

引用格式: DU Yifan, ZHAO Ziwen, ZHONG Shuangqi, et al. Study on Scanning Velocity of Germanium Core Fibers with Different Outer Diameters Annealed by CO<sub>2</sub> Laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(4):0406001

杜亦凡, 赵子文, 钟双栖, 等. CO<sub>2</sub>激光退火不同外径锗芯光纤的扫描速度研究[J]. 光子学报, 2024, 53(4):0406001

# CO<sub>2</sub>激光退火不同外径锗芯光纤的扫描速度研究

杜亦凡<sup>1,2,3</sup>, 赵子文<sup>1,2,3</sup>, 钟双栖<sup>1,2,3</sup>, 马泽成<sup>1,2,3</sup>, 王少业<sup>1,2,3</sup>

(1 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200444)

(2 上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444)

(3 上海大学 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444)

**摘要:** 对内径为 41~43 μm, 外径约为 188 μm、251 μm 和 270 μm 的锗芯光纤进行激光退火实验, 研究 CO<sub>2</sub>激光沿光纤轴向扫描速度对锗芯拉曼峰频率和光传输损耗特性的影响。研究发现, 激光扫描速度是决定退火后光纤特性的重要参数。对不同外径的光纤, 达到最优退火效果的激光扫描速度不同, 188 μm、251 μm 和 270 μm 外径的锗芯光纤分别为 10 mm·s<sup>-1</sup>、14 mm·s<sup>-1</sup> 和 16 mm·s<sup>-1</sup>, 光传输损耗分别为 3.435 dB·cm<sup>-1</sup>、2.147 dB·cm<sup>-1</sup> 和 3.578 dB·cm<sup>-1</sup>。使用 COMSOL 软件对退火过程中纤芯表面固定点的温度变化进行了模拟仿真研究, 仿真结果显示激光退火过程中温度呈脉冲形变化。相同外径条件下, 激光扫描速度提高, 温度脉冲的峰值升高、谷值降低、单脉冲持续时间缩短; 相同扫描速度条件下, 光纤外径减小, 温度脉冲峰值提高, 谷值降低。

**关键词:** 锗芯光纤; CO<sub>2</sub>激光退火; 激光扫描速度; COMSOL 仿真; 温度变化模拟

中图分类号: TQ342+.82

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245304.0406001

## 0 引言

随着光通信技术的不断发展, 光谱资源分配日益紧张。锗材料在中红外波段具有良好的透光性<sup>[1-2]</sup>, 高质量的锗芯光纤可以拓宽光纤的通信窗口, 在中红外波段传感<sup>[3]</sup>和通信领域<sup>[4]</sup>有着巨大的应用潜力。此外, 锗较强的三阶非线性系数<sup>[5]</sup>和优良的光电特性<sup>[6]</sup>也使锗芯光纤在非线性光学器件<sup>[7]</sup>、织物成像、热电光纤、温度监测以及轻质可穿戴能量收集设备等领域展现出广泛的应用前景<sup>[8-11]</sup>。

目前锗芯光纤主要通过高压化学气相沉积法 (High Pressure Chemical Vapor Deposition, HPCVD) 和熔融拉丝法 (Molten Core Drawing, MCD)<sup>[12]</sup> 进行制备。未经后期处理的锗芯光纤中锗芯大多呈现多晶结构, 内部存在较高的缺陷密度和较大的残余应力<sup>[13]</sup>, 光传输损耗很高。因此, 改善纤芯内部的晶体质量、释放残余应力, 从而降低光传输损耗, 是未来锗芯光纤进入实际应用领域的关键。

激光退火是提升锗芯光纤性能的有效方法<sup>[14]</sup>, 具有加热参数和退火区域控制精确、操作简单的优点。2016年, 宾夕法尼亚大学的 JI X Y 等<sup>[15]</sup> 采用波长为 488 nm 的连续波氩离子激光器对锗芯光纤进行熔融再结晶处理, 通过 X 射线衍射 (X-ray Diffraction, XRD) 验证了激光退火后纤芯内存在长度为 9 mm、直径为 5.6 μm 的单晶锗区域, 该样品在 2 μm 波长的光传输损耗为 1.33 dB·cm<sup>-1</sup>。2016年, 挪威科技大学的 COUCHERON D A 等<sup>[16]</sup> 使用 CO<sub>2</sub> 激光器加热玻璃包层硅锗芯光纤。经过热处理后在 2 μm 波长处光传输损耗从大于 20 dB·cm<sup>-1</sup> 降低至 9.7 dB·cm<sup>-1</sup>。2020年, 英国纽卡斯尔大学的 CHEN H 等<sup>[17]</sup> 使用压力辅助熔融填充技术在毛细管中沉积多晶锗制备锗芯光纤, 通过 CO<sub>2</sub> 激光热处理使锗芯熔融再结晶, 处理后光纤样品的拉曼光谱与单晶锗的拉曼光谱有高度相似性。

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61975114)

第一作者: 杜亦凡, dyduyifan@163.com

通讯作者: 赵子文, zhzw@shu.edu.cn

收稿日期: 2023-08-29; 录用日期: 2023-10-30

<http://www.photon.ac.cn>

CO<sub>2</sub>激光退火过程中,光纤沿着轴向的扫描速度是影响退火后光纤性能的重要因素,因此对其进行研究对明确激光退火对锗芯的改性机理,进一步提升退火后光纤性能具有重要意义。本文对三组内径(Inner Diameter, ID)相同,外径(Outer Diameter, OD)不同的锗芯光纤进行不同扫描速度条件下的激光退火实验,分析激光扫描速度对激光退火效果的影响。通过COMSOL物理仿真软件对CO<sub>2</sub>激光退火过程中锗芯光纤纤芯表面固定点的温度数值进行了仿真,模拟在不同外径、不同激光扫描速度条件下锗芯纤芯表面温度随时间变化的过程。

## 1 对不同外径值的锗芯光纤的激光退火研究

### 1.1 CO<sub>2</sub>激光退火装置

选用上海三克激光公司SK-3D30型CO<sub>2</sub>激光器对锗芯光纤进行退火,退火装置如图1所示。图1(a)为CO<sub>2</sub>激光器装置,激光光斑直径为1 mm,输出功率为0~30 W,激光波长为10.6 μm。实验中将激光功率设置为激光最大功率的20%(6 W),激光频率为50 kHz,扫描时间为20 s。激光沿着光纤轴向的扫描区域为1 mm×50 mm,退火时间内激光在该区域中沿光纤轴向往复扫描。图1(b)为激光光束示意图,激光光束的能量服从高斯分布。

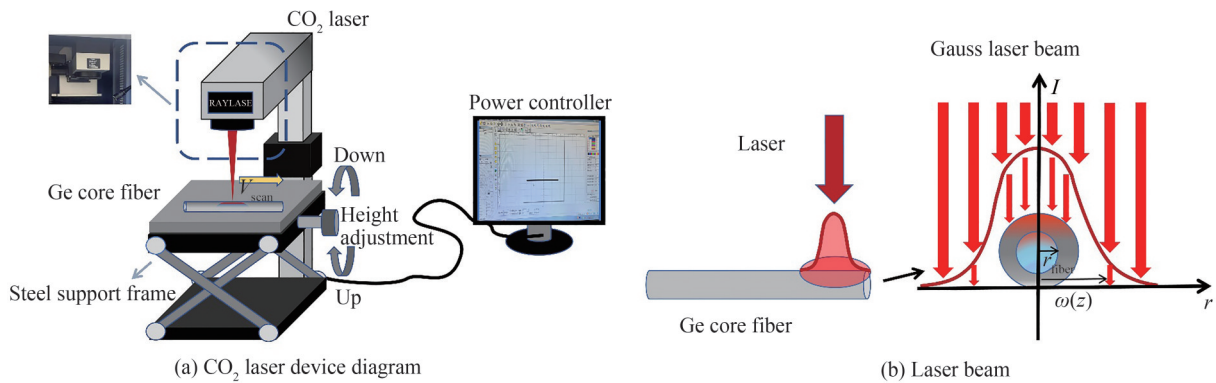


图1 退火装置  
Fig. 1 Annealing device

采用法国Horiba Jobin Yvon公司生产的LabRam HR Evolution型显微共焦拉曼光谱仪对样品端面进行拉曼mapping测试分析,拉曼装置示意图如图2所示。其中光谱分辨率为0.35 cm<sup>-1</sup>,测试中激发光波长为633 nm,光栅为1 800 line/mm,采用50倍物镜,以300 cm<sup>-1</sup>为窗口进行测试。拉曼mapping测试点间距为

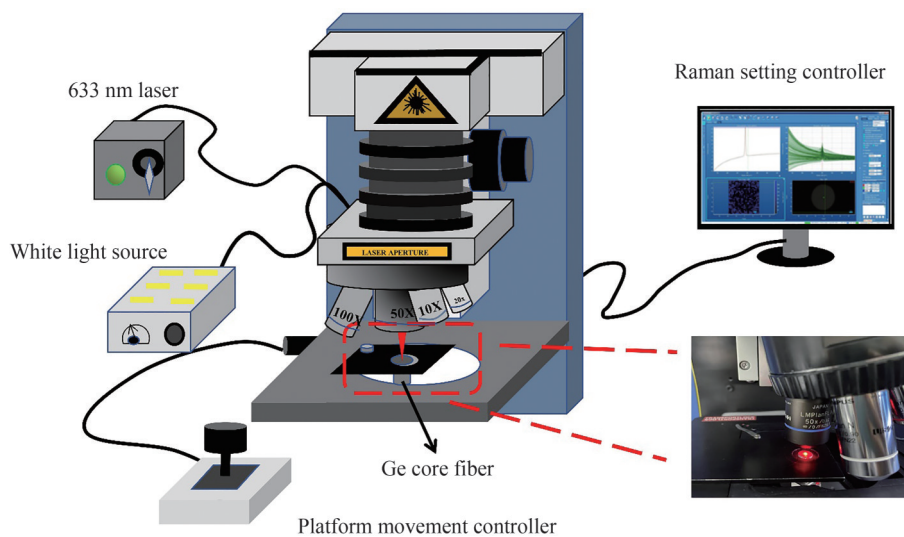


图2 拉曼实验装置示意图  
Fig. 2 The schematic diagram of Raman apparatus

1.0 μm,采样区域为40×40点的正方形区域。使用高斯-洛伦兹函数对采集的数据进行拟合,得到的数据通过MATLAB软件绘制拉曼峰值频率 mapping 图。

通过截断法测量锗芯光纤的光传输损耗,每次将样品截断5 mm后测量,每根光纤重复3次。光传输损耗测试系统主要由激光器、光探测器以及光功率计等部件组成。激光器为Thorlab公司QF4800CM1型法布里-珀罗量子级联激光器,波长范围为4.7~4.9 μm;光探测器为Thorlab公司S401探测器;光功率计为Thorlab公司PM100D数字手持光功率计。所有测量均在室温下进行。

### 1.2 对不同外径的锗芯光纤进行激光退火处理

选取内径为41~43 μm,外径分别约为188 μm、251 μm和270 μm,长度约为4 cm的锗芯光纤,进行CO<sub>2</sub>激光退火处理。未退火光纤样品端面显微镜照片如图3所示(所选用实验样品光纤均为裸纤,并未进行涂敷处理)。

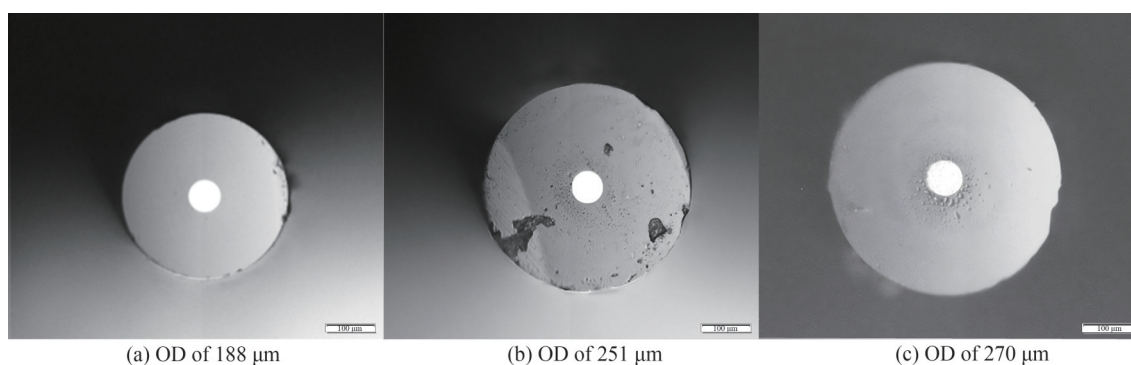


图3 未退火不同外径锗芯光纤端面的显微镜照片

Fig. 3 Microscope image of the cross-section of as-drawn Ge core optical fibers with different ODs

未退火锗芯光纤样品端面的中心区域拉曼光谱测试结果如图4(a)~(c)所示。图中,三种外径的锗芯光纤拉曼光谱相似,都在300.3 cm<sup>-1</sup>附近出现了较强的拉曼衍射峰,峰位分别为300.321 cm<sup>-1</sup>、300.337 cm<sup>-1</sup>和300.337 cm<sup>-1</sup>。单晶锗的拉曼峰值在301.202 cm<sup>-1</sup>,如图4(d)所示,光纤样品拉曼峰位相对于单晶锗的偏移,

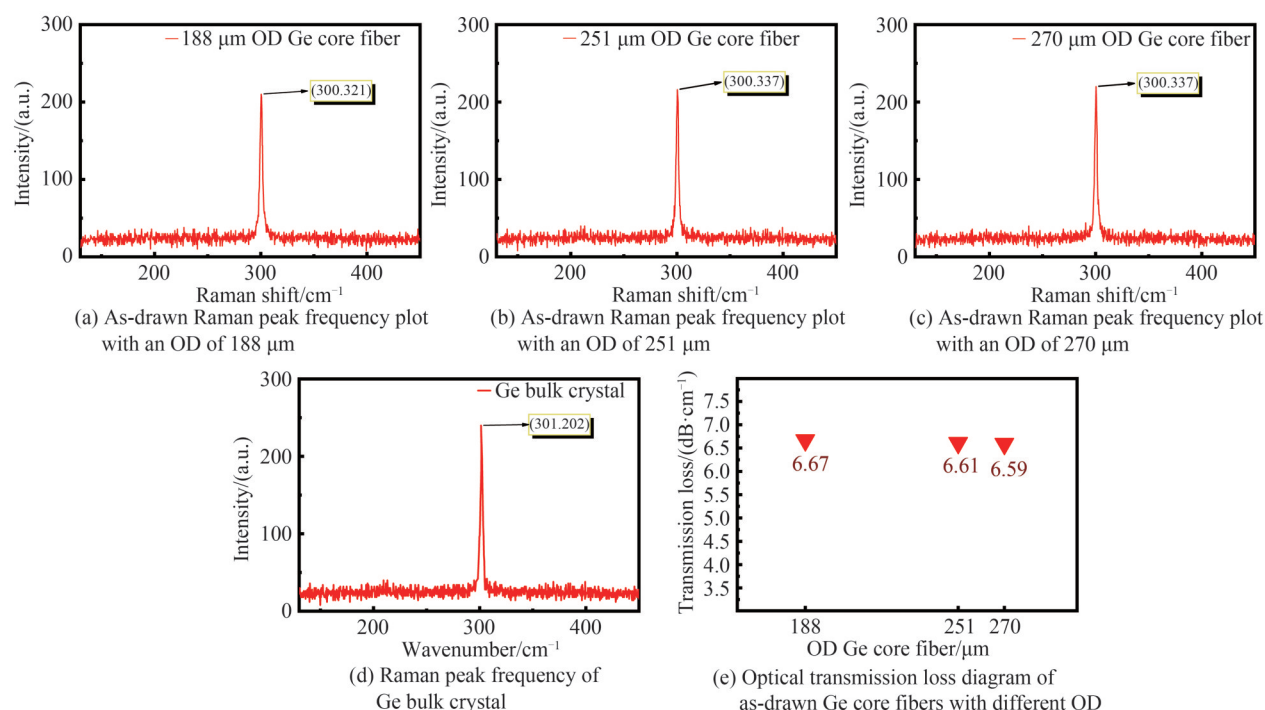


图4 未退火光纤和锗单晶

Fig. 4 As-drawn fibers and Ge bulk crystal

体现了锗芯内部的残余应力和缺陷密度等状态<sup>[18]</sup>。同时对未退火的三种外径锗芯光纤进行光传输损耗测试,结果如图4(e)所示,光传输损耗分别为 $6.67 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $6.61 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $6.59 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。三种外径的未退火锗芯光纤均存在较大的光传输损耗。

首先选取外径约为 $188 \mu\text{m}$ 的锗芯光纤进行激光退火处理,激光扫描速度分别设置为 $8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $14 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。其退火后样品的拉曼峰频率 mapping 图和拉曼峰频率统计结果如图5和表1中 $188 \mu\text{m}$ 项的数据所示。

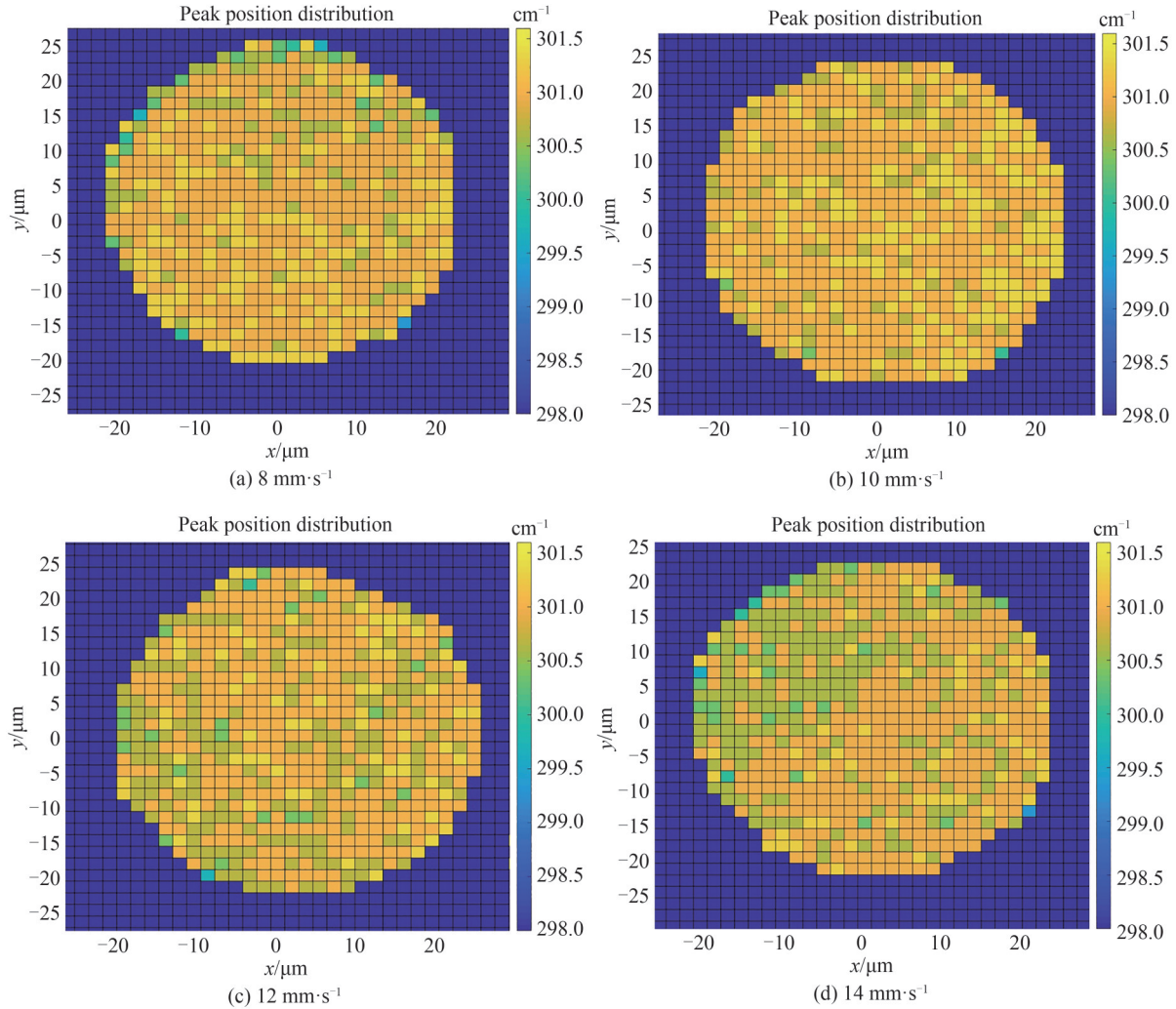


图5 外径为 $188 \mu\text{m}$ 光纤的拉曼峰频率 mapping 图  
Fig. 5 Raman peak frequency mapping with an OD of  $188 \mu\text{m}$  fiber

表1 不同外径光纤的拉曼峰频率

Table 1 Raman peak frequency of fibers with different ODs

Annealing velocity/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	188 $\mu\text{m}$		251 $\mu\text{m}$		270 $\mu\text{m}$	
	$S_{\text{mean}}/\text{cm}^{-1}$	$S_{\text{range}}/\text{cm}^{-1}$	$S_{\text{mean}}/\text{cm}^{-1}$	$S_{\text{range}}/\text{cm}^{-1}$	$S_{\text{mean}}/\text{cm}^{-1}$	$S_{\text{range}}/\text{cm}^{-1}$
8	300.964	298.022~301.817				
10	301.087	299.629~301.817	300.587	298.992~301.516		
12	300.865	299.820~301.619	300.971	299.104~301.612	300.876	298.355~301.617
14	300.854	299.333~301.639	301.193	299.981~301.981	300.986	299.874~301.612
16			301.106	299.873~301.970	301.011	299.981~301.981
18					300.885	298.029~301.617
20			300.621	299.203~301.976		

图5中,经激光退火后的锗芯光纤端面的拉曼峰频率分布随着激光扫描速度的改变出现了变化。拉曼峰频率总体分布和拉曼频率均值随着激光扫描速度升高,呈现先向高波数移动,再向低波数移动的趋势。 $8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $12\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $14\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速度条件下样品的拉曼峰频率的平均值分别为 $300.964\text{ cm}^{-1}$ 、 $301.087\text{ cm}^{-1}$ 、 $300.865\text{ cm}^{-1}$ 、 $300.854\text{ cm}^{-1}$ 。本组样品中,激光扫描速度为 $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光纤端面拉曼峰频率分布和平均值最接近锗单晶,拉曼峰频率均值为 $301.087\text{ cm}^{-1}$ ,该样品端面的拉曼频率分布的均匀性也较好。

选取外径约为 $251\text{ }\mu\text{m}$ 的锗芯光纤进行激光退火处理,激光扫描速度分别设置为 $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $12\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $14\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $16\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。激光退火后样品的拉曼峰频率mapping图和拉曼峰频率统计如图6和表1中 $251\text{ }\mu\text{m}$ 项的数据所示。

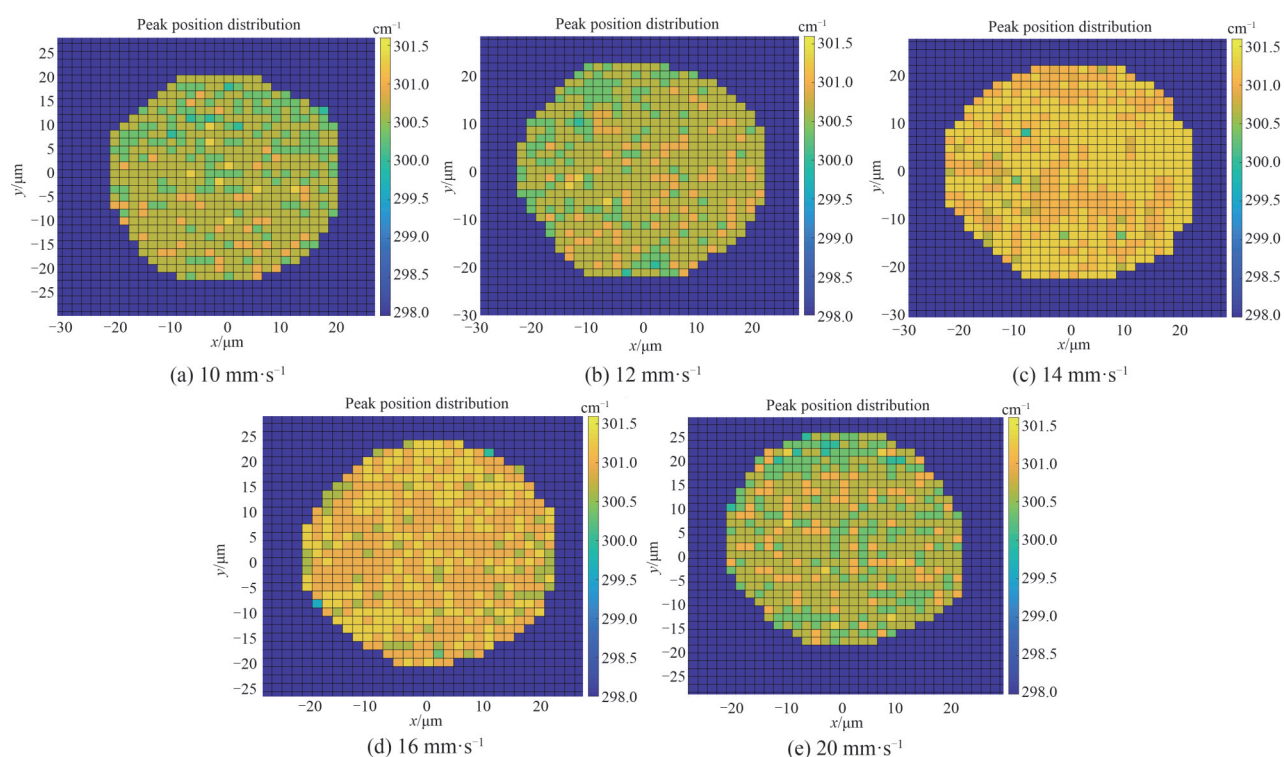


图6 外径为 $251\text{ }\mu\text{m}$ 光纤的拉曼峰频率mapping图

Fig. 6 Raman peak frequency mapping with an OD of  $251\text{ }\mu\text{m}$  fiber

外径约为 $251\text{ }\mu\text{m}$ 的锗芯光纤端面拉曼峰频率mapping测试结果随着激光扫描速度的变化表现出与 $188\text{ }\mu\text{m}$ 外径锗芯光纤相似的趋势,都是先随着激光扫描速度的升高,拉曼频率分布和平均值先向高波数移动,达到一个最优值后,再向低波数移动。激光扫描速度为 $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $12\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $14\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $16\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下,拉曼峰频率的平均值分别为 $300.587\text{ cm}^{-1}$ 、 $300.971\text{ cm}^{-1}$ 、 $301.193\text{ cm}^{-1}$ 、 $301.106\text{ cm}^{-1}$ 和 $300.621\text{ cm}^{-1}$ 。光纤端面拉曼峰频率mapping测试发现,不同外径锗芯光纤退火后最接近单晶锗拉曼频率样品的激光扫描速度不同。 $188\text{ }\mu\text{m}$ 样品的激光扫描速度为 $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , $251\text{ }\mu\text{m}$ 样品的为 $14\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在保持激光功率和出光频率不变的条件下,大外径的锗芯光纤样品需要更快的激光扫描速度才能达到最好的退火效果。

为了进一步验证以上结论,本组实验对 $270\text{ }\mu\text{m}$ 外径的锗芯光纤样品进行激光退火研究。激光扫描速度分别设置为 $12\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $14\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $16\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $18\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。激光退火后的拉曼峰频率mapping图和拉曼频率统计如图7和表1中 $270\text{ }\mu\text{m}$ 项的数据所示。

激光扫描速度为 $12\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $14\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $16\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $18\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的样品端面拉曼峰频率平均值分别为 $300.876\text{ cm}^{-1}$ 、 $300.986\text{ cm}^{-1}$ 、 $301.011\text{ cm}^{-1}$ 、 $300.885\text{ cm}^{-1}$ 。外径为 $270\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤样品的最优激光扫描速度为 $16\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,相对于外径数值为 $251\text{ }\mu\text{m}$ 的锗芯光纤最优扫描速度进一步提升。

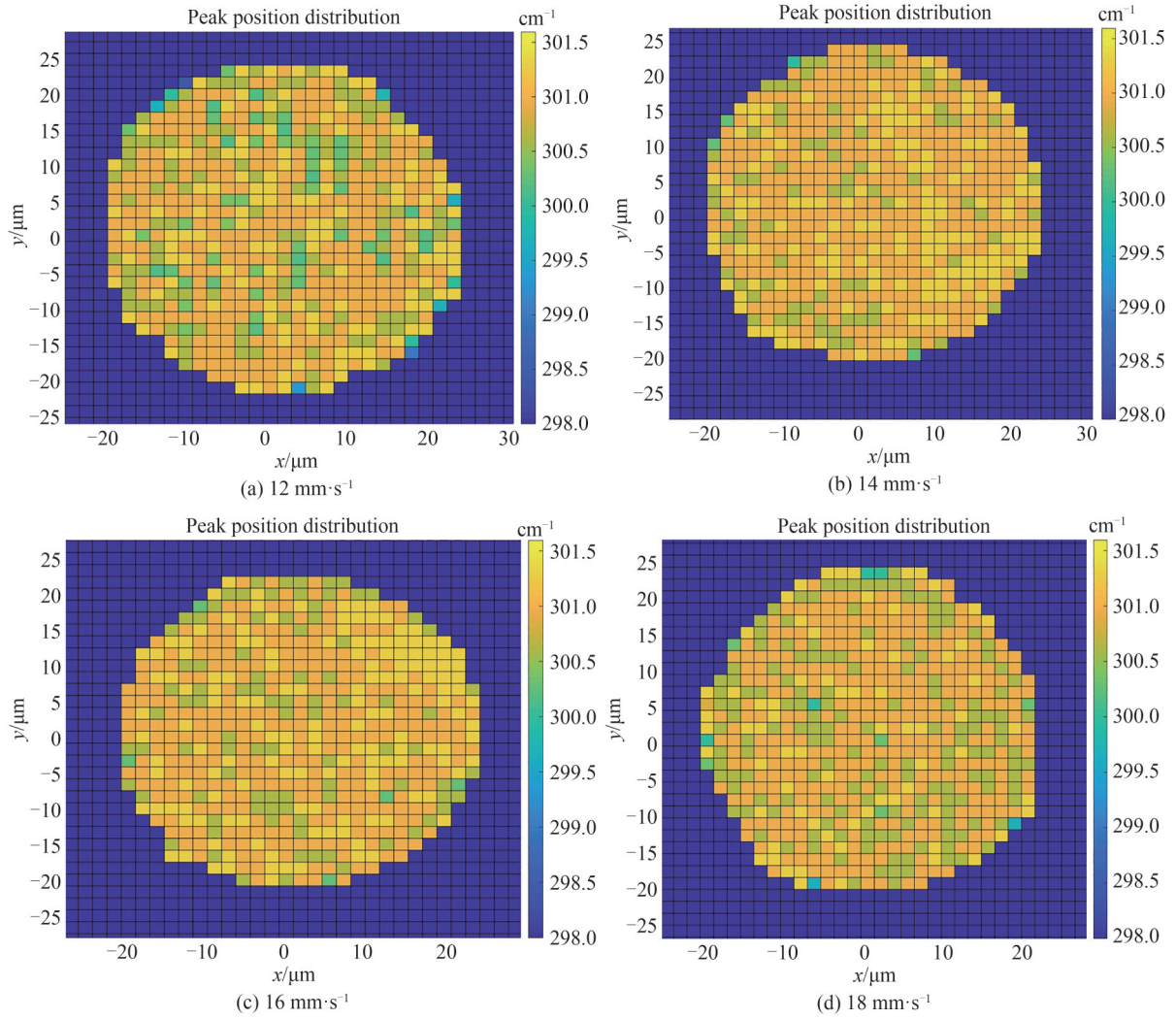


图7 外径为 270  $\mu\text{m}$  光纤的拉曼峰频率 mapping 图  
Fig. 7 Raman peak frequency mapping with an OD of 270  $\mu\text{m}$  fiber

图 8(a)是所有外径样品的光传输损耗测试结果,为了对比分析,将所有样品的拉曼峰频率平均值绘制于图 8(b)。188  $\mu\text{m}$ 、251  $\mu\text{m}$  和 270  $\mu\text{m}$  三组外径样品各自的最低光传输损耗为 3.435  $\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、2.147  $\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$

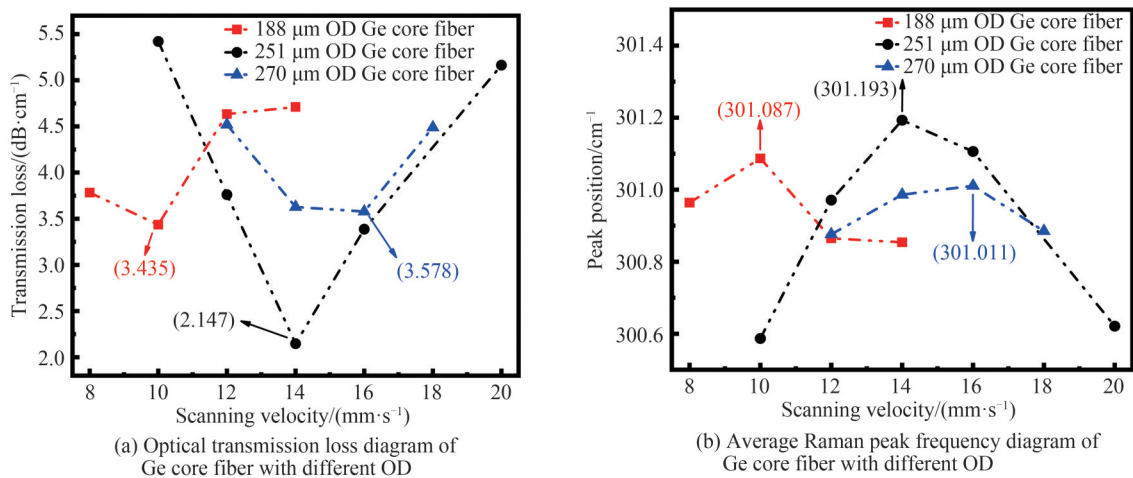


图 8 不同外径的光纤  
Fig. 8 Fibers with different ODs

和  $3.578 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 对应的激光扫描速度分别为  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $14 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。锗芯光纤外径值越大, 达到最优退火效果的激光扫描速度值越快, 研究还发现, 不同外径的锗芯光纤样品激光退火后最低传输损耗不同,  $251 \mu\text{m}$  外径样品的最低光传输损耗值明显低于  $188 \mu\text{m}$  和  $270 \mu\text{m}$  外径样品的最低光传输损耗, 说明光纤的外径也会对激光退火的效果造成影响。两幅图对比发现, 传输损耗测试结果和拉曼频率均值保持了较好的一致性, 反映了引起纤芯内部应力的结构缺陷是影响光纤传输损耗的重要因素。

关于光纤外径和激光扫描速度影响退火改性效果的原因, 推测是因为外径和扫描速度共同影响了光纤退火过程中退火区域温度的变化。将通过仿真对部分激光扫描速度条件下三种不同外径光纤的纤芯表面退火点温度变化进行初步分析。

## 2 CO<sub>2</sub>激光退火锗芯光纤温度变化仿真模拟分析

使用有限元软件 COMSOL Multiphysics 建立 CO<sub>2</sub>激光退火锗芯光纤的温度变化模型。仿真中将锗芯光纤轴向设为  $z$  轴、径向设为  $r$  轴建立二维轴对称几何模型。根据本研究中所用锗芯光纤的规格尺寸, 在仿真中设置光纤模型的长度为  $4 \text{ cm}$ , 内径为  $42 \mu\text{m}$ , 外径分别为  $188 \mu\text{m}$ 、 $251 \mu\text{m}$  和  $270 \mu\text{m}$ 。锗芯光纤模型示意图如图 9 所示, 激光从右侧单面照射, 沿着  $z$  轴轴向往复扫描, 黑色部分代表纤芯, 蓝色、绿色和黄色分别代表  $188 \mu\text{m}$ 、 $251 \mu\text{m}$  和  $270 \mu\text{m}$  的锗芯光纤外径, 仿真的位置点选取在纤芯靠近激光照射一侧表面的中间位置, 如图 9 中红点 ( $z=2 \text{ cm}$ ,  $r=21 \mu\text{m}$ ) 所示。

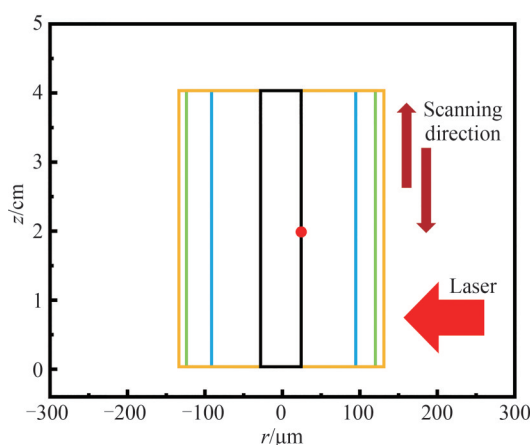


图 9 锗芯光纤激光退火仿真示意图

Fig. 9 Simulation diagram of laser annealing of Ge core fiber

采用本组之前研究中对锗芯光纤温度仿真的模拟公式和模拟方法<sup>[19-20]</sup>, 由能量守恒原理可知, 激光能量等于热传导向材料内部传送的热能、面向外部辐射的热能和对流换热向外界溢出的热能之和。因此锗芯光纤石英玻璃包层表面, 向空气辐射的边界条件为<sup>[21]</sup>

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = \xi \sigma (T_s^4 - T^4) \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{n}$  为光纤表面的法向量;  $k$  和  $\xi$  分别为材料的热传导系数和石英包层的表面热辐射系数;  $T$  为绝对温度,  $T_s$  为光纤的初始温度;  $\sigma$  为斯特藩-玻尔兹曼常数, 约为  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

所用锗芯光纤包层为二氧化硅, 其对波长为  $10.6 \mu\text{m}$  的 CO<sub>2</sub>激光有强烈的吸收, 包层将激光能量转换为热能, 再通过热传导的形式将热量传递到锗芯。包层表面能量吸收表达式<sup>[22]</sup>为

$$Q(r, z) = Q_0 \cdot (1 - R_c) \cdot \frac{A_c}{4\pi r_0 \sigma_z} \cdot \exp\left[\frac{-(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right] \cdot \exp(-A_c |r - r_0|) \quad (2)$$

式中,  $Q_0$  为激光功率;  $R_c$  为石英玻璃表面对激光的反射系数,  $A_c$  为包层对激光的吸收系数;  $r_0$  为锗芯光纤外径,  $\sigma_z$  激光光斑半径,  $z_0$  为激光加热点的纵轴坐标。

实验均在室温下进行, 因此仿真初始温度设置为  $293.15 \text{ K}$ , 退火过程中, 激光沿着光纤轴向往复多次扫描, 将一次扫描过程结束时的温度设置为下一次扫描的起始温度。

首先对外径为  $188\ \mu\text{m}$  的光纤,在激光扫描速度为  $8\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $14\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  条件下进行退火过程的温度模拟,结果如图 10 所示。仿真结果显示,光纤上仿真点的温度变化呈现出尖锐脉冲形状,不同激光扫描速度形成尖锐脉冲形状的最高点和最低点不同。激光扫描速度为  $8\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $14\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  时,温度的最高值分别为  $1754.574\ \text{K}$ 、 $1702.023\ \text{K}$  和  $1629.315\ \text{K}$ ,最低值分别为  $610.907\ \text{K}$ 、 $650.642\ \text{K}$  和  $702.696\ \text{K}$ 。不同扫描速度条件下温度脉冲波动次数也不同,三种激光扫描速度下整个退火过程中的温度脉冲波动次数分别为 4 次、5 次和 7 次,数值和激光扫描次数相同。

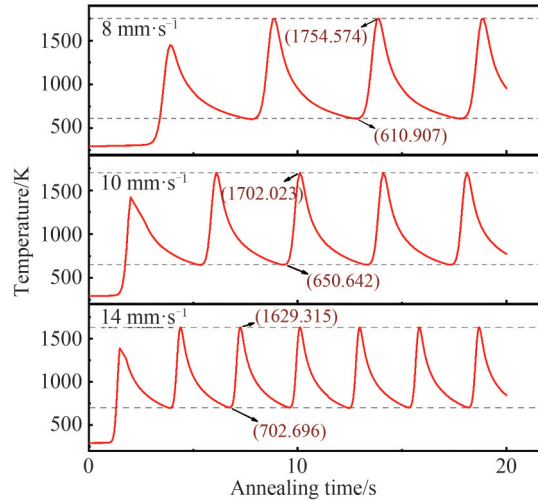


图 10 外径  $188\ \mu\text{m}$  的样品在不同扫描速度下的温度变化模拟

Fig. 10 Simulation of temperature variation of the sample with  $188\ \mu\text{m}$  OD at different scanning velocities

对外径为  $251\ \mu\text{m}$  的光纤在激光扫描速度为  $10\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $14\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $16\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  条件下进行退火过程的温度模拟,结果如图 11 所示。三种激光扫描速度下温度最高值分别为  $1680.027\ \text{K}$ 、 $1572.258\ \text{K}$  和  $1526.516\ \text{K}$ ,最低值分别为  $693.958\ \text{K}$ 、 $758.255\ \text{K}$  和  $781.212\ \text{K}$ ,温度脉冲的波动次数分别为 5 次、7 次和 8 次。 $251\ \mu\text{m}$  和  $188\ \mu\text{m}$  外径的光纤仿真结果呈现相似的规律性变化。

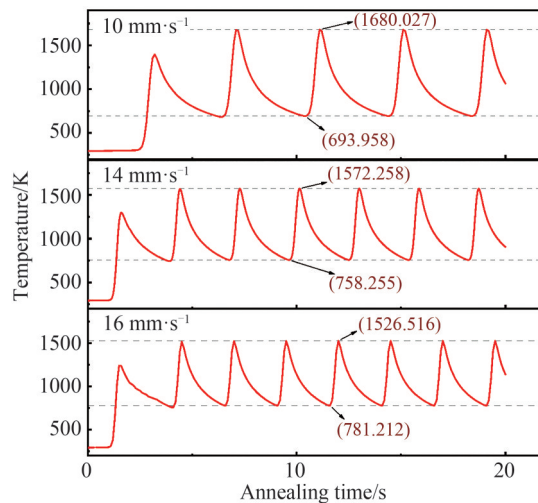
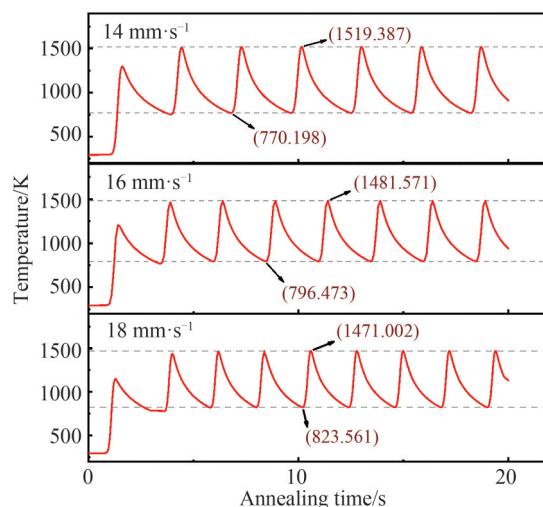


图 11 外径  $251\ \mu\text{m}$  的样品在不同扫描速度下的温度变化模拟

Fig. 11 Simulation of temperature variation of the sample with  $251\ \mu\text{m}$  OD at different scanning velocities

最后对外径为  $270\ \mu\text{m}$  的光纤在激光扫描速度为  $14\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $16\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $18\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  条件下进行退火过程的温度变化模拟,结果如图 12 所示。三种激光扫描速度下,温度最高值分别为  $1519.387\ \text{K}$ 、 $1481.571\ \text{K}$  和  $1471.002\ \text{K}$ ,最低值分别为  $770.198\ \text{K}$ 、 $796.473\ \text{K}$  和  $823.561\ \text{K}$ ,脉冲的波动次数分别为 7 次、8 次和 9 次。退火过程中的温度最高值和最低值随扫描速度的变化规律与另外两组直径样品相似。



图 12 外径 270  $\mu\text{m}$  的样品在不同速度下的温度变化模拟Fig. 12 Simulation of temperature variation of the sample with 270  $\mu\text{m}$  OD at different scanning velocities

通过仿真发现,较低扫描速度可以使纤芯达到较高的瞬时温度,但是温度区间最低温度降低,扫描次数变少,形成的温度脉冲波动次数也减少,扫描速度提高后,温度区间的高温值有所下降,但是低温值升高,扫描次数增加,脉冲次数也随之增加。相对于高扫描速度,低扫描速度条件下较少的脉冲次数使仿真点温度在大部分时间处于低值。因此在相同外径条件下,扫描速度提升使温度脉冲次数更多、脉冲更密集,这种温场结构对于纤芯改性的作用效果更加明显。

对比不同外径光纤在  $14 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  扫描速度下的温度变化模拟结果发现,光纤外径越小,形成的温度脉冲峰值越高,谷值越低。结合对拉曼 mapping 测试和光传输损耗测试结果分析,在  $14 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  时,  $188 \mu\text{m}$  光纤是过退火的状态,  $251 \mu\text{m}$  光纤达到合适的退火状态,  $270 \mu\text{m}$  光纤是退火不足状态。因此温度脉冲波动次数和温度脉冲持续时间相同条件下,温度脉冲的峰值高,温场结构对纤芯的改性作用效果强。

### 3 结论

本文对内径为  $41\sim 43 \mu\text{m}$ , 外径约为  $188 \mu\text{m}$ 、 $251 \mu\text{m}$  和  $270 \mu\text{m}$  的锗芯光纤进行 CO<sub>2</sub> 激光退火实验。结果表明,激光扫描速度是影响锗芯光纤退火效果的重要因素。对于不同外径的光纤,最合适的扫描速度随着光纤外径增大而提升。采用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件对 CO<sub>2</sub> 激光退火锗芯光纤过程进行了仿真,仿真结果显示激光退火过程中温度成尖锐脉冲形变化。相同外径条件下,激光扫描速度提高,温度脉冲的峰值升高、谷值降低、单脉冲持续时间缩短,脉冲更密集;相同扫描速度条件下,光纤外径减小,温度脉冲峰值提高,谷值降低,单脉冲持续时间不变。本研究可为后续锗芯光纤退火改性优化实验提供参考。

#### 参考文献

- [1] BALLATO J, HAWKINS T, FOY P, et al. Advancements in semiconductor core optical fiber [J]. Optical Fiber Technology, 2010, 16(6): 399-408.
- [2] SOREF R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium [J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 495-497.
- [3] MEHTA P, KRISHNAMURTHI M, HEALY N, et al. Mid-infrared transmission properties of amorphous germanium optical fibers [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(7): 071117.
- [4] GAN Fuxi. Development of optical fiber communication in the middle IR wavelength region ( $2\sim 5 \mu\text{m}$ ) [J]. Journal Infrared Millimeter and Waves, 1991, 10(6): 415-426.  
干福熹.  $2\sim 5 \mu\text{m}$  超长波段红外光纤通信的发展 [J]. 红外与毫米波学报, 1991, 10(6): 415-426.
- [5] HON N K, SOREF R, JALALI B. The third-order nonlinear optical coefficients of Si, Ge, and  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  in the midwave and longwave infrared [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(1): 011301.
- [6] GUO Rongxiang, GAO Haoran, CHENG Zhenzhou, et al. Advances on mid-infrared germanium integrated photonics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1901002.  
郭荣翔, 高浩然, 程振洲, 等. 中红外锗基集成光电子研究进展 [J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1901002.
- [7] CHAUDHURI S, SHEN L, HEALY N, et al. Hydrogenated amorphous germanium optical fiber [C]. Advanced

- Photonics 2015, June 27–July 01, 2015, USA, Boston: OSA Technical Digest (online) (Optica Publishing Group, 2015), NT2C.4.
- [8] ABOURADDY A F, BAYINDIR M, BENOIT G, et al. Towards multimaterial multifunctional fibres that see, hear, sense and communicate[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(5):336–347.
- [9] ZHANG T, LI K, ZHANG J, et al. High-performance, flexible, and ultralong crystalline Thermo- electric fibers[J]. *Nano Energy*, 2017, 41: 35–42.
- [10] ZHANG J, ZHANG T, ZHANG H, et al. Single-crystal SnSe thermoelectric fibers via laser-induced directional crystallization: from 1D fibers to multidimensional fabrics[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(36): e2002702.
- [11] ZHANG T, WANG Z, SRINIVASAN B, et al. Ultraflexible glassy semiconductor fibers for thermal sensing and positioning[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(2): 2441–2447.
- [12] TSUI H C L, HEALY N. Recent progress of semiconductor optoelectronic fibers[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2021, 14(4): 383–398.
- [13] BALLATO J, HAWKINS T, FOY P, et al. Glass-clad single-crystal germanium optical fiber[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8029–8035.
- [14] BO X Z, YAO N, SHIEH S R, et al. Large-grain polycrystalline silicon films with low intra-granular defect density by low-temperature solid-phase crystallization without underlying oxide[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(5): 2910–2915.
- [15] JI X Y, PAGE R L, CHAUDHURI S, et al. Single-crystal germanium core optoelectronic fibers[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 5(1): 1600592.
- [16] COUCHERON D A, FOKINE M, PATIL N, et al. Laser recrystallization and inscription of compositional microstructures in crystalline SiGe-core fibers[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13265.
- [17] CHEN H, FAN S Y, LI G R, et al. Single crystal Ge core fiber produced via pressure assisted melt filling and CO<sub>2</sub> laser crystallization[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(2): 81–84.
- [18] JI W, ZHAO B, OZAKI Y. Semiconductor materials in analytical applications of surface-enhanced Raman scattering[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2016, 47(1):51–58.
- [19] ZHAO Z, ZHANG J, WANG S, et al. CO<sub>2</sub> laser annealing of Ge core fibers with different core diameters[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 66:102645.
- [20] ÖZİŞİK M N. Heat conduction[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1993.
- [21] SIEGEL R, HOWELL J R. Thermal radiation heat transfer[M]. Washington: Hemisphere Pub. C- orp., 1981.
- [22] YANG S T, MATTHEWS M J, ELHADJ S, et al. Comparing the use of mid-infrared versus far-infrared lasers for mitigating damage growth on fused silica[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(14): 2606–2616.

## Study on Scanning Velocity of Germanium Core Fibers with Different Outer Diameters Annealed by CO<sub>2</sub> Laser

DU Yifan<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Ziwen<sup>1,2,3</sup>, ZHONG Shuangqi<sup>1,2,3</sup>, MA Zecheng<sup>1,2,3</sup>, WANG Shaoye<sup>1,2,3</sup>

(1 School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

(2 Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

(3 Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** As the germanium (Ge) core is mostly in an amorphous or polycrystalline state after fabrication, laser annealing is an effective way to improve the properties of semiconductor core fiber. During the laser annealing process, the axial scanning velocity of the laser along the fiber is an important parameter that affects the properties of the annealed fiber. Therefore, it is of great significance to investigate the modification mechanism of laser annealing on the Ge core to improve the properties of annealed fibers.

In this study, three sets of Ge core fibers with different outer diameters (OD) and the same inner diameter (ID) were annealed by CO<sub>2</sub> laser at different scanning velocities. The laser annealing experiments were carried out on Ge core optical fibers with an ID of 41~43 μm and the ODs of 188 μm, 251 μm, and 270 μm, respectively. The Ge core fibers were annealed by the SK-3D30 CO<sub>2</sub> laser. The laser spot is 1 mm in diameter, the output power is 0~30 W, and the laser wavelength is 10.6 μm. The scanning region

along the fiber axis is  $1\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ , which can completely cover the Ge core fiber, and the laser scanning in this region was reciprocated along the fiber axis during the annealing time. After laser annealing, samples were analyzed by using the spectrometer. Raman experiments were carried out on the cross-section of the Ge core fiber to collect the Raman peak frequency information. The obtained data was processed into mapping by MATLAB software. The optical transmission loss of Ge core fiber was measured by the cutback method. The system consists of a laser, photodetector, and optical power meter. The samples were cut off at 5 mm each time and measured 3 times per fiber. All measurements were made at room temperature.

Three sets of experiments were carried out, the laser frequency is 50 kHz, the laser power is 20% (6 W), and the laser scanning time is 20 s. 1) The Ge core fiber with an OD of about  $188\text{ }\mu\text{m}$  was annealed by laser, and the scanning velocities were set at  $8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $12\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , and  $14\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . The Raman frequency distribution and average value at  $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  laser scanning velocity closest to Ge bulk crystal and optical transmission loss values was  $3.435\text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ . 2) The Ge core fiber with an OD of about  $251\text{ }\mu\text{m}$  was annealed by laser, the scanning velocities were set at  $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $12\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $14\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $16\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , and  $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . The Raman frequency distribution and average value at  $14\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  laser scanning velocity closest to Ge bulk crystal and optical transmission loss values was  $2.147\text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ . 3) The Ge core fiber with an OD of about  $270\text{ }\mu\text{m}$  was annealed by laser, and the scanning velocities were set at  $12\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $14\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $16\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , and  $18\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . The Raman frequency distribution and average value at  $16\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  laser scanning velocity closest to Ge bulk crystal and optical transmission loss values was  $3.578\text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ . The experimental results show that under the same OD conditions, the laser annealing effect becomes better first and then worse with the increase in laser scanning velocity, and the scanning velocity for obtaining the optimal annealing effect increases with the increase of the OD of the fiber. Temperature variation at fixed points on the surface of the Ge core on the laser-irradiated side during the annealing process was simulated by COMSOL Multiphysics. The simulation results indicated that under the same OD conditions, the faster scanning velocity leads to the formation of denser temperature pulses, so that the Ge core is in the relatively high-temperature region most of the time, and the strength of the modification effect of this temperature field structure on the Ge core is more enhanced.

The experimental results and the simulation of temperature variation indicate that the laser scanning velocity is an important factor affecting the annealing effect of Ge core fiber. The annealing intensity of the laser-annealed Ge core fiber can be enhanced as the laser scanning velocity is increased.

**Key words:** Germanium core fiber; CO<sub>2</sub> laser annealing; Laser Scanning velocity; COMSOL simulation; Temperature change simulation

**OCIS Codes:** 060.2290; 060.3510; 060.2400; 060.2300