, 因此, 提高气体传感灵敏度重要途径之一

是延长气体吸收室的有效光程. 采用空心光纤作为气体吸收室^[8] 可以在延长光与气体相互作用长度的同时, 通过光纤的盘绕实现紧凑的气体室结构, 无需空间光学准直, 稳定性高. 另一方面, 这种气体室可以极大地减少待测气体的用量, 在微量气体分析中有重要的应用, 近年来引起很大关注. 在目前的研究工作中, 可用于气体传感的空心光纤包括石英空心光子晶体光纤和内壁镀金属的空心光纤. 然而, 石英光子晶体光纤传输波段局限在可见光和近红外波段^[9,10], 难以工作在环境保护和生物医学所关心的待测气体主吸收峰所在的中红外波段. 内壁镀金属的空心光纤虽然可用于中红外波段, 但是它的光纤长度受到制备工艺中镀金属层^[11] 环节的限制, 难以支持较长的光与气体相互作用长度. 而基于半导体玻璃和有机聚合物的中红外空心布拉格光纤采用中红外透明的材料作为光纤基质, 通过一维光子晶体包层结构的参数设计可以使它的传输波段位于气体传感最为关心的中红外波段. 另一方面, 它采用预置棒熔拉法制备, 支持长达百米的光纤长度. 由此可知, 中红外空心布拉格光纤综合了石英光子晶体光纤和镀金属空心光纤两者的特点, 是高灵敏度气体吸收室的理想光纤媒质.

本文面向布拉格光纤在痕量气体检测中的潜在应用, 设计了半导体玻璃/有机聚合物基中红外

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327600)、国家自然科学基金 (批准号: 60777032) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4102028) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zwei@tsinghua.edu.cn

空心布拉格光纤的结构参数. 通过预制棒熔拉法制备出了中红外空心布拉格光纤的样品, 并对它的传输谱和弯曲特性进行了实验测量, 论证了光纤样品的一维光子晶体带隙导光特性.

2. 中红外空心布拉格光纤的结构参数设计

面向气体痕量检测, 我们设计的中红外空心布拉格光纤传输波段位于气体传感最为关心的 3—5 μm 波段, 中心波长位于 4.3 μm , 对应于二氧化碳气体的主吸收峰. 光纤结构如图 1 所示. 光纤具有空心结构, 空心芯区的半径为 R . 光纤包层是两种折射率不同的材料层周期性交替分布形成的一维光子晶体结构. 低折射率材料为聚醚酰亚胺 (PEI), 其折射率和层厚分别用 n_1 和 d_1 表示; 高折射率材料为硒化砷, 其折射率和层厚分别用 n_2 和 d_2 表示. 一维光子晶体的周期 $\Lambda = d_1 + d_2$. 沿光纤径向材料折射

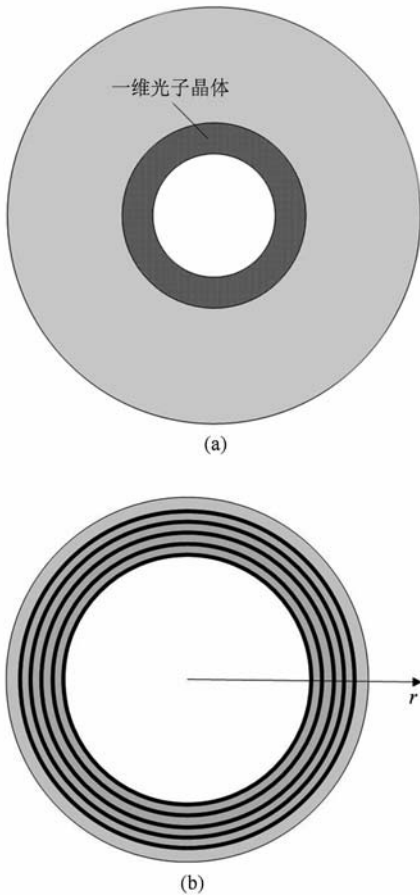


图 1 布拉格光纤结构示意图 (a) 布拉格光纤由 PEI 包层、一维光子晶体层、空心芯区三部分构成, (b) 一维光子晶体由 PEI 层 (灰色) 和硒化砷层 (黑色) 交替构成

率的变化如图 2 所示.

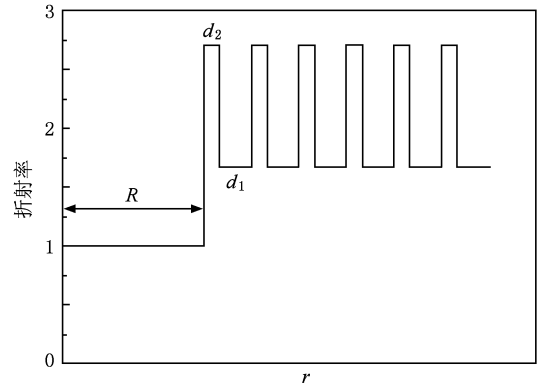


图 2 沿光纤径向 (图 1(b) 中 r 方向) 材料折射率的变化

布拉格光纤的结构参数设计采用一维光子晶体能带计算的传输矩阵方法^[12,13]. 一维光子晶体带隙边界处的频率 ω 和平行于周期层方向的波矢分量 k_y 可由下式得到:

$$|\cos k_{1x}d_1 \cos k_{2x}d_2 - K \sin k_{1x}d_1 \sin k_{2x}d_2| = 1, \quad (1)$$

其中 $k_{ix} = \sqrt{(\omega n_i/c)^2 - k_y^2}$ ($i = 1, 2$); c 为真空中光速; 对于横电 (TE) 偏振模式,

$$K = \frac{1}{2} \left(\frac{k_{1x}}{k_{2x}} + \frac{k_{2x}}{k_{1x}} \right), \quad (2a)$$

对于横磁 (TM) 偏振模式,

$$K = \frac{1}{2} \left(\frac{n_2^2 k_{1x}}{n_1^2 k_{2x}} + \frac{n_1^2 k_{2x}}{n_2^2 k_{1x}} \right). \quad (2b)$$

在半导体玻璃/有机聚合物基布拉格光纤中, PEI 的折射率 $n_2 = 1.6$, 硒化砷的折射率 $n_1 = 2.7$. 设两材料厚度比为 5:1 (决定于光纤制备工艺条件), 则包层一维光子晶体结构的归一化能带如图 3 所示. 图 3 的左半部分对应 TM 偏振模式, 右半部分对应 TE 偏振模式, 虚线表示的是真空中平面均匀电

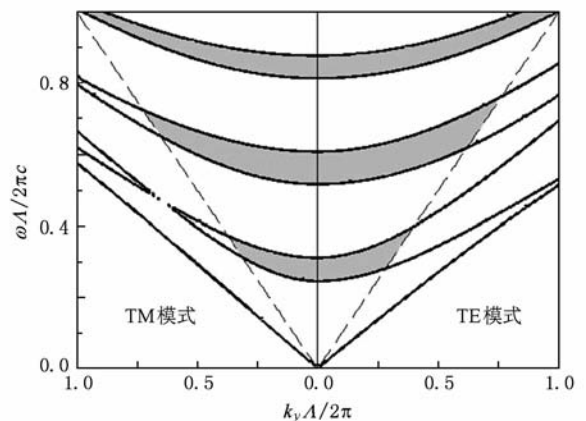


图 3 一维光子晶体的归一化能带图 图中阴影区域为带隙区域

磁波的色散曲线. 大芯区半径的空心布拉格光纤是多模光纤, 各导模色散曲线位于真空中平面均匀电磁波的色散曲线(即虚线)边界以上的一维光子晶体带隙中(图中阴影区域), 且大多数导模色散曲线靠近虚线边界^[14]. 从图3可以看出, TM模式的带隙宽度更窄, 我们以此来估计空心布拉格光纤的传输带宽. 由此可以从图3得到一阶传输频段的归一化中心频率为 $\omega\Lambda/(2\pi c) = 0.34$.

本文设计的布拉格光纤的一阶传输波段的中心波长 $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$, 则一维光子晶体的周期 $\Lambda = \frac{0.34 \times 2\pi C}{\omega} = \frac{0.34 \times 2\pi C}{2\pi \frac{C}{\lambda}} = 0.34\lambda = 1.46 \mu\text{m}$, 相应

的硒化砷层厚度 $d_1 = 0.24 \mu\text{m}$, PEI 层厚度 $d_2 = 1.22 \mu\text{m}$.

3. 中红外空心布拉格光纤样品的制备与测试

光纤样品的制备采用预制棒熔拉法. 具体步骤如下: 首先, 在 PEI 薄膜上蒸发一层硒化砷材料; 然后将 PEI 薄膜卷在玻璃棒上经高温烧结制成棒, 进而用氢氟酸腐蚀去除预制棒中的玻璃管, 形成带有周期包层的空心布拉格光纤预制棒; 最后将预制棒送入拉丝装置中加热拉制成直径为数百微米的空心布拉格光纤.

图4是制备成功的空心布拉格光纤样品的扫描电子显微镜照片. 为了得到较完整的布拉格光纤截面照片, 我们用环氧树脂作为光纤结构的支撑, 使用超薄切片机进行光纤端面的处理. 从图4(a)可以看出, 光纤包层内侧有 PEI 层和 As_2Se_3 层交替形成的一维光子晶体结构, 内部为空心芯区(端面处理过程中填充了环氧树脂材料), 芯区直径约为 $300 \mu\text{m}$, 是典型的多模光波导. 一维光子晶体外部为 PEI 保护层, 光纤的外径 $d = 644 \mu\text{m}$. 照片中少量的刀痕和裂缝是在样品制备中超薄切片过程形成的局部损伤. 图4(b)是光纤样品中一维光子晶体结构的局部放大照片. 由此可知, 一维光子晶体周期 $\Lambda = 14.65/11 = 1.33 \mu\text{m}$ 其中 As_2Se_3 层约占 $1/6$, 其厚度 $d_1 = 1.33/6 = 0.22 \mu\text{m}$, PEI 层厚度 $d_2 = 1.11 \mu\text{m}$.

为了论证中红外空心布拉格光纤样品的带隙导光特性, 我们利用傅里叶变换红外(FTIR)光谱仪对光纤样品的传输特性进行了测试. 测试系统如图5所示, 该系统由 FTIR 光谱仪、碲镉汞(MCT)红外

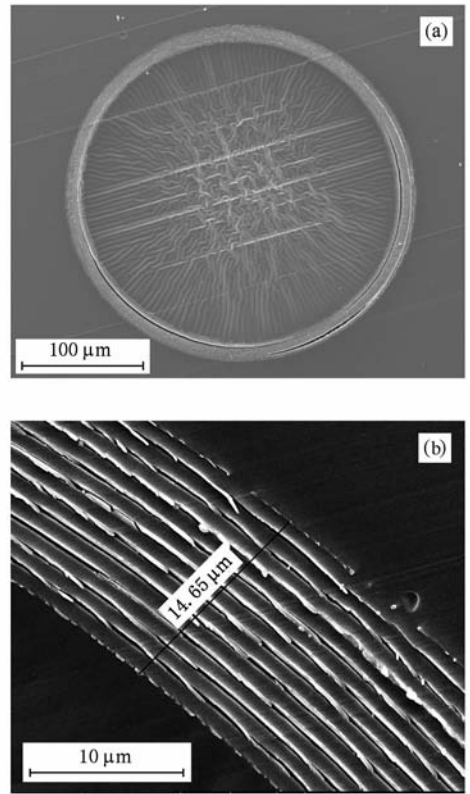


图4 布拉格光纤样品横截面的扫描电子显微镜照片 (a)一维光子晶体层和空气孔的整体图像, (b)一维光子晶体层的局部放大照片

探测器和光纤测试组件构成. 光纤测试组件包括镀金非球面镜及光纤固定和调整装置. 红外宽谱光由 FTIR 光谱仪输出, 经镀金非球面镜耦合入中红外空心布拉格光纤样品, 经过光纤传输, 输出光再经另一镀金非球面镜耦合到 MCT 探测器中.

布拉格光纤样品的传输特性测试结果如图6所示. 图6(a)为光源通过一段 25 cm 长的无一维光子晶体层的空心 PEI 纤维后的输出光谱. 从图6(a)可以看出, 在 2300 cm^{-1} (对应波长 $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$) 处有一凹坑, 凹坑中另有一细小的尖峰, 此即二氧化碳在 $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$ 处的主吸收峰特征, 反映了空气中的二氧化碳对红外光的吸收.

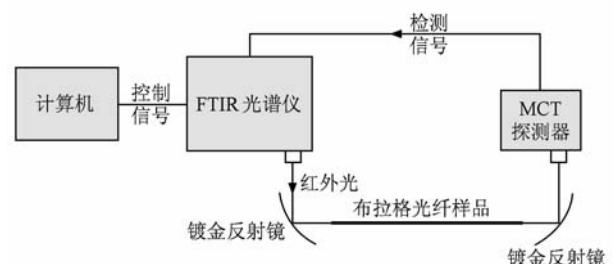


图5 中红外空心布拉格光纤传输谱测试系统

我们对一段长度为 27 cm 的中红外空心布拉格光纤样品进行了测试, 经光纤样品传输后的红外光谱如图 6(b) 所示. 比较图 6(a), (b) 可知, 透过光功率水平明显增强, 且光谱上有两个明显的透过峰, 波数范围分别是 2100—2500 和 4400—5000 cm^{-1} , 对应的波长范围是 4—4.76 和 2—2.27 μm . 这两个透过峰的波长正好成两倍关系, 分别与图 3 中一维光子晶体的第一阶带隙和第二阶带隙对应, 说明这两个透过峰来自光纤包层一维光子晶体引入的带隙导光作用.

进一步, 我们在布拉格光纤样品中段弯曲了一个直径为 3 cm 的圆环后再一次进行测试, 所得结果如图 6(c) 所示. 从图 6(c) 可以看出, 两透过峰依然明显存在, 而其他波长处的透过光信号强度有明显下降, 几乎为零. 这说明在布拉格光纤样品传输波段内的红外光由于包层一维光子晶体的带隙作用, 受光纤弯曲的影响相对较小, 而在传输波段之外的光在弯曲以后几乎完全泄漏掉. 这一实验结果也充分说明了制备得到的中红外空心布拉格光纤样品具有明显的带隙导光特征.

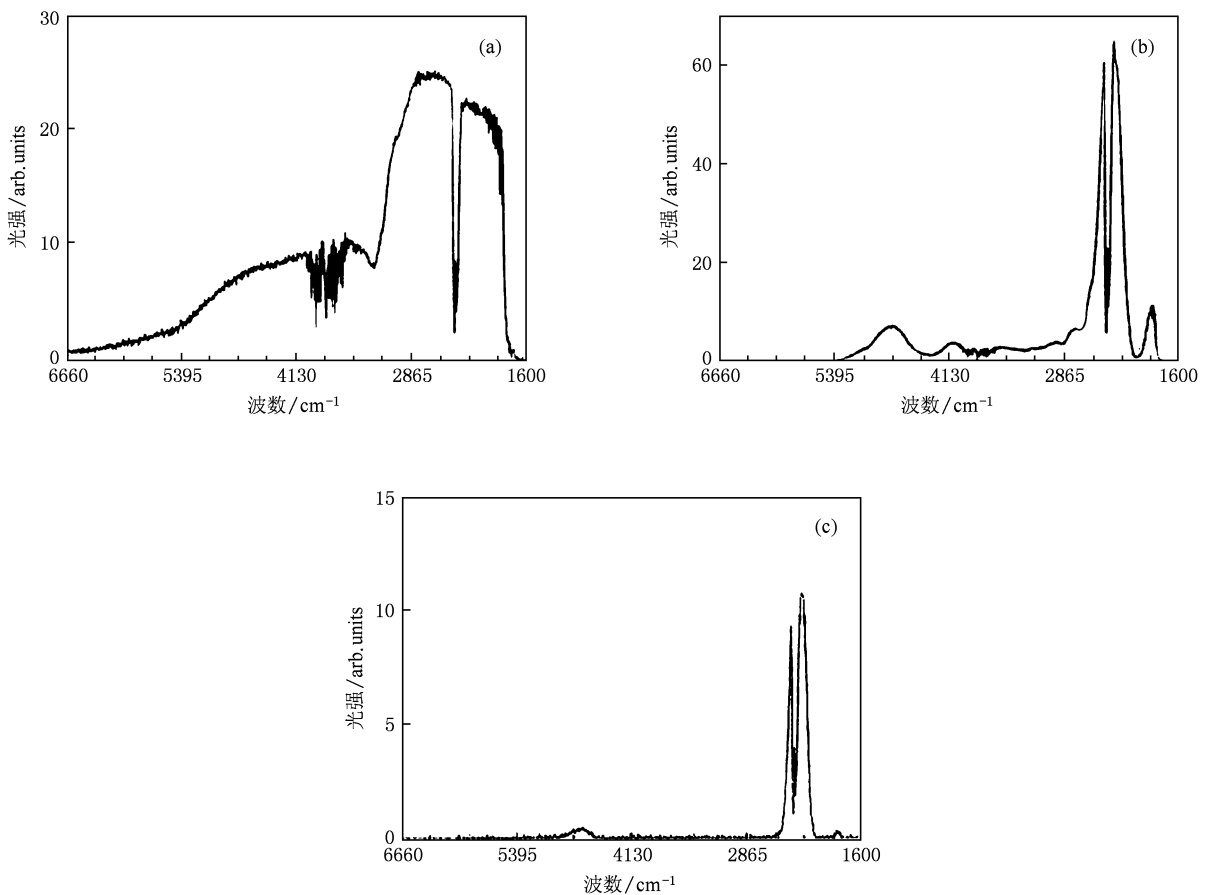


图 6 测试得到的中红外空心布拉格光纤样品的传输特性 (a) 光源通过一段 25 cm 无一维光子晶体层的空心 PEI 纤维后的输出光谱, (b) 红外光经过布拉格光纤样品传输后的透射光谱, (c) 布拉格光纤样品弯曲后红外光的透射光谱

4. 讨 论

在气体痕量检测应用中, 不同待测气体的主吸收峰波长不同, 需要对空心布拉格光纤进行有针对性的设计, 并在制备工艺中能够控制相关结构参数以达到设计要求. 空心布拉格光纤制备选用的半导体玻璃/有机聚合物材料在 0.8—12 μm 波长范围

内透明, 理论上可以通过设计包层一维光子晶体的结构参数将光纤的传输波段设计在 12 μm 以下的任意近红外和中红外波段. 在实际光纤设计和制备中, 选用的聚合物薄膜厚度和实验中半导体玻璃真空蒸发厚度直接决定了光纤预制棒中高低折射率层的厚度比和周期 (在我们的实验中, 聚合物材料与硒化砷层的厚度比约为 5:1, 周期约为 30 μm). 在布拉格光纤拉制过程中, 通过调整拉丝速度可以

控制光纤的直径,从而控制光纤包层一维光子晶体结构的周期.在厚度比确定的情况下,光纤的导光波段完全由包层一维光子晶体结构周期确定.因此,对于不同待测气体主吸收峰对应的不同导光波长,相应布拉格光纤的直径不同,实验上可以通过拉丝控制实现.

作为用于气体痕量检测的空心光纤媒质,中红外空心布拉格光纤除了可以利用待测气体主吸收峰的优点外,还具有另外两个特点.一是它采用预制棒熔拉法制备,光纤长度仅受预制棒尺寸限制,易于实现上百米的光纤拉制,又可通过盘绕缩小占用的空间,具有实现紧凑的超长气体吸收室的潜力.二是它的芯径在百微米量级,利用很少的待测气体样品即可实现痕量气体检测(我们在实验中光纤样品芯区直径约为 300 μm ,实现 5 m 长度的气体吸收室测量仅需消耗待测气体约 350 ml),特别适

用于稀缺气体样品的检测.

5. 结 论

半导体玻璃/有机聚合物基空心布拉格光纤的材料在 0.8—12 μm 波长范围内透明,通过对包层一维光子晶体的结构参数设计可以将光纤的传输波段设计在气体传感最为关心的中红外波段,而它的空心结构又为填充待测气体、实现长的光与气体相互作用长度提供了可能.因此,它在气体痕量检测领域有重要的应用价值.本文面向这一应用,设计了传输波段中心波长位于 4 μm 附近的半导体玻璃/有机聚合物基空心布拉格光纤.通过预制棒熔拉法,制备出了中红外空心布拉格光纤的样品.进行了传输谱和弯曲特性的测试,实验论证了布拉格光纤样品带隙导光的特性.

- [1] Yeh P, Yariv A, Marom E 1978 *J. Opt. Soc. Am.* **68** 1196
- [2] Winn J N, Fink Y, Fan S H, Joannopoulos J D 1998 *Opt. Lett.* **23** 1573
- [3] Temelkuran B, Hart S D, Benoit G, Joannopoulos J D, Fink Y 2002 *Nature* **420** 650
- [4] Anastassiou C, Dellemann G, Weisberg O, Kolodny U 2004 *Photon. Spec.* **38**(3) 108
- [5] Abouraddy A F, Shapira O, Bayindir M, Arnold J, Sorin F, Hinczewski D S, Joannopoulos J D, Fink Y 2006 *Nat. Mater.* **5** 532
- [6] Bayindir M, Shapira O, Saygin-Hinczewski D, Viens J, Abouraddy A F, Joannopoulos J D, Fink Y 2005 *Nat. Mater.* **4** 820
- [7] Dupuis A, Guo N, Gauvreau B, Hassani A, Pone E, Boismenu F, Skorobogatiy M 2007 *Opt. Lett.* **32** 2882
- [8] Benabid F, Couny F, Knight J C, Birks T A, Russell P S 2005 *Nature* **434** 488
- [9] Mi Y, Hou L T, Zhou G Y, Wang K, Chen C, Gao F, Liu B W, Hu M L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3583 (in Chinese) [米 艳、侯蓝田、周桂耀、王 康、陈 超、高 飞、刘博文、胡明列 2008 物理学报 **57** 3583]
- [10] Yuan J H, Hou L T, Zhou G Y, Wei D B, Wang H Y, Dong S R, Wang Q Y, Liu B W, Hu M L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4203 (in Chinese) [苑金辉、侯蓝田、周桂耀、魏东宾、王海云、董世蕊、王清月、刘博文、胡明列 2008 物理学报 **57** 4203]
- [11] Shi Y W, Zhou Z Y, Tang X L, Sui K R, Zhu X S 2009 *J. Infrared Millim. Waves* **28** 111 (in Chinese) [石艺尉、周志云、汤晓黎、隋可融、朱晓松 2009 红外与毫米波学报 **28** 111]
- [12] Yeh P, Yariv A, Hong C S 1977 *J. Opt. Soc. Am.* **67** 423
- [13] Fink Y, Winn J N, Fan S, Chen C, Michel J, Joannopoulos J D, Thomas E L 1998 *Science* **282** 1679
- [14] Ibanescu M, Johnson S G, Soljacic M, Joannopoulos J D, Fink Y, Weisberg O, Engeness T D, Jacobs S A, Skorobogatiy M 2003 *Phys. Rev. E* **67** 046608

Mid-infrared hollow-core Bragg fiber for trace gas detection*

Xing Wen-Xin¹⁾ Zhang Wei^{1)†} Shi Li-Chao¹⁾ Wang Wen¹⁾ Zhao Hong²⁾

Li Zhi-Guang²⁾ Huang Yi-Dong¹⁾ Peng Jiang-De¹⁾

1) (*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*Beijing Glass Research Institute, Beijing 101111, China*)

(Received 12 November 2009; revised manuscript received 8 July 2010)

Abstract

Bragg fiber is one kind of microstructure fiber with one-dimensional photonic crystal layer in its fiber cladding. In this paper, the hollow-core Bragg fiber for trace gas detection, with a transmission band in the mid-infrared band, is designed and fabricated based on semiconductor glass and polymer materials. The measurements of the fiber sample demonstrate its bandgap-guided properties, showing two obvious bandgap guided transmission bands. The central wavelength of the lowest transmission band is 4.4 μm .

Keywords: Bragg fiber, mid-infrared, trace gas detection, one-dimensional photonic crystal

PACC: 4281P, 4270Q

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2010CB327600), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60777032) and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4102028).

† Corresponding author. E-mail: zwei@tsinghua.edu.cn