

基于补偿叠层挤压的全固态硫系布拉格光纤

杨克羽^{1,2}, 孙伟路^{1,2}, 盛俊凯^{1,2}, 彭芊芊^{1,2}, 白胜闯^{1,2}, 戴世勋^{1,2}, 王训四^{1,2,3*}¹宁波大学信息科学与工程学院高等技术研究院红外材料与器件实验室, 浙江 宁波 315211;²浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211;³宁波海洋研究院, 浙江 宁波 315832

摘要 基于有效全向反射原理的布拉格光纤可以通过调谐周期性的包层结构参数来实现特定波长的高功率传输。为了克服传统空心布拉格光纤易于形变的缺点,制备了一种基于补偿叠层挤压技术的硫系玻璃纤芯全固态布拉格光纤,解决了传统叠层挤压引起的光纤层厚不均匀问题。该光纤含有三对厚度相同的包层对,在整根 6 m 长光纤中包层对的厚度与光纤直径的比例保持恒定的 3:100。该光纤在 4~10 μm 的波长范围内具有四个明显的低损耗窗口,证明了优化玻璃厚度的补偿叠层技术可以有效改善光纤结构及光传输性能。

关键词 光纤光学; 全固态; 布拉格光纤; 硫系玻璃; 叠层挤压法

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230677

1 引言

布拉格(Bragg)光纤是一种具有全向反射光子带隙的新型光子晶体光纤^[1],由低折射率纤芯和周期性交替的高、低折射率包层构成,在光纤传感、色散调控方面表现出优越的性能^[2-5]。目前布拉格光纤的光学特性(如光子带隙、泄漏损耗、模式分布等)已经在理论上得到了大量的研究^[6-9],其常作为传能光纤、高功率光耦合器件,被应用到高功率红外激光传输、气体非线性光学作用领域。布拉格光纤的纤芯一般为空气,但空气孔的存在导致包层区域中的微结构发生变形,故难以制备出具有预定光学性能的光纤^[10]。全固态的光纤结构可以有效改善光纤结构变形问题,解决空气孔导致的包层变形与纤芯坍塌等问题。此外,在纤芯中引入固态或液态介质可使布拉格光纤应用于更多领域^[11]。由于制造技术的限制,全固态布拉格光纤的发展受限。2004年,Katagiri等^[12]通过溅射技术将Si和SiO₂逐层沉积到石英光纤上,制备出具有16层包层的石英芯布拉格光纤,该光纤长20 cm,纤芯直径为125 μm 。2005年,Feng等^[13]报道了一种基于玻璃堆叠和挤压技术的布拉格光纤,纤芯是掺杂的硼硅酸盐玻璃,但是光纤结构非常不均匀,包层厚度从100 nm到780 nm不等。2007年,Dupuis等^[14]报道了一种具有聚合物纤芯的布拉格光纤,实现了光在多个可见光波段的传输,证明了在可见光区间光纤多包层厚度的变化

可以调控光子带隙的位置和传输性能。尽管全固态布拉格光纤在带隙特性调控方面表现出巨大的潜力,但实验证明,该类光纤仅限于应用于近红外波段的石英光纤和聚合物光纤,应用于中红外波段的全固态布拉格光纤仍处于理论仿真阶段,这是因为在其他柔性光纤(如硫系光纤)中制备热匹配材料和精确的光纤结构仍具有挑战性。

本文开发出一种低损耗且光纤结构均匀的全固态硫系布拉格光纤,实现了硫系布拉格光纤在中红外波段的应用。基于叠层挤压法,采用厚度补偿的硫系玻璃薄片制备出具有三对包层的全固态硫系布拉格光纤,三对高低折射率包层厚度与光纤直径的比例基本一致,在6 m长的光纤中每层厚度与光纤直径的比例约为3:100。由于拉制的光纤在不同位置处具有不同的直径,因此包层厚度有所不同,但误差小于0.5 μm 。上述结果证明了以硫系玻璃为基质材料采用叠层挤压法制备硫系布拉格光纤的可行性。

2 全固态硫系布拉格光纤的理论模型

2.1 布拉格光纤理论模型与导光机制

全固态布拉格光纤利用一维光子晶体的全向反射光子带隙(PBG)效应,将光限制在纤芯中传播,可以实现宽光谱、宽角度甚至全角度的光反射^[15]。图1(a)、(b)为全固态布拉格光纤的横截面图与折射率分布图,纤芯区域为低折射率硫系材料,其折射率为

收稿日期: 2023-04-03; 修回日期: 2023-05-11; 录用日期: 2023-06-01; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(U22A2085, 62205163, 61875097, 61935006)、浙江省杰出自然科学基金(LY20F050010, LQ21F050005)、宁波市自然科学基金(2021J076)、宁波市领军拔尖人才培养项目、王宽诚幸福基金

通信作者: *wangxunsi@nbu.edu.cn

n_0 , 半径为 R , 高低折射率层材料的折射率分别为 n_1, n_2 (其折射率差为 dn), 包层厚度分别为 d_1, d_2 的两种材料交替排列, 形成周期性包层, 晶格周期为 Λ , 包层周期数量为 M , 光纤半径为 r 。由文献[15-16]可知, 光纤的高低折射率差越大, 光子带隙越宽。因此, 本文优先选择折射率相差较大的组分作为光纤材料, 通过调整玻璃组分实现玻璃的热学性能匹配。

根据光波导理论, 光在介质中是以倏逝波或者振荡的传导波形式进行传播, 其特性主要取决于传播常数 β ($\beta = kn \cos \theta$, n 为介质的折射率, k 为波矢大小, θ 为波矢与沿波导方向传播的光的夹角)。当 $\beta < kn_2$ 时, 光可以在所有层中传播。多次散射和干涉导致布拉格条件下会出现带隙, 从而导致布拉格形式的光子带隙导光。对于某一特定波长和入射角的光, 这种多重

散射和干涉将导致光重新回到纤芯中并沿轴向传播。即当 $\beta < kn_2$ 时, 光在光纤的所有区域中传播, 其基本原理为布拉格衍射^[17], 这是布拉格光纤的导光机制, 如图 1(c) 所示。

本文所设计的全固态硫系布拉格光纤的高折射率层材料为 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$, 纤芯和低折射率层材料均为 As_2S_3 , 表 1 给出了上述两种硫系玻璃材料的主要物理特性。从表 1 可知, 两种玻璃在 $2 \mu\text{m}$ 波长处的折射率分别约为 3.2684 和 2.412, 折射率差约为 0.8。包层具有大的折射率差, 可以形成较宽的光子带隙, 有利于光纤导光。此外, $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 玻璃与 As_2S_3 玻璃都具有较高的红外透过率和较宽的红外透过范围, 且热学参数接近, 有利于预制棒和光纤制备。

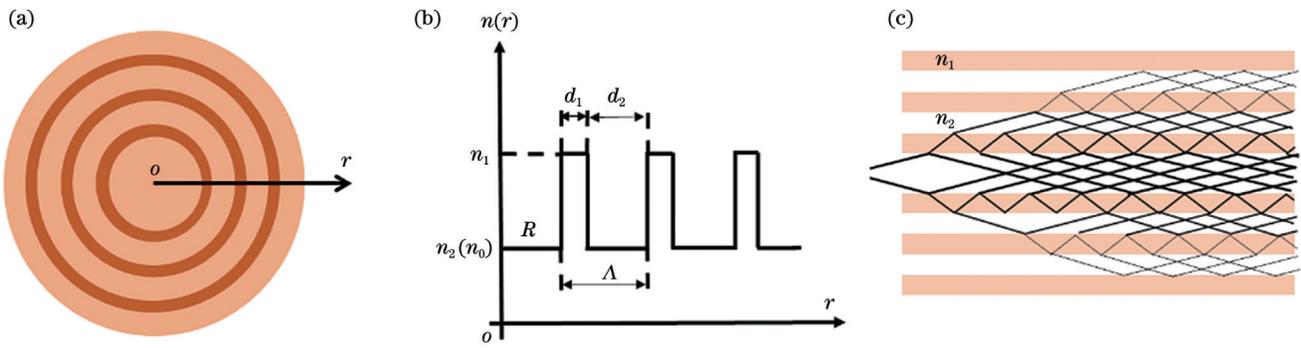


图 1 布拉格光纤模型。(a) 横截面图; (b) 折射率分布; (c) 导光原理 ($n_1 > n_2$)^[17]

Fig. 1 Model of Bragg fiber. (a) Cross-sectional diagram; (b) refractive index distribution; (c) light guiding principle ($n_1 > n_2$)^[17]

表 1 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 和 As_2S_3 的材料特性
Table 1 Material properties of $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ and As_2S_3

Parameter	$\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$	As_2S_3
Refractive index n @ $2 \mu\text{m}$	3.2684	2.4268
Transmittance range / μm	2-16	1-8
Conversion temperature T_g / $^\circ\text{C}$	187	175

2.2 布拉格光纤理论结构参数的设计

布拉格光纤的带隙和损耗特性与结构参数紧密相关, 其中带隙特性主要与高、低折射率包层的折射率差和厚度比例有关。本文选择的包层材料为 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 与 As_2S_3 , 两者折射率差约为 0.8, 通过改变包层材料厚度可得不同 d_1/d_2 时的光子带隙。不同 d_1/d_2 下的第一带隙宽度如表 2 所示, 可以看出, 光子带隙的宽度随低折射率层厚度的增加呈现出先展宽后缩窄的变化趋势。当高、低折射率包层的厚度之比为 1 (即高、低折射率包层厚度相等) 时, 带隙最宽, 此时包层厚度满足四分之一波长堆叠条件, 即两种交替介质层的光学厚度为四分之一波长。 d_1/d_2 为 1 时的光子带隙结构仿真结果如图 2 所示, 其中横轴为归一化传播常数 $B = \beta\Lambda$, 纵轴为归一化频率 $k\Lambda$, TE 为横电模, TM 为横磁模。归一化频率范围 (即带隙分布范

围) 与包层厚度比例直接相关, 归一化频率 (f) 与晶格周期 Λ 存在以下关系: $f = 2\pi\Lambda/\lambda$, λ 为传输波长, $\lambda = 10 \mu\text{m}$ 。本文选择 d_1/d_2 为 1 时归一化频率为 4.57~4.79 的高阶带隙, 晶格周期应为 6.56~6.88 μm 。通过比较分析可知, 晶格周期中间位置的光纤的传输性能较好, 因此当 d_1/d_2 为 1 时, 选取 $\Lambda = 6.72 \mu\text{m}$, 即 $d_1 = d_2 = 3.36 \mu\text{m}$ 。

光在传输过程中只有无限包层才能完全将光束缚

表 2 不同 d_1/d_2 下的第一带隙宽度

Table 2 First bandgap widths under different d_1/d_2

d_1/d_2	Width / μm
1/9	0.07
2/8	0.12
3/7	0.17
4/6	0.17
5/5	0.18
6/4	0.14
7/3	0.11
8/2	0.07
9/1	0.04

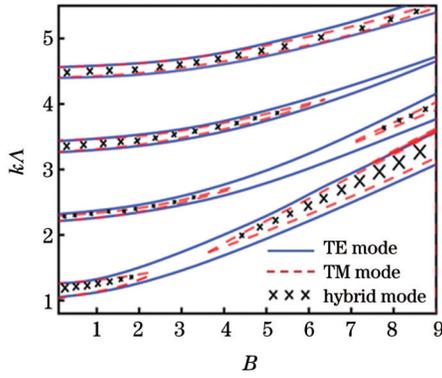


图2 $dn=0.8, d_1/d_2=1$ 时的光子带隙结构
Fig. 2 PBG structure when $d_1/d_2=1$ and $dn=0.8$

住。Bragg 光纤具有多个周期性的包层,理论上完全可以将光限制在纤芯中,将泄漏损耗降到最低,但在工艺上却很难做到。本文采用 COMSOL Multiphysics 软件建立光纤模型,并研究了纤芯半径 R 、包层周期数量 M 与泄漏损耗的变化规律。泄漏损耗与有效折射率的虚部相关,在仿真中先计算出光纤的有效折射率 (n_{eff})。有效折射率一般为复数形式,取出虚部的数值,损耗计算公式^[18]为

$$C = \frac{40\pi}{\ln(10\lambda)} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (1)$$

式中: C 为模式损耗; $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为有效折射率的虚部。

首先设定光纤结构参数为 $\Lambda=6.72 \mu\text{m}$ 、 $d_1/d_2=1$ 、

$M=3$ 。图 3(a) 给出了不同半径的全固态硫系布拉格光纤的损耗与 R 的关系,可以看出,光纤损耗随 R 的增大而减小, R 越小,光纤损耗变化就越明显。当 R 为 $80 \mu\text{m}$ 时,损耗低至 0.08 dB/m ,在 R 大于 $80 \mu\text{m}$ 之后损耗曲线变化趋于水平。图 3(a) 插图显示了 $R=50 \mu\text{m}$ 和 $R=100 \mu\text{m}$ 处的基模能量分布,可以看到:当 R 为 $50 \mu\text{m}$ 时,部分能量泄漏到包层中,此时损耗为 1.62 dB/m ;当 R 为 $100 \mu\text{m}$ 时,能量已经完全集中到纤芯中,损耗为 0.0054 dB/m 。较大的纤芯有利于降低光纤的泄漏损耗,但设计时需要考虑实验制备能力,因此选择 $R=90 \mu\text{m}$ 作为最佳纤芯半径。设定光纤参数为 $\Lambda=6.72 \mu\text{m}$ 、 $d_1/d_2=1$ 、 $R=90 \mu\text{m}$,分析不同 M 下布拉格光纤中的基模损耗,设计出符合实际制备要求的包层数量。由图 3(b) 可以看出,布拉格光纤损耗随包层数量的增加而降低,尤其是当光纤周期本身就比较小时。当 M 由 1 增加至 3 时,光纤损耗迅速降低,但随着 M 进一步增加,损耗降低的幅度会逐渐减小。当 M 超过 5 时,包层数量对光纤损耗的影响可以忽略。图 3(a) 插图显示了 M 为 1 和 3 时的基模能量分布。当 M 为 1 时,基模电场明显泄漏到包层中,此时光纤泄漏损耗为 1.01 dB/m ;当 M 为 3 时,光纤损耗已经低至 0.08 dB/m 。因此,在选择包层层数时,需要在实验制备难度和损耗降低效果之间进行权衡,不能过分追求包层数量增加,否则会增加光纤制备难度且损耗并不会明显降低。

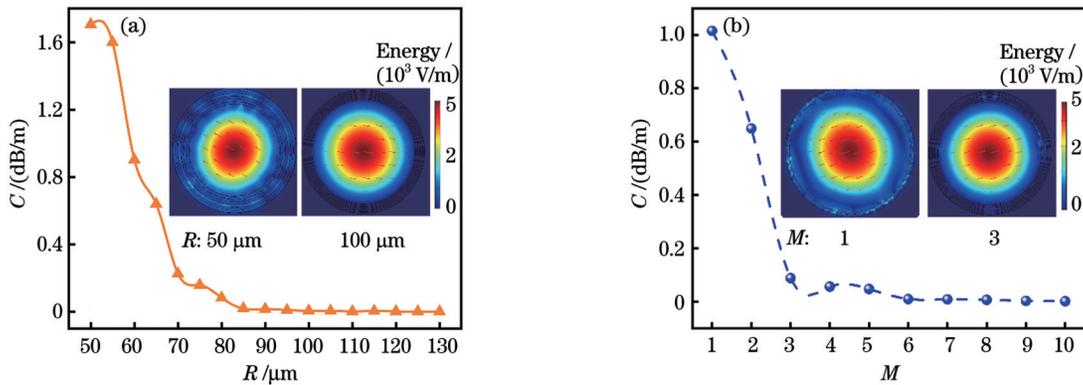


图3 光子带隙随结构参数 R 和 M 的变化。(a) C 随 R 的变化 ($d_1/d_2=1, \Lambda=6.72 \mu\text{m}, M=3$); (b) C 随 M 的变化 ($d_1/d_2=1, \Lambda=6.72 \mu\text{m}, R=90 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Variation of photonic bandgap with structural parameters R and M . (a) C versus R ($d_1/d_2=1, \Lambda=6.72 \mu\text{m}, M=3$); (b) C versus M ($d_1/d_2=1, \Lambda=6.72 \mu\text{m}, R=90 \mu\text{m}$)

2.3 布拉格光纤最优结构的光学性能

通过以上理论分析可知,光纤结构参数会显著影响硫系布拉格光纤的光子带隙及泄漏损耗特性。本文提出的全固态硫系布拉格光纤结构参数为: $\Lambda=6.72 \mu\text{m}$ 、 $d_1/d_2=1$ 、 $R=90 \mu\text{m}$ 、 $M=3$ 。该结构参数下的光纤光学性能如图 4 所示。在 $4\sim 12 \mu\text{m}$ 波长范围内,光纤存在多个带隙区域,且高阶带隙比低阶带隙宽,最宽带隙位于 $10\sim 11 \mu\text{m}$ 区间。理想尺寸下的光纤可实现多个波段的低损耗传输。

3 全固态硫系布拉格光纤制备

3.1 硫系玻璃制备及性能测试

采用静态蒸馏法和传统的熔融-淬火冷却技术制备了高纯的 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 和 As_2S_3 样品。首先选用纯度(质量分数)为 99.999% 的 Ge、As、S、Se、Te 为原料,将高纯度的原料放入石英管中,加热抽真空后放入摇摆炉中熔制 12 h 。经过风冷后熔体在接近转变温度下退火 12 h ,然后缓慢冷却至室温。淬火冷却后迅速

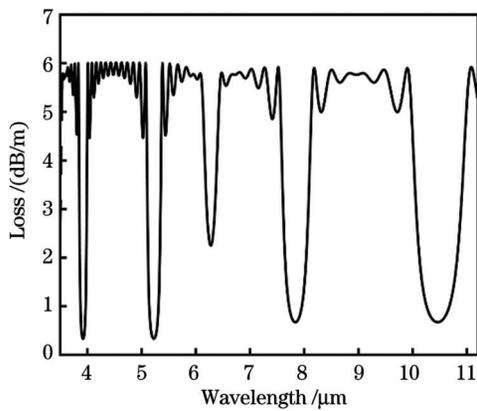


图 4 $\Lambda=6.72 \mu\text{m}$, $d_1/d_2=1$, $R=90 \mu\text{m}$, $M=3$ 时的布拉格光纤损耗

Fig. 4 Loss of Bragg fiber when $\Lambda=6.72 \mu\text{m}$, $d_1/d_2=1$, $R=90 \mu\text{m}$, and $M=3$

将石英管放入预先设定好温度(等于玻璃的 T_g 或者比 T_g 低 10°C)的退火炉中,退火炉温度冷却至室温取出玻璃,成功地获得了直径为 46 mm 的 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 和 As_2S_3 玻璃,样品如图 5(a) 所示。

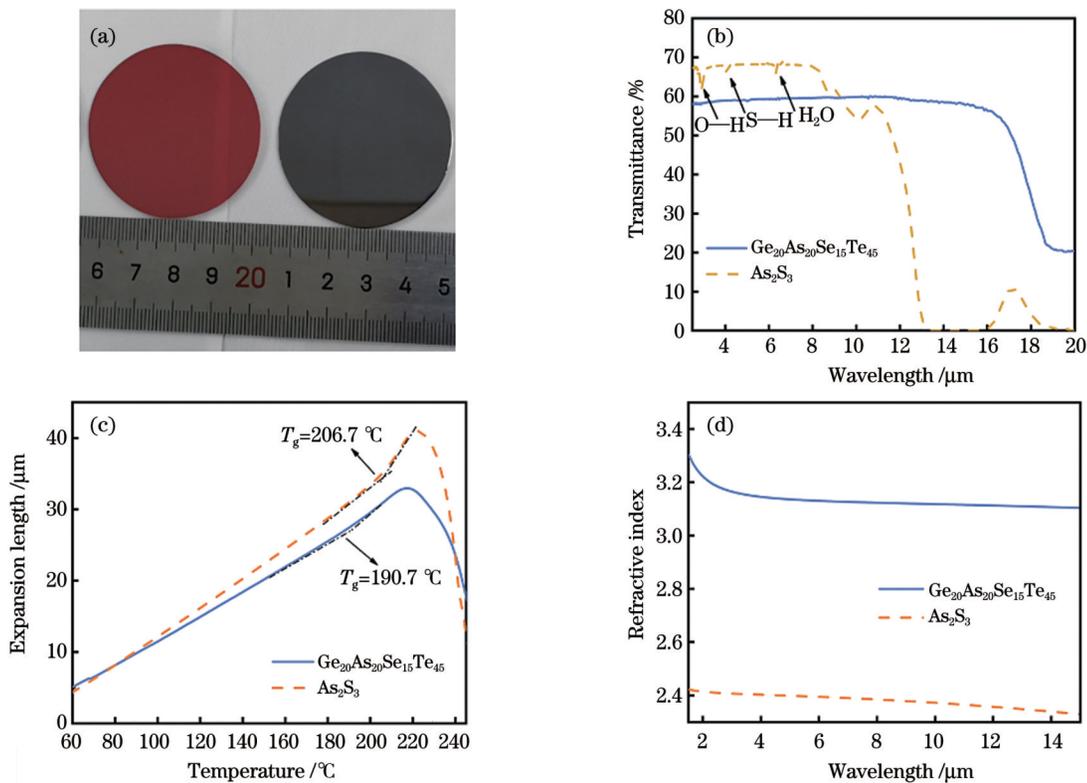


图 5 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 和 As_2S_3 玻璃的热学特性与光学特性。(a) 玻璃样品; (b) 透过率光谱; (c) 热膨胀曲线; (d) 折射率分布

Fig. 5 Thermal and optical properties of $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ and As_2S_3 glass. (a) Glass samples; (b) transmittance spectra; (c) thermal expansion curves; (d) refractive index distribution

3.2 硫系布拉格光纤制备

本文所制备的光纤的包层由三对交替排布的高低折射率材料组成。文献[20-21]已经证明,在叠层挤压过程中,具有不同热行为的两种玻璃会导致不稳定的流动行为。挤压模具中心附近的材料的流动速度快于模具壁附近的材料,每个包层环的厚度随着与中心的

将制备好的玻璃切割成厚度约为 2 mm 的玻璃薄片,双面抛光后测试玻璃的光学性能。采用傅里叶变换红外光谱仪测量玻璃的透射光谱,结果如图 5(b) 所示。可以看出,在波长为 $1\sim 11 \mu\text{m}$ 的范围内, $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 和 As_2S_3 玻璃的透过率均高于 55% ,在 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 玻璃中几乎没有杂质峰存在,在 As_2S_3 玻璃中只有一些小的吸收峰,如在 $2.86 \mu\text{m}$ 处的 O—H 吸收峰、 $4.01 \mu\text{m}$ 处的 S—H 吸收峰和 $6.29 \mu\text{m}$ 处的 H_2O 吸收峰。玻璃中的杂质吸收峰主要是由原料杂质、高温融入石英管中的氧造成的。因此在实验中要保证操作的严谨性,通过优化除氧和除羟的提纯工艺,提高玻璃的红外透过性能。图 5(c) 是采用热膨胀仪测量得到的玻璃 T_g 与热膨胀曲线, $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 玻璃的转变温度为 190.7°C , As_2S_3 玻璃的转变温度为 206.7°C ,二者仅相差 16°C ,具备使用挤压法制备光纤预制棒的条件^[19]。采用红外可变角光谱偏偏仪对玻璃进行了折射率测量,结果如图 5(d) 所示。可以看出, $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 和 As_2S_3 玻璃的折射率相差约 0.8 ,满足布拉格光纤形成宽光子带隙的条件。

距离的增加而减小。通过调整玻璃片的厚度来补偿这种不均匀性,进而实现含有厚度可控的环层的预制棒和光纤。因此本文对包层玻璃的厚度进行了设计,设定 As_2S_3 玻璃薄片的 2 mm 厚度与光纤的 $6 \mu\text{m}$ 包层厚度的比值为固定比例,并根据该比例补偿其他包层所需的玻璃薄片厚度。最薄的玻璃是最内层,最厚的玻

璃是外层。将厚度不同、直径为 46 mm 的 6 块 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 和 As_2S_3 玻璃作为周期性包层材料,高度为 15 mm、直径为 9 mm 的 As_2S_3 玻璃作为纤芯。通过叠层挤压的方式制备全固态布拉格光纤预制棒,所用玻璃如图 6(a)所示。将 6 片厚度补偿后的直径为 46 mm 的 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 和 As_2S_3 玻璃交替放置在模具中作为包层,首先将纤芯玻璃挤入到包层中,当纤芯玻璃和 6 片包层玻璃都位于同一水平位置时,包层玻璃和纤芯玻璃同时被挤出,形成含有三个周期包层



图 6 实验所用玻璃及制备的光纤预制棒。(a)玻璃;(b)预制棒
Fig. 6 Glass and prepared fiber preform used in experiment.
(a) Glasses; (b) preform

的全固态布拉格光纤预制棒,预制棒如图 6(b)所示。最后在自制的拉丝塔下,将温度加热到 $280\text{ }^\circ\text{C}$,为预制棒裹上聚醚砜(PES)聚合物膜,在氩气保护下拉伸成 6 m 长光纤。为了验证实验的有效性,进行了一组对照实验,制备了一组以厚度均为 2 mm 的 6 块 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 和 As_2S_3 玻璃作为周期性包层材料的布拉格光纤,下文将对两组光纤进行性能测试及分析。

3.3 硫系布拉格光纤的性能测试

3.3.1 光纤端面结构分析

布拉格光纤依赖周期性包层形成的光子带隙导光,对结构的周期性及完整性要求十分严格,因此有必要对整段光纤端面进行观察。为此分别截取了整段光纤的前端、中间段、尾端,并使用光学显微镜进行观察。用厚度为 2 mm 的玻璃制备的光纤端面如图 7(a)~(c)所示,由于高低折射率包层存在较大的折射率差,可以清晰地分辨出光纤的多包层结构。可以看出,光纤整体同心度较高,但纤芯和最内层的包层存在变形问题,且三个周期包层的厚度不均匀,最薄的包层厚度为 $10\text{ }\mu\text{m}$,最厚的包层厚度为 $60\text{ }\mu\text{m}$,与本文所设计的厚度一致。三个周期包层存在一定的差距。

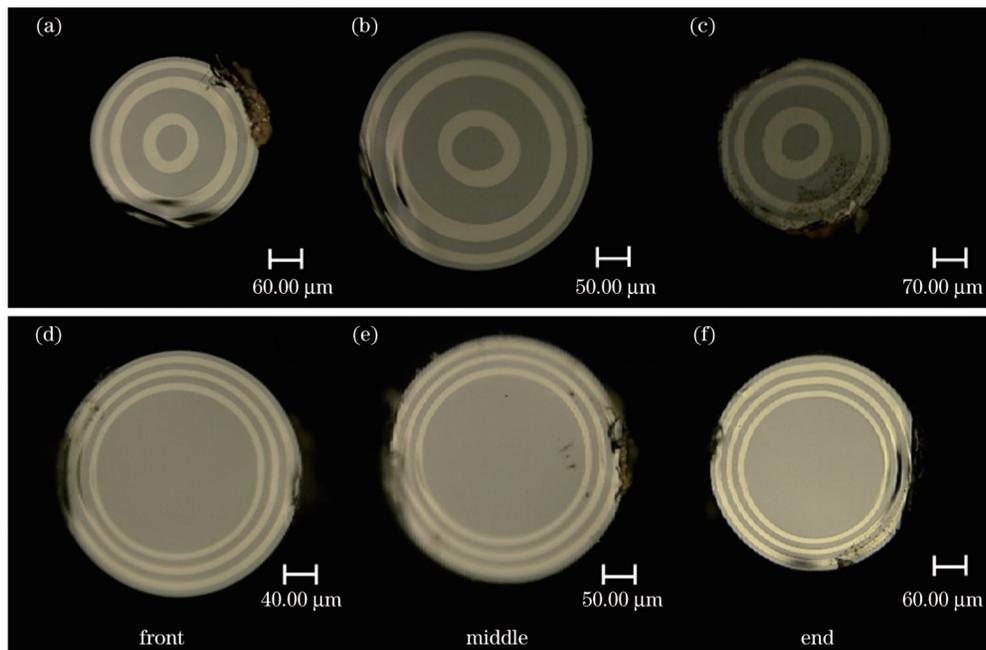


图 7 不同布拉格光纤的横截面。(a)~(c)基于等厚玻璃;(d)~(f)基于非等厚玻璃

Fig. 7 Cross sections of different Bragg fibers. (a)~(c) Based on equal thickness glass; (d)~(f) based on non-equal thickness glass

然后观察了基于厚度补偿的布拉格光纤的前端、中间段、尾端,如图 7(d)~(f)所示,可以看出,光纤横截面呈标准圆形,没有明显变形,纤芯与包层之间高度同心,相邻层交界处没有气泡、孔洞等明显缺陷,光纤横截面内部也无任何颗粒杂质。在整根 6 m 长的光纤中,多个位置处的光纤直径有变化,但三个周期包层的厚度参数均基本保持一致,厚度波动误差小于 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

每一包层厚度与光纤直径的比值如图 8 所示。从内到外对包层依次进行编号,第 i 层厚度用 T_i 表示 ($i=1, 2, 3, \dots$),光纤直径用 D 表示。由图 8(a)可知,等厚玻璃制备出的光纤包层结构非常不均匀,且与纤芯距离越远,厚度越薄。由图 8(b)可知,在用厚度补偿玻璃制备的整段光纤中,每一包层厚度与光纤直径的平均比例为 3:100。实验证明,采用厚度补偿的非均匀玻璃片解决包层厚度不均匀的问题是可行的。不同

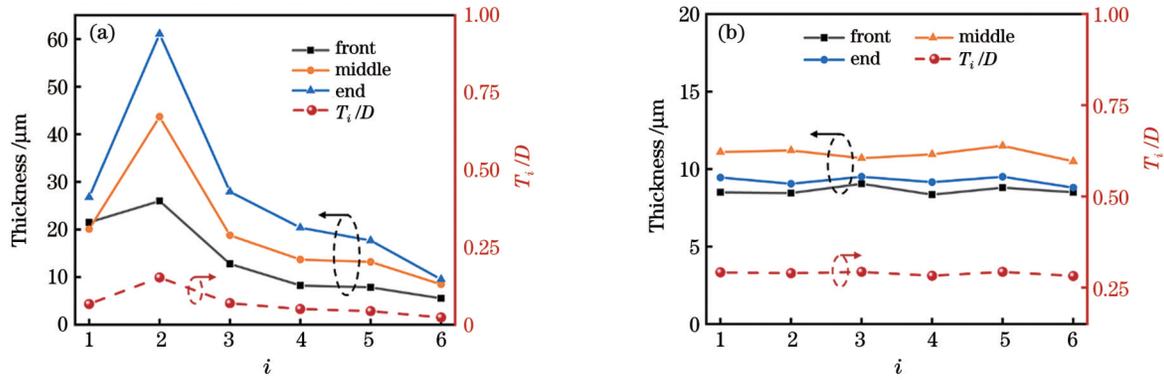


图8 不同布拉格光纤的层厚及 T_i/D 。(a)基于等厚玻璃;(b)基于非等厚玻璃

Fig. 8 Layer thicknesses and T_i/D values of different Bragg fibers. (a) Based on equal thickness glass; (b) based on non-equal thickness glass

的光纤直径将带来多包层厚度的变化,有利于光子带隙位置和传输性能的调控。

3.3.2 光纤损耗测试分析

基于截断法,利用傅里叶变换红外光谱仪测量 1 m 长的光纤的损耗。光纤损耗(L_0)计算公式为

$$L_0 = 10 \times \lg(P_0/P_1)/L, \quad (2)$$

式中: P_0 是输入功率; P_1 是输出功率; L 是光纤长度。

基于等厚玻璃制备的光纤的损耗及光斑如图 9(a)所示,光纤损耗曲线在 $4.57 \mu\text{m}$ 和 $5.02 \mu\text{m}$ 处存在明显的 Se—H 吸收峰和 As—H 吸收峰;光纤平均损耗为 $4 \text{ dB/m} \sim 6 \text{ dB/m}$,但光纤结构的不均匀性使得光纤并未形成光子带隙结构,这是因为纤芯太小,光不能被完全束缚,光纤模式全部在包层中传输。图 9(b)是基于厚度补偿玻璃制备的光纤的损耗,可以看出,光纤在 $4 \sim 10 \mu\text{m}$ 的范围内具有 4 个明显的低损耗窗口,

最低损耗为 20 dB/m 。通过近红外光纤场分析仪测试了 $1.55 \mu\text{m}$ 处的输出光斑图,图 9(b)插图显示了激光光源与光纤耦合后的光场强度,可以看到清晰的纤芯结构,并且亮度很高,光几乎没有泄漏到包层中。实验所得的光纤尺寸与设计有差异,根据实验所得的光纤结构参数仿真出的该结构下的光纤损耗如图 9(c)所示,并与实验测试所得的损耗进行了对比。图 9(c)显示,所制备的光纤在理论上具有多个低损耗窗口,最低损耗为 $1 \text{ dB/m} \sim 3 \text{ dB/m}$,但这些带隙窗口较窄,这与图 4 预测的结果有些偏差。由图 9(b)与图 9(c)对比可知,实际制备出的光纤损耗与理论仿真结果存在一定差异,这是挤压时多个包层交界面处的缺陷导致的极高的散射损耗引起的。未来将继续改进实验条件并优化挤压技术,降低布拉格光纤的光学损耗。

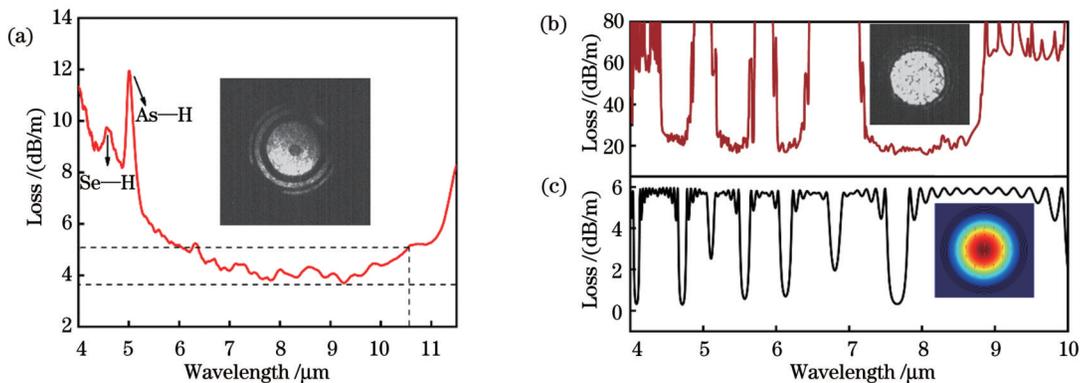


图9 包层玻璃优化前后的光纤损耗对比。(a)基于等厚玻璃的光纤损耗(插图为光斑图);(b)基于非等厚玻璃的光纤损耗(插图为光斑图);(c)基于实际制备的光纤的结构参数仿真得到的损耗(插图为电场分布图)

Fig. 9 Comparison of fiber loss before and after optimization of cladding glass. (a) Fiber loss based on equal thickness glass with light spot pattern shown in inset; (b) fiber loss based on non-equal thickness glass with light spot pattern shown in inset; (c) loss obtained by simulation based on structural parameters of actual prepared fiber with electric field distribution shown in inset

4 结 论

报道了一种基于新型叠层挤压技术制备的全固态硫系布拉格光纤,采用 $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ 和 As_2S_3 玻璃作为基质材料,通过对玻璃的厚度进行补偿,成功制备出

具有三个周期包层的全固态布拉格光纤,通过对比光纤前端、中间段和尾端,验证了所制备的硫系布拉格光纤优越的结构均匀性,在整段光纤中每一包层厚度与光纤直径的平均比例为 3:100。通过观察其光斑,证明了光纤具备较好的传光能力,验证了采用挤压法制

备硫系布拉格光纤的可行性。未来将进一步改进模具设计并优化挤压条件,最终开发出性能较好的硫系光子带隙型光纤。

参 考 文 献

- [1] Fink Y, Winn J N, Fan S, et al. A dielectric omnidirectional reflector[J]. *Science*, 1998, 282(5394): 1679-1682.
- [2] Viale P, Février S, Leproux P, et al. Modal properties of solid-core photonic bandgap fibers[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2006, 4(2): 116-122.
- [3] Chen W, Li S Y, Lu P X. Dispersion-flattened Bragg photonic crystal fiber for large capacity optical communication system[J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2009, 2(3): 289-292.
- [4] 梁伟军, 王智, 任国斌, 等. 布拉格光纤色散特性的研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(11): 1343-1346.
Liang W J, Wang Z, Ren G B, et al. Study on dispersion properties of Bragg fibers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(11): 1343-1346.
- [5] 金杰, 张巍, 石立超, 等. 用于 CO₂ 激光传输的 10.6 μm 波段空心布拉格光纤[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0805001.
Jin J, Zhang W, Shi L C, et al. Hollow-core Bragg fiber with a transmission band of 10.6 μm for carbon dioxide laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(8): 0805001.
- [6] Shang L, Feng S J, Liu G Q. Hole-assisted solid core Bragg fibers with a high-index-contrast cladding for broadband single-polarization operation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(21): 6104-6113.
- [7] 石立超, 张巍, 邢文鑫, 等. 外径波动下空心布拉格光纤的模式传输特性[J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2559-2564.
Shi L C, Zhang W, Xing W X, et al. Mode transmission characteristics in hollow-core Bragg fibers with slowly variation in outer diameter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(10): 2559-2564.
- [8] 张亚奇, 刘硕, 白振旭. 2 μm 波段 7-cell 空芯光子带隙光纤的特性研究[J]. *光电技术应用*, 2021, 36(1): 34-38, 63.
Zhang Y Q, Liu S, Bai Z X. Study on characteristics of 2 μm band 7-cell hollow photonic band gap fiber[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2021, 36(1): 34-38, 63.
- [9] Zheng J J, Lei W J, Qin Y, et al. Highly nonlinear dispersion-flattened high-index-core Bragg fibres for supercontinuum generation[J]. *Journal of Modern Optics*, 2019, 66(20): 2008-2014.
- [10] Zhu M M, Wang X S, Pan Z H, et al. Fabrication of an IR hollow-core Bragg fiber based on chalcogenide glass extrusion[J]. *Applied Physics A*, 2015, 119(2): 455-460.
- [11] Rowland K J, Afshar S, Stolyarov A, et al. Bragg waveguides with low-index liquid cores[J]. *Optics Express*, 2011, 20(1): 48-62.
- [12] Katagiri T, Matsuura Y, Miyagi M. Photonic bandgap fiber with a silica core and multilayer dielectric cladding[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(6): 557-559.
- [13] Feng X A, Monro T M, Petropoulos P, et al. Extruded single-mode high-index-core one-dimensional microstructured optical fiber with high index-contrast for highly nonlinear optical devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(8): 081110.
- [14] Dupuis A, Guo N, Gauvreau B, et al. Guiding in the visible with "colorful" solid-core Bragg fibers[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(19): 2882-2884.
- [15] Hart S D, Maskaly G R, Temelkuran B, et al. External reflection from omnidirectional dielectric mirror fibers[J]. *Science*, 2002, 296(5567): 510-513.
- [16] Fink Y, Ripin D J, Fan S, et al. Guiding optical light in air using an all-dielectric structure[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(11): 2039-2041.
- [17] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [18] 游永, 郭慧毅, 李伟, 等. 空芯光子带隙光纤中的表面模共振耦合效应及高温传感特性[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 1306005.
You Y, Guo H Y, Li W, et al. Surface-mode resonance coupling effect and high-temperature sensing characteristics in hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306005.
- [19] 吴国林, 冯赞, 汪俊, 等. 基于挤压技术的新型七芯超大数值孔径硫系玻璃光纤制备及其光学性能研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1006003.
Wu G L, Feng Z, Wang J, et al. Fabrication and optical properties of a novel seven-core high-NA chalcogenide glass fiber based on extrusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1006003.
- [20] Roeder E. Flow behaviour of glass during extrusion[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1972, 7(2): 203-220.
- [21] Gibson D J, Harrington J A. Extrusion of hollow waveguide preforms with a one-dimensional photonic bandgap structure[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(8): 3895-3900.

All Solid-State Chalcogenide Bragg Fiber Based on Compensated-Stacking Extrusion

Yang Keyu^{1,2}, Sun Weilu^{1,2}, Sheng Junkai^{1,2}, Peng Qianqian^{1,2}, Bai Shengchuang^{1,2},
Dai Shixun^{1,2}, Wang Xunsi^{1,2,3*}

¹Laboratory of Infrared Materials and Devices, Research Institute of Advanced Technology, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

²Key Laboratory of Photoelectric Detection Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

³Ningbo Institute of Oceanography, Ningbo 315832, Zhejiang, China

Abstract

Objective Bragg fibers have multiple unique optical properties such as photonic bandgap light guides, single-mode transmission over a wide frequency range, dispersion management, and low transmission loss, which make them attractive for broad applications. The transmission ability of a traditional hollow Bragg fiber is restricted by air-core collapse and structured-cladding deformation during optical fiber preparation. Even under tiny fiber cladding deformations, the bandgap can be violently degraded. All solid-state structures have been proven to solve the core collapse and cladding deformation problems of hollow Bragg fibers. Therefore, an urgent requirement exists to develop novel fiber structures and effective fiber fabrication methods to improve fiber transmission capability. In this study, an all-solid Bragg fiber with a chalcogenide glass core is fabricated via a compensated-stacking extrusion technique to

address the challenge of hollow-core deformation in traditional Bragg fibers. The fiber consists of three pairs of uniform periodic cladding and low-loss windows in the range of 4–10 μm . This experimental data can assist further study regarding mid-infrared bandgap-controlled fibers and unlock new directions for the development of high-quality laser transmissions or optical sensors in the mid-infrared region.

Methods In this study, we first establish a theoretical model for all-solid-state Bragg fibers. Mid-infrared chalcogenide glasses $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ and As_2S_3 are chosen as high- and low-refractive-index cladding materials. The large difference in the refractive index between the alternating-layer materials helps to form the widest photonic bandgap. Two groups of fibers based on equal- or compensated-thickness glass are prepared for comparison. The cross sections, transmission loss values, and near-field energy distributions of these optical fiber types are calculated and analyzed.

Results and Discussions According to the simulation results, the optimal structural parameters of all solid-state chalcogenide Bragg fibers are obtained. The experimental results show that optimized stacking extrusion based on compensated-thickness glass is the simplest and most effective method for improving fiber structural uniformity. The cross-sections of the all-solid Bragg fiber based on equal-thickness glass [Figs. 7(a)–(c)] show that the core and innermost cladding are irregularly elliptical, with a large difference in the thickness of the three pairs of periodic claddings. The thickness of the layers ranges from 10 μm to 600 μm , which significantly differs the simulation results [Fig. 8(a)]. The fiber cross-sections based on thickness-compensated glass [Figs. 7(d)–(f)] show that the fiber structure is highly circular, without deformation, and no obvious defects such as bubbles or holes are observed at the interfaces of adjacent layers. Three pairs of periodic claddings have similar thicknesses in a 6-meter-long fiber, and the average ratio of each layer thickness to the fiber diameter is approximately 3 : 100 for an entire fiber length with 6 m length [Fig. 8(b)]. It is proven experimentally that it is feasible to solve the problem of uneven claddings and deformational cores using thickness-compensated glass. The average loss of fibers based on equal-thickness glass is 4 dB/m–6 dB/m, however, the uneven fiber structure results in light propagation in the cladding [Fig. 9(a)]. The fiber based on thickness compensated glass has four low loss windows [Fig. 9(b)]. For good light transmission effect, the light is confined in the core and almost no energy leaks into the cladding.

Conclusions Bragg fibers based on the principle of effective omnidirectional reflection achieve high-power transmission at specific wavelengths by tuning the structural parameters of the claddings; however, some problems remain. In this study, an all-solid-state Bragg fiber with a chalcogenide glass core is fabricated using a compensated stacking extrusion technique to solve the problem of hollow core deformation in traditional Bragg fibers. $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}$ and As_2S_3 glasses are doped as high- and low-refractive-index cladding materials, respectively, and an all-solid-state chalcogenide glass Bragg fiber with three pairs of periodic cladding layers is successfully fabricated via compensated stacking extrusion. The superior structural uniformity of the prepared chalcogenide Bragg fibers is verified by comparing the cross-sections of the front, middle, and end of the Bragg fibers. Three pairs of periodic claddings have similar thicknesses in a 6-meter-long fiber, and the average ratio of each layer thickness to the fiber diameter is approximately 3 : 100 for an entire fiber with length of 6 m. The light spot pattern proves that the optical fiber has good light transmission ability. It is proven experimentally that it is feasible to prepare chalcogenide Bragg fibers using the extrusion method. In future, our research will further improve the extrusion mold and conditions aiming to develop higher performance photonic crystal fibers based on chalcogenide glass.

Key words fiber optics; all solid-state; Bragg fiber; chalcogenide glass; stacking extrusion method