

激光与光电子学进展

CO₂激光退火锗芯光纤 COMSOL 仿真研究王少业^{1,2,3}, 张剑波^{1,2,3}, 赵子文^{1,2,3*}, 杜亦凡^{1,2,3}, 钟双栖^{1,2,3}¹上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444;²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;³上海大学上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444

摘要 采用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件模拟不同功率、不同扫描速度的 CO₂ 激光退火锗芯光纤过程中的温度场分布。通过分析激光退火过程中光纤温度场的分布和变化, 得到较为适合的激光退火条件。结合退火后锗芯光纤的拉曼光谱测试, 发现对于外径和内径分别为 190 μm 和 28 μm 的锗芯光纤而言, 在所有退火条件中, 2.153 W 激光功率、6 mm/s 扫描速度能明显改善光纤性能。本仿真研究为优化锗芯光纤特性的实验提供了参考。

关键词 光纤光学; 锗芯光纤; COMSOL 仿真; CO₂ 激光; 温度场分布

中图分类号 TN389

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221828

COMSOL Simulation of Temperature Field of CO₂ Laser Annealing Ge Core FiberWang Shaoye^{1,2,3}, Zhang Jianbo^{1,2,3}, Zhao Ziwen^{1,2,3*}, Du Yifan^{1,2,3}, Zhong Shuangqi^{1,2,3}¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China;²Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China;³Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract The temperature field distribution of germanium (Ge) core fiber in the process of CO₂ laser annealing with different powers and different scanning speeds was simulated by COMSOL Multiphysics. The suitable laser annealing condition was obtained by analyzing the distribution and change of the temperature field in the laser annealing process. Combined with the Raman spectroscopy measurement of the fiber after laser annealing, the laser power of 2.153 W and scanning speed of 6 mm/s were proper for the Ge core fiber annealing when the outer diameter of the fiber was 190 μm, the inner diameter of the fiber was 28 μm. The simulation of the paper provided a reference for experiments to optimize the properties of Ge core fibers.

Key words fiber optics; Ge core fiber; COMSOL simulation; CO₂ laser; temperature field distribution

1 引言

锗材料具有优良的光电特性和非线性光学特性^[1-3], 在近红外波段具有良好的透光性^[4], 高质量的锗芯光纤在中红外波段传感^[5]、生物医学^[6]、信号识别^[7]以及红外光纤通信领域^[8]有着巨大的应用潜力, 从而成为近年来研究的热点。尽管锗芯光纤具有广阔的应

用前景, 但是由于锗材料的特性, 目前制备的锗纤芯大多为多晶结构, 存在较高的缺陷密度和较大的残余应力, 传输损耗也较高, 无法达到商用要求。因此, 降低纤芯内残余应力和缺陷密度, 即提高锗芯结晶度是目前锗芯光纤研究中亟待解决的关键问题。

激光退火是提升锗芯光纤性能的有效方法。相比普通的加热炉退火, 激光退火具有退火区域精确可调、

收稿日期: 2022-06-14; 修回日期: 2022-07-13; 录用日期: 2022-07-20; 网络首发日期: 2022-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(61975114)

通信作者: *zhzwen@shu.edu.cn

加热和降温速度快、对周围环境影响小的优点。2016年,宾夕法尼亚大学的 Ji 等^[9]采用波长 488 nm 的连续波氩离子激光器对锗芯光纤进行热退火处理,通过 X 射线衍射测试验证了采用激光退火方案可得到长度为 9 mm、直径为 5.6 μm 的单晶锗芯,光纤在 2 μm 波长处的传输损耗只有 1.33 dB/cm。同年,挪威科技大学的 Coucheron 等^[10]使用 CO₂ 激光器加热玻璃包层硅锗芯光纤并使纤芯重结晶,从而降低了光纤的传输损耗。2019 年和 2020 年,挪威科技大学的 Wu 等^[11-12]利用 CO₂ 激光退火锗芯光纤,使硅锗芯重结晶并改变了纤芯中锗的分布,得到具有中心轴向特征的近单晶光纤,该研究为在玻璃包层硅锗芯光纤内刻写结构提供了可能性。2020 年,英国纽卡斯尔大学的 Chen 等^[13]利用 CO₂ 激光热处理锗芯光纤使其熔融再结晶,得到了芯径为 1 μm、长度为厘米级的光纤。2021 年,上海大学的 Zhao 等^[14]利用 CO₂ 激光器退火锗芯光纤,有效减小了纤芯中的残余应力。同年,上海大学的何

建等^[15]使用 CO₂ 激光对成分偏析的硅锗芯光纤进行激光热处理,在激光扫描方向的边缘区域形成了连续均匀的富硅区域。

在激光退火过程中,光纤内温度场的分布是决定光纤最终性能的重要因素,对其进行研究具有十分重要的意义,能够进一步提升锗芯光纤的性能。本文使用有限元仿真软件对 CO₂ 激光退火锗芯光纤过程中锗芯光纤温度场进行了仿真,研究了不同激光功率及扫描速度对光纤内部温度场的影响。

2 CO₂ 激光退火装置及仿真模型

2.1 CO₂ 激光退火装置

本研究选用上海三克激光公司 SK-3D30 型 CO₂ 激光器,退火装置如图 1 所示。图 1(a) 为 CO₂ 激光器装置图,激光光斑直径为 1 mm,输出功率为 30 W,波长为 10.6 μm。图 1(b) 为激光光束示意图,激光光束的能量服从高斯分布。

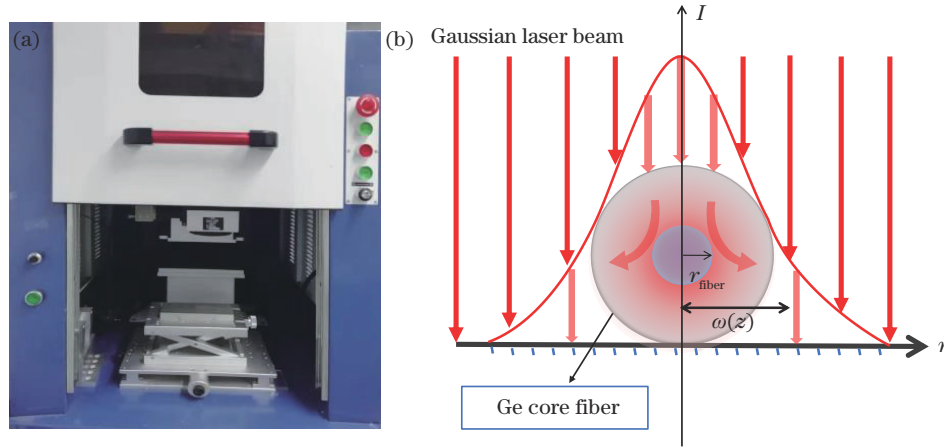


图 1 退火装置。(a) CO₂ 激光器装置图; (b) 激光光束

Fig. 1 Annealing device. (a) CO₂ laser device diagram; (b) laser beam

当激光垂直照射光纤时,由于光纤直径小于激光光斑直径,只有部分激光照射在光纤表面,其余能量以热量方式耗散在空气中。本文根据下式^[14]计算了实际照射在光纤表面的激光能量,

$$I = I_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right], \quad (1)$$

$$P = P_{\text{total}} \times \frac{I_{\text{fiber}}}{I_{\text{total}}}, \quad (2)$$

式中: I 是受激光照射的光纤表面任意点的光场强度; ω_0 是激光的束腰半径; $\omega(z)$ 是激光光斑的半径; r 表示径向坐标; I_{fiber} 是受激光照射的光纤表面的光场强度; P 表示照射在光纤表面的激光功率; P_{total} 表示激光器的输出功率。本文中, $\omega_0 = 0.5 \text{ mm}$, $\omega(z) = 0.5 \text{ mm}$, $r = 0.095 \text{ mm}$, P_{total} 分别设置为 1.5 W (5% 激光功率)、3 W (10% 激光功率)、4.5 W (15% 激光功率)、6 W (20% 激光功率)、7.5 W (25% 激光功率)。由式(1)和

式(2)可计算出, P 分别为 1.076 W、2.153 W、3.229 W、4.305 W、5.381 W。

2.2 CO₂ 激光退火温度场分布仿真模型

本文使用有限元软件 COMSOL Multiphysics 建立 CO₂ 激光退火锗芯光纤的温度场分布模型。有限元法(FEM)是基于计算机而快速发展起来的一种近似数值方法,常被用来解决力学、数学中带有特定边界条件的偏微分方程问题。有限元法和计算机的共同发展构成了现代计算力学的基础。有限元法的核心思想是“数值近似”和“离散化”,求解时对整个问题区域进行分解,每个子区域都成为简单的部分,这种简单的部分就称作有限元。COMSOL Multiphysics 以有限元法为基础,通过求解偏微分方程(单场)或偏微分方程组(多场)来实现对真实物理现象的仿真^[16]。和所有有限元分析软件一样,COMSOL Multiphysics 仿真的基本操作为:建模、定义材料、加边界条件、网格、计算、后处理。

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。根据实验室所用锗芯光纤样品的尺寸, 在仿真中设置光纤模型的长度为 4.5 cm, 外径为 $190\ \mu\text{m}$, 内径为 $28\ \mu\text{m}$, 锗芯光纤模型示意图如图 2 所示。在 COMSOL 软件中, 选择锗材料为纤芯, 二氧化硅材料为包层。图 3 为本实验室制备的锗芯光纤的端面图和侧面图。

激光照射方向为 r 轴, 沿 z 轴自下而上扫描, 扫描速度 v 分别为 6 mm/s、9 mm/s、12 mm/s、15 mm/s、18 mm/s、21 mm/s。仿真过程中对光纤轴向中心点 ($z=2.25\ \text{cm}$, $r=0$)、光纤下端面中心点 ($z=0$, $r=0$) 和上端面中心点 ($z=4.5\ \text{cm}$, $r=0$) 的温度进行监控, 如图 2 中红点位置所示。通过这 3 个中心点的温度变化来反映轴向温度变化。在轴向中心点温度达到最高时, 对中心点所在径向线 ($z=2.25\ \text{cm}$) 的温度进行监

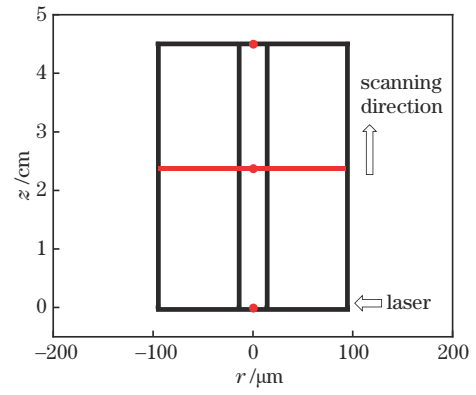


图 2 激光退火锗芯光纤的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser annealing Ge core fiber

控, 如图 2 中标红位置所示。扫描结束后, 光纤在常温下自然冷却。

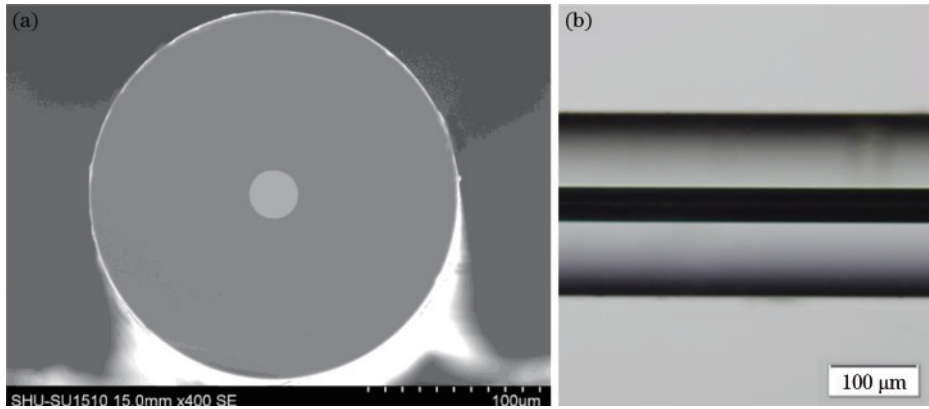


图 3 锗芯光纤。(a) 锗芯光纤端面图; (b) 锗芯光纤侧面图

Fig. 3 Ge core fiber. (a) Cross-section of Ge core fiber; (b) side view of Ge core fiber

设包层与纤芯材料是各向同性的, 其热传导方程^[17]为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mu_{\text{trans}} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (3)$$

式中: ρ 和 c_p 分别是材料密度和材料比热容; μ_{trans} 为激光扫描速率; T 为绝对温度; k 为材料的热传导系数; Q 为体热源的生热率。

设初始条件为

$$T_s = 20^\circ\text{C}, t = 0, \quad (4)$$

式中: T_s 为光纤初始温度, 设置为室温 20°C ; t 为激光开始照射的时间。

由能量守恒定律可知, 激光能量等于热传导向材料内部传递的热能、表面向外部辐射的热能和对流换热向外界溢出的热能之和。锗芯光纤石英玻璃包层表面向空气辐射的边界条件^[18]为

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = \xi \sigma (T_s^4 - T^4), \quad (5)$$

式中: \mathbf{n} 为光纤表面的法向量; ξ 为石英包层表面热辐射系数; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数或斯特藩常量, 该常数的值约为 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$ 。

设置对流的边界条件^[19]为

$$q = h(T_s - T), \quad (6)$$

式中: q 为对流热通量; h 为对流换热系数。

本研究中所用锗芯光纤包层为二氧化硅。锗在 $10.6\ \mu\text{m}$ 波长处是透明的, 而二氧化硅包层对此波长的激光有强烈的吸收^[11,13,20], 因此包层会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。包层表面的能量吸收表达式^[21]为

$$Q(r, z) = Q_0 \cdot (1 - R_c) \cdot \frac{A_c}{4\pi r_0 \sigma_z} \cdot \exp\left[\frac{-(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right] \cdot \exp(-A_c |r - r_0|), \quad (7)$$

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 为锗芯光纤半径; σ_z 激光光斑半径; z_0 为激光加热点的纵轴坐标。

3 CO₂ 激光退火锗芯光纤温度场仿真结果分析

3.1 光纤轴向中心点的温度分析

本文研究了在不同激光扫描速度和不同功率下, 轴向中心点 ($z=2.25\ \text{cm}$, $r=0$) 温度随退火时间的变

化曲线,所有仿真结果如图 4 所示。表 1 为中心点的最高温度统计。从图 4 分析发现,在同一扫描速度下,随着激光功率增大,轴向中心点的温度也升高。通过温度变化曲线可以看出,在不同激光功率条件下,轴向中心点温度达到最高所需的时间基本一致。结合表 1 和图 4 可知,在相同激光功率条件下,当扫描速度升高时,轴向中心点达到最大温度所需时间缩短,同时最高温度降低。

本研究组曾在利用马弗炉加热退火锗芯光纤的研究中发现,较合适的退火温度出现在锗熔点附近^[22]。该温度区域不会软化包层,可以有效避免纤芯被包层的氧元素污染^[19]。虽然马弗炉退火与 CO₂ 激光退火有

所不同,但是我们可以将马弗炉退火的结果作为激光退火仿真的参考。仿真结果显示,以下仿真参数得到的最高温度在锗芯熔点 1213.15 K (≈940 °C^[23]) 附近。如图 4(a) 所示,取 $v=6 \text{ mm/s}$ 、 $P=2.153 \text{ W}$, 在 $t=4 \text{ s}$ 时,中心点温度达到最高值 1204 K;如图 4(b) 所示,取 $v=9 \text{ mm/s}$ 、 $P=3.229 \text{ W}$, 在 $t=2.6 \text{ s}$ 时,中心点温度达到最高值 1253 K;如图 4(c) 所示,取 $v=12 \text{ mm/s}$ 、 $P=3.229 \text{ W}$, 在 $t=2 \text{ s}$ 时,中心点温度达到最高值 1144 K;如图 4(d) 所示,取 $v=15 \text{ mm/s}$ 、 $P=4.305 \text{ W}$, 在 $t=1.6 \text{ s}$ 时,中心点温度达到最高值 1204 K;如图 4(e) 所示,取 $v=18 \text{ mm/s}$ 、 $P=4.305 \text{ W}$, 在 $t=1.4 \text{ s}$ 时,中心点温度达到最高值 1131 K,取 $P=5.381 \text{ W}$,

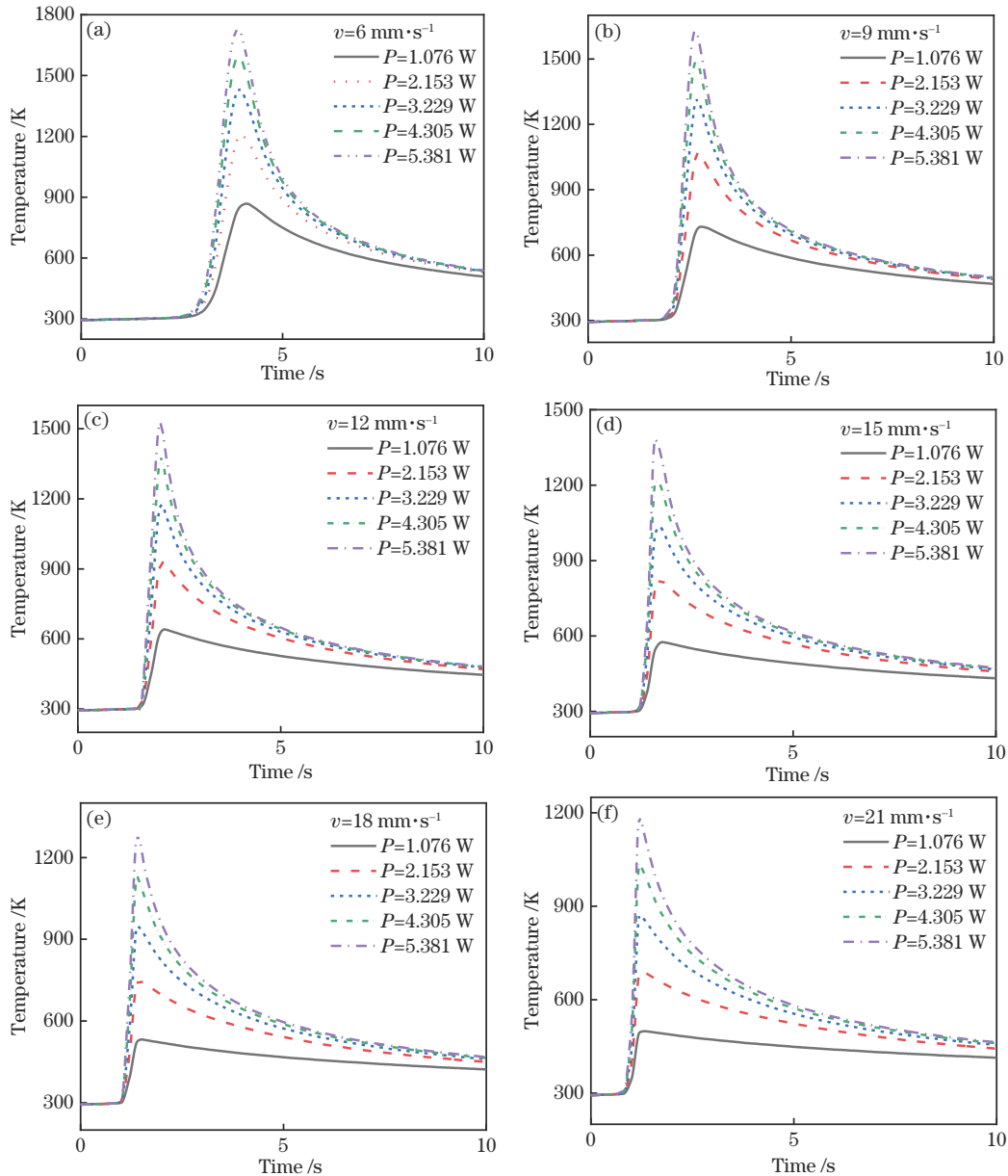


图 4 轴向中心点温度变化曲线。(a) $v = 6 \text{ mm/s}$; (b) $v = 9 \text{ mm/s}$; (c) $v = 12 \text{ mm/s}$; (d) $v = 15 \text{ mm/s}$; (e) $v = 18 \text{ mm/s}$; (f) $v = 21 \text{ mm/s}$
 Fig. 4 Temperature change curve of axial center point. (a) $v = 6 \text{ mm/s}$; (b) $v = 9 \text{ mm/s}$; (c) $v = 12 \text{ mm/s}$; (d) $v = 15 \text{ mm/s}$; (e) $v = 18 \text{ mm/s}$; (f) $v = 21 \text{ mm/s}$

表 1 中心点最高温度统计
Table 1 Statistics of the maximum temperature at the center point

$v /$ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Maximum temperature /K				
	$P =$ 1.076 W	$P =$ 2.153 W	$P =$ 3.229 W	$P =$ 4.305 W	$P =$ 5.381 W
6	862	1204	1420	1572	1696
9	730	1002	1253	1456	1617
12	638	915	1144	1344	1513
15	575	819	1016	1204	1381
18	530	747	948	1131	1290
21	498	684	870	1036	1193

在 $t=1.4 \text{ s}$ 时,中心点温度达到最高值 1290 K;如图 4(f)所示,取 $v=21 \text{ mm/s}$ 、 $P=5.381 \text{ W}$,在 $t=1.4 \text{ s}$ 时,中心点温度达到最高值 1193 K。以上退火条件有希望在不破坏光纤的情况下,有效提升锗芯性能,从而获得高质量锗芯光纤。

3.2 光纤径向和轴向温度差

通过上节的分析,得到了能使光纤轴向中心点温度达到锗芯熔点附近的退火条件,在不同的退火条件下,当光纤轴向中心点温度达到最高时, $z=2.25 \text{ cm}$ 处的径向温度场分布如图 5 所示。光纤侧面激光照射位置($r=95 \mu\text{m}$)温度较高,由于包层表面与环境存在热量交换,包层内部热量存在辐射耗散,在光纤内部,随着与照射点之间的距离的逐渐增大,温度逐渐降低,在光纤侧面背对激光照射点的位置($r=-95 \mu\text{m}$)温度最低。在图 5 中, r 在 $-14 \sim 14 \mu\text{m}$ 内为纤芯区域,其余为包层区域。相对于包层,纤芯区域两侧温度一致性较好,温度差在 1 K 以内。在各条件下,光纤包层两侧的径向温度差 T_{diff} ($r=95 \mu\text{m}$ 和 $r=-95 \mu\text{m}$ 两处的温度差)统计如表 2 所示。可见:在扫描速度、激光功率分别为 18 mm/s 、 4.305 W 时温度差最小,为 17 K;在扫描速度、激光功率分别为 9 mm/s 、 3.229 W 和 15 mm/s 、 4.305 W 时温度差最大,都为 50 K。

在各个退火条件下,本文分别对光纤轴向激光扫

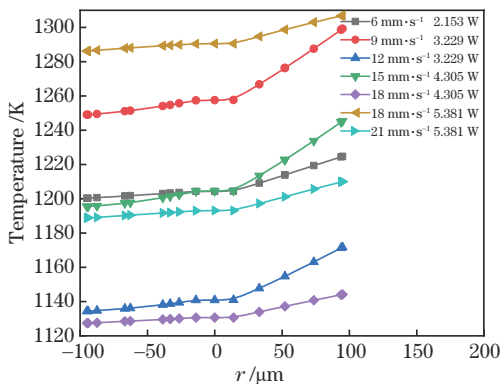


图 5 $z=2.25 \text{ cm}$ 位置锗芯光纤的径向温度场分布

Fig. 5 Radial temperature field distribution of the Ge core fiber at $z = 2.25 \text{ cm}$

表 2 不同退火条件下的径向温度差

Table 2 Radial temperature difference at different annealing conditions

$v /$ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	6	9	12	15	18	18	21
P / W	2.153	3.229	3.229	4.305	4.305	5.381	5.381
$T_{\text{diff}} / \text{K}$	24	50	37	50	17	21	21

描起始端和结束端的中心点,即点($z=0, r=0$)和点($z=4.5 \text{ cm}, r=0$),在退火过程中的温度进行仿真,其最高温度统计如表 3 所示。表中 T_{z_0} 为点($z=0, r=0$)所达到的最高温度, $T_{z_{4.5}}$ 为点($z=4.5 \text{ cm}, r=0$)所达到的最高温度。在 7 组退火条件中:当扫描速度为 15 mm/s 、激光功率为 4.305 W 时,退火锗芯光纤轴向两端点的最高温度的差值 T_{diff} 最小,为 401 K;当扫描速度为 18 mm/s 、激光功率为 5.381 W 时,退火锗芯光纤 T_{diff} 最大,为 547 K。在这两组退火条件下的光纤两端中心点温度变化曲线如图 6 所示。光纤两端温度差是由激光扫描光纤过程中两个点热量积累不同造成的。光纤两端的最高温度的差异会引起两端退火后的特性差异。除了最高温度,温度随时间的变化也会影响纤芯特性。目前我们还在对退火过程中温度场分布对纤芯结构影响的物理机理进行更加深入的研究。

表 3 光纤轴向两端中心点最高温度统计

Table 3 Statistics of maximum temperature at the center point of both ends of the fiber axis

$v /$ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	6	9	12	15	18	18	21
P / W	2.153	3.229	3.229	4.305	4.305	5.381	5.381
T_{z_0} / K	995	1068	946	990	910	1022	949
$T_{z_{4.5}} / \text{K}$	1433	1514	1392	1391	1376	1569	1435
$T_{\text{diff}} / \text{K}$	438	446	446	401	466	547	486

为了更好地比较光纤轴向两端最高温度的温度差和径向温度差对光纤的影响,本文将轴向最高温度的温度差和径向温度差进行归一化拟合,拟合方法为

$$T_{\text{diff}}^* = \frac{T_{\text{diff}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}, \quad (8)$$

式中: T_{diff}^* 为归一化后的数值; T_{max} 为温度的最大值; T_{min} 为温度的最小值。拟合后的温度差如表 4 和图 7 所示。因为径向温度差是光纤侧面包层两端的温度差,而纤芯部分径向温度差较小,所以我们优先考虑轴向温度差的影响。从图 7 可以看出,轴向温度差归一化拟合值最小的两组参数分别对应扫描速度为 6 mm/s 、激光功率为 2.153 W 和扫描速度为 15 mm/s 、激光功率为 4.305 W 这两种情况。关于包层温度差对光纤的影响程度还需要结合实验进行进一步的研究。

为了对仿真结果进行验证,本文采用法国 Horiba Jobin Yvon 公司生产的 LabRam HR Evolution 型显微共

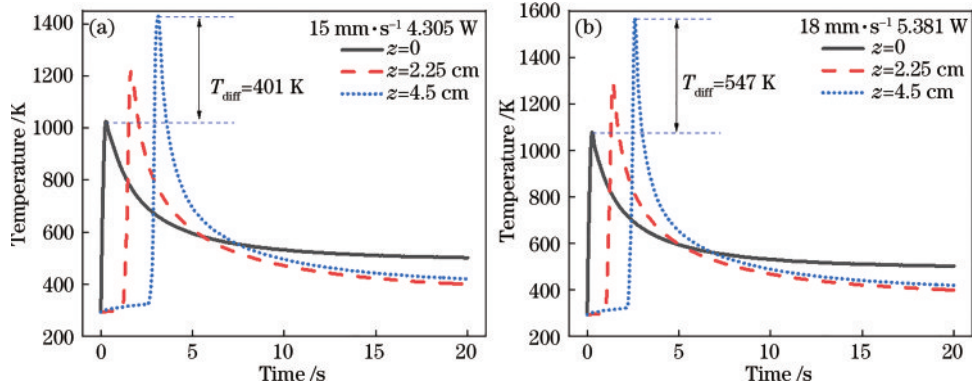


图 6 光纤轴向两端中心点温度场分布。(a) $v = 15 \text{ mm/s}$, $P = 4.305 \text{ W}$; (b) $v = 18 \text{ mm/s}$, $P = 5.381 \text{ W}$
 Fig. 6 Temperature field distribution at the center point of the two ends of the fiber axis. (a) $v = 15 \text{ mm/s}$, $P = 4.305 \text{ W}$; (b) $v = 18 \text{ mm/s}$, $P = 5.381 \text{ W}$

表 4 归一化轴向、径向温度差表

Table 4 Normalized axial and radial temperature difference

$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	6	9	12	15	18	18	21
P / W	2.153	3.229	3.229	4.305	4.305	5.381	5.381
T_{diff}^* in radial /K	0.212	1.000	0.606	1.000	0.000	0.121	0.121
T_{diff}^* in axis /K	0.253	0.308	0.308	0.000	0.445	1.000	0.582

焦拉曼光谱仪,在 633 nm 激光波长下对端面进行拉曼测试。测试的对象包括锗晶体、未退火的锗芯光纤、退火的锗芯光纤。退火的锗芯光纤由两种方式获得,一是采用扫描速度为 6 mm/s 的 2.153 W 激光进行退火,二是采用扫描速度为 15 mm/s 的 4.305 W 激光进行退火。试验光纤与仿真中的光纤尺寸一致。测得的拉曼光谱如图 8 所示。锗晶体的拉曼峰频率为 301.200 cm^{-1} ,未退火的锗芯纤芯的拉曼峰频率为 300.313 cm^{-1} 。扫描速度为 15 mm/s、激光功率为 4.305 W 对应的退火的纤芯拉曼峰频率为 300.739 cm^{-1} ,与锗晶体的拉曼峰频率相差 0.461 cm^{-1} ;扫描速度为 6 mm/s、激光功率

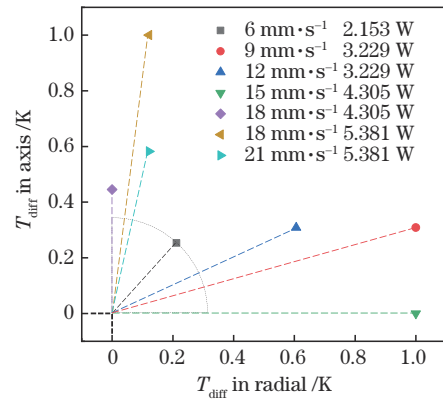


图 7 光纤轴向、径向温度差拟合图
 Fig. 7 Fitting diagram of fiber axial and radial temperature difference
 为 2.153 W 对应的退火的纤芯拉曼峰频率为 301.102 cm^{-1} ,与锗晶体的拉曼峰频率相差 0.098 cm^{-1} 。相较于未退火光纤,退火后的锗芯端面拉曼峰频率明显向高波数方向移动,更加接近锗晶体的拉曼峰频率。

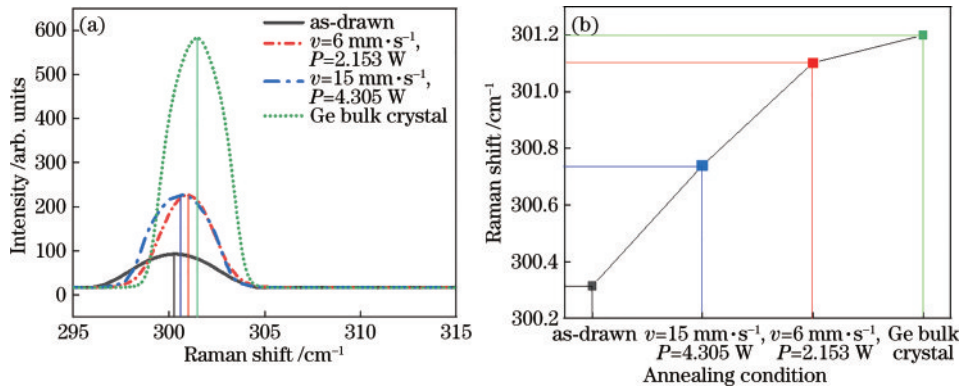


图 8 拉曼光谱图。(a)拉曼峰频率对比;(b)拉曼峰折线图
 Fig. 8 Raman spectrum. (a) Comparison of Raman peak frequency; (b) line chart of Raman peak

根据平均拉曼峰频率的变化,本文计算了光纤内的残余应力,计算公式^[24]为

$$\delta = (-40 \text{ MPa} \cdot \text{cm}) \times \delta_{\omega} (\text{cm}^{-1}), \quad (9)$$

式中: δ 是光纤内的残余应力; δ_{ω} 表示锗芯光纤样品平均拉曼峰频率与锗晶体拉曼峰频率的差值。未退火的

锗芯内的残余应力约为 40 MPa;扫描速度为 15 mm/s、激光功率为 4.305 W 退火的纤芯内残余应力为 18.44 MPa;扫描速度为 6 mm/s、激光功率为 2.153 W 退火的纤芯内残余应力为 3.92 MPa。残余应力的变化说明利用仿真中所得出的退火条件,退火锗芯光纤

可以有效地提升光纤性能。锗芯中大部分残余应力来自光纤拉制过程中形成的畸变以及晶格错位,通过激光后处理基本可以消除。

拉曼峰半峰全宽(FWHM)数值可以反映晶体的平均晶粒大小,平均晶粒越大,拉曼峰越尖锐,峰形越窄。单晶锗对应的FWHM为 2.540 cm^{-1} ,未退火锗芯对应的FWHM为 4.568 cm^{-1} 。经扫描速度为 15 mm/s 、功率为 4.305 W 的激光退火后的纤芯对应的FWHM下降到 3.775 cm^{-1} ;经扫描速度为 6 mm/s 、功率为 2.153 W 的激光退火后的纤芯对应的FWHM下降到 3.116 cm^{-1} 。激光退火降低了样品拉曼峰的FWHM,退火后样品的拉曼峰强度也高于未退火样品,说明此时同方向排列的晶粒数量增多。以上测试说明激光退火提高了样品结晶度。

结合光纤样品的拉曼峰频率、残余应力和FWHM分析可得:扫描速度为 6 mm/s 、激光功率为 2.153 W (10%激光功率)的退火条件明显地改善了锗芯光纤的性能。

4 结 论

本文采用COMSOL Multiphysics有限元仿真软件对 CO_2 激光退火锗芯光纤过程进行了仿真,研究了其在不同激光功率、不同激光扫描速度下锗芯光纤的温度场。在仿真中设置光纤模型的长度为 4.5 cm ,外径为 $190\text{ }\mu\text{m}$,内径为 $28\text{ }\mu\text{m}$,照射到光纤表面的激光功率分别设置为 1.076 W 、 2.153 W 、 3.229 W 、 4.305 W 、 5.381 W ,扫描速度分别设置为 6 mm/s 、 9 mm/s 、 12 mm/s 、 15 mm/s 、 18 mm/s 、 21 mm/s 。通过分析单侧 CO_2 激光退火过程中光纤的径向温度分布、轴向温度差异,得到在所选参数中, 2.153 W 功率、 6 mm/s 扫描速度有希望明显改善锗芯光纤性能。通过拉曼测试对仿真进行了初步验证。本研究为 CO_2 激光退火优化锗芯光纤性能的实验提供了参考。

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] 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):9.
- [3] 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. Guo R X, Gao H R, Cheng Z Z, et al. Advances on mid-infrared germanium integrated photonics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1901002.
- [4] Soref R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8): 495-497.
- [5] 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.

- [6] Ji X, Zhang B, Krishnamurthi M, et al. Mid-infrared spectroscopic imaging enabled by an array of Ge-filled waveguides in a microstructured optical fiber probe[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28459-28466.
- [7] Sui K Y, Feng X, Hou Y B, et al. Glass-clad semiconductor germanium fiber for high-speed photodetecting applications[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(4): 1211-1219.
- [8] 干福熹. $2\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 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. Gan F X. Development of optical fiber communication in the middle IR wavelength region($2\sim 5\text{ }\mu\text{m}$) [J]. *Journal Infrared Millimeter and Waves*, 1991, 10(6): 415-426.
- [9] Ji X, Page R L, Chaudhuri S, et al. Single-crystal germanium core optoelectronic fibers[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(1): 1600592.
- [10] Coucheron D A, Fokine M, Patil N, et al. Laser recrystallization and inscription of compositional microstructures in crystalline SiGe-core fibres[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13265.
- [11] Wu W, Balci M H, Mühlberger K, et al. Ge-capped SiGe core optical fibers[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(11): 4301-4306.
- [12] Wu W, Balci M, Song S, et al. CO_2 laser annealed SiGe core optical fibers with radial Ge concentration gradients [J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(4): 926-936.
- [13] Chen H, Fan S, Li G, et al. Single crystal Ge core fiber produced via pressure assisted melt filling and CO_2 laser crystallization[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(2): 81-84.
- [14] Zhao Z W, Zhang J B, Wang S Y, et al. CO_2 laser annealing of Ge core fibers with different core diameters [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 66(6): 102645.
- [15] 何建, 陈娜, 陈振宜, 等. 激光热处理对硅锗芯石英包层光纤成分分布的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0306001. He J, Chen N, Chen Z Y, et al. Effects of laser thermal processing on composition distribution of SiGe core silica cladding fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0306001.
- [16] 丁伟, 王菲, 王孟洁, 等. 大功率激光作用下光学系统轴向焦移仿真[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(11): 1114011. Ding W, Wang F, Wang M J, et al. Simulation of axial focal shift of optical system under high-power laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1114011.
- [17] Ozisik M N. Heat conduction[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993, 10-15.
- [18] Siegel R, Howell J R. Thermal radiation heat transfer [M]. Hemisphere Pub. Corp, 1981.
- [19] Glass D E, Özişik M N, McRae D S, et al. Hyperbolic heat conduction with temperature-dependent thermal conductivity[J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 59(6): 1861-1865.

- [20] Healy N, Fokine M, Franz Y, et al. CO₂ laser-induced directional recrystallization to produce single crystal silicon-core optical fibers with low loss[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(7): 1004-1008.
- [21] 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.
- [22] Zhao Z W, Cheng X L, He T, et al. Effect of controlling recrystallization from the melt on the residual stress and structural properties of the Silica-clad Ge core fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 37: 6-10.
- [23] Hassion F K, Thurmond D C, Trumbore F A. On the melting point of germanium[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1955, 59(10): 1076-1078.
- [24] Sparks R G, Paesler M A. Micro-Raman analysis of stress in machined silicon and germanium[J]. *Precision Engineering*, 1988, 10(4): 191-198.