

二氧化锗空芯光纤的研究

侯蓝田 付连符 吕平 韩玉华

(吉林大学物理系, 长春 130023)

李秋更 徐立瑄 李天柱

(北京玻璃研究所, 北京 100038)

摘要 提出并建立了制造纯 GeO_2 空芯光纤的方法. 研制的纯 GeO_2 空芯光纤的输出功率达到 18W, 损耗为 1.23dB/m. 论述了该光纤的传输激光能量的原理, 探讨了光纤的传输损耗和应用领域.

关键词 二氧化锗 空芯光纤 二氧化碳激光

传输 CO_2 激光能量的光纤存在着几个难以克服的缺点: 在高能量作用下, 光纤的温度升高、光纤热点损耗的出现、输入输出端的烧蚀等现象. 人们为了解决这些问题, 必须降低材料的本征损耗, 处理光纤端面, 减少光纤表面和内部的结构缺陷, 提高材料的均匀性, 研制低损耗的光纤包层材料等. 这些工作都是十分困难的. 1981年由 Hidaka^[1]等人提出的用具有 $n_r < 1$ 的氧化物玻璃做成空芯光纤, 开辟了一条新的途径, 引起了国际上的广泛重视, 相继出现了金属空芯波导、介质膜空芯波导、氧化物玻璃空芯波导、晶体空芯波导等, 输出的能量和光纤的参数已达到了应用程度^[2-9]. 本文论述了首次完成的六方多晶 GeO_2 空芯光纤的传输原理、光纤特性和制造方法, 并对其应用进行了尝试.

1 GeO_2 空芯光纤材料的分析

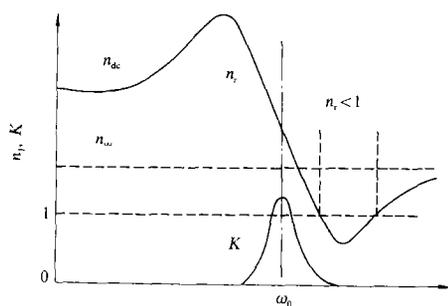


图1 折射率 n_r 、消光系数 K 随频率变化关系示意图

由于在半导体和电介质材料中都存在着对入射辐射的吸收和色散, 而在吸收峰的高频端总存在着复折射指数 $n = n_r - iK$ 的实部 $n_r < 1$ 的反常色散区(图1). 一些氧化物玻璃的 $n_r < 1$ 的区域大多数出现在 CO_2 激光频率区. 纯 SiO_2 玻璃在 1273 cm^{-1} ($7.86\text{ }\mu\text{m}$) 处, 具有 $n_r = 0.54$ (全反射角 $32^\circ 40'$), $K = 0.14$ 损耗系数 $\alpha = 0.07\text{ dB/m}$ ^[2]. Al_2O_3 晶体或陶瓷, 在 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 处的 $n_r = 0.67$ (全反射角 $42^\circ 10'$), $K = 0.136$, 损耗系数 $\alpha = 0.17$ ^[7]. SiC 材料的 $n_r = 0.2$ (全反射角 $11^\circ 40'$), $K = 1.13$,

损耗系数 $\alpha \cong 0.35 \text{ dB/m}$; 至于金属波导, Al 的 $n_r = 20.5$, $K = 58.6$; Au 的 $n_r = 11.5$, $K = 67.5$; Ag 的 $n_r = 5$, $K = 75$, 都不具备在 $10.6 \mu\text{m}$ 处 $n_r < 1$ 的特点.

GeO_2 具有四面体的三维网络, 原子半径 0.125 nm , Ge 原子的电负性为 1.8 , GeO_2 的占空分数为 0.24 , 晶态 GeO_2 与 $\alpha\text{-SiO}_2$ 晶体类似, 具有六方结构.

从 GeO_2 的红外吸收光谱(图 2)可见, 它在 893 cm^{-1} 处存在一吸收峰, 在它的高频端 940 cm^{-1} 位置, $n_r = 0.57$, $K = 0.82^{[8]}$ (全反射角 $34^\circ 50'$). 但是, 由于纯 GeO_2 的离子键率为 55% , 而且在它的熔点附近没有形成高粘度, 不能造成原子流动的高势垒. 因此, 无法形成稳定的

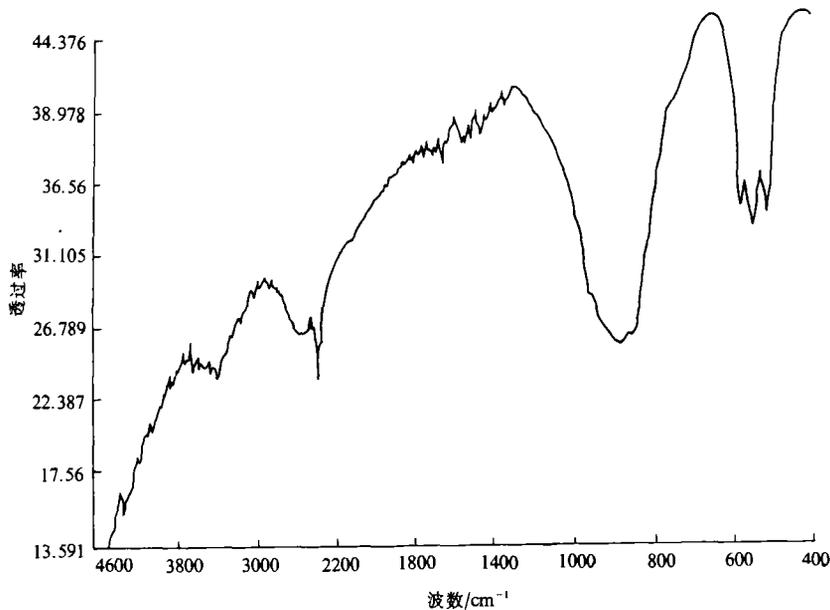


图 2 GeO_2 红外吸收光谱图

玻璃态^[9], 所以 Worrell 等人都对纯 GeO_2 进行掺杂, 制成 GeO_2 基玻璃光纤. 但是, 所有的掺杂物都带来损耗系数的增加, 而且降低了光纤的承受能力. 为此, 进行了纯 GeO_2 光纤制备工艺和特性的研究.

2 光纤的制备

制造纯的多晶六方 GeO_2 空芯光纤的主要工艺过程是沉积、控制和热处理三部分. 采用 CVD 方法在内径 $\phi 10 \sim 20 \text{ mm}$ 的石英管内壁沉积一层纯 GeO_2 , 要求沉积层牢固、均匀. 然后在拉丝机上拉成所需要的空芯光纤. 空芯光纤内壁 GeO_2 的厚度要根据需要加以控制, 通常为几微米到十几微米.

用上述方法拉制的光纤, 内壁 GeO_2 晶体成微粒状, 不能敷盖住基底石英玻璃, 需要进行热处理, 使它形成 GeO_2 多晶膜, 而且必须保证是六方多晶体才有最好效果. 处理的方法是将光纤放进一个特制的炉子里, 炉温升到 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ (不能高于六方晶体 GeO_2 的熔点 $1115 \text{ }^\circ\text{C}$), 保持一定时间后降温, 即完成了热处理过程.

3 测试与实验

3.1 光纤内壁的形貌观察

光纤在热处理前,内壁为 $\phi 1 \sim 2 \mu\text{m}$ 的 GeO_2 晶粒的聚集体,如图 3 所示,此种状态的 GeO_2 没有形成光滑的反射面,经 1100°C 热处理后,如图 4 所示, GeO_2 已经变为较为平滑的反射面,只是存在着许多微裂纹,它的宽度为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$,对 CO_2 激光的反射率影响不太大.造成微裂纹的原因是由于 GeO_2 和 SiO_2 的热膨胀系数不同.如果热处理的工艺条件掌握的好,可以使微纹变得更小.由于 GeO_2 层的存在, CO_2 激光在空芯光纤内传输,就形成了以空气为光密媒质, GeO_2 为光疏媒质的满足全反射条件的光纤.

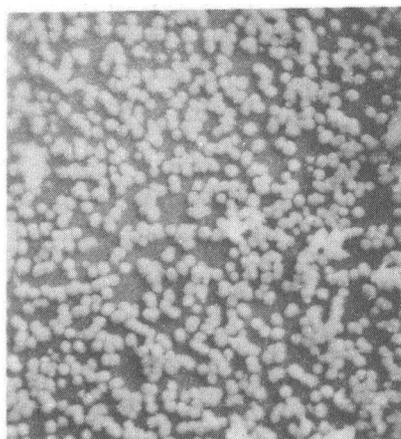


图 3 热处理前光纤内壁 GeO_2 状态电子显微镜照片



图 4 热处理后光纤内壁 GeO_2 状态电子显微镜照片

表 1 光纤输出功率

光纤编号	长度/mm	直径 ϕ /mm	输出功率/W
1	1045	0.8	7.5 ~ 10
2	1425	0.8	10.5 ~ 12.5
3	1385	0.8	8.0 ~ 13.0
4	1385	0.8	12.0 ~ 18.0

表 2 光纤弯曲状态下的能量输出

弯曲角度	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
输出功率/W	7.0	6.5	6.0	6.0	5.5	5.5	5.0

条件下,测得结果见表 1.

我们对 1 号光纤的弯曲输出进行了测量,结果见表 2.

采用截断法测量了光纤的损耗,结果见表 3.

3.2 GeO_2 多晶的 X 光测定

我们采用日本理学 12kW 衍射仪 (RAX-10 型) 测定光纤内壁 GeO_2 沉积层,确认经热处理后的 GeO_2 为六方晶 (见图 5). 经测定,玻璃态和无定型态 GeO_2 沉积层光纤的传输损耗都大于六方 GeO_2 多晶光纤.这和 Worrell^[2] 的结果一致.

3.3 光纤的输出功率及其传输损耗

我们采用 35W CO_2 激光器,经过耦合器聚焦到光纤的入射端,耦合效率为 70%. 耦合器的焦距为 130 mm,在保证光纤与光轴准直

表 3 光纤传输损耗测量结果

光纤	光纤输出端功率/W			平均功率/W	光纤长度/m	光纤损耗 /dB/m
	一次	二次	三次			
I 切前	6.3	6.4	6.3	6.33	1.610	1.23
	切后	7.2	7.1			
II 切前	7.5	7.6	7.57	7.57	1.365	1.87
	切后	8.2	8.0			

表 4 几种材料作成空芯光纤的模式损耗

模式	100GeO ₂	5PbO + 95GeO ₂	5Na ₂ O + 95GeO ₂	5Al ₂ O ₃ + 95GeO ₂	10K ₂ O + 90GeO ₂
HE ₁₁	0.07	0.096	0.108	0.093	0.132
TE ₀₁	0.112	0.152	0.157	0.137	0.230
TM ₀₁	0.294	0.382	0.387	0.343	0.446
HE ₁₂	0.421	0.554	0.564	0.500	0.700

从所测光纤损耗和输出功率的数据可知, CO₂ 激光器的输出功率, 只有一部分耦合到光纤中, 主要原因是由于耦合器焦点上能量光斑尺寸大于光纤内径造成的. 除此之外, 耦合器焦距的长短, 入射功率的大小, 作用时间的长短等, 也都影响着光纤的输出功率和传输损耗. 尤其是实芯光纤影响更大. 我们研制的多晶六方 GeO₂ 空芯光纤, 则没有发现功率受作用时间的影响, 用 50W CO₂ 激光输入, 照射一个小时, 对光纤参数并无影响.

为了分析和比较各类空芯光纤的损耗, 对 HE₁₁, TE₀₁, TM₀₁, HE₁₂ 等 4 个模式的传输损耗进行了计算:

$$\alpha_{nm} = (U_{nm}/2\pi)^2 \lambda^2 / T^3 \begin{cases} \text{Re}(Z_{TE}), & \text{对 TE}_{0m} \text{ 模,} \\ \text{Re}(Y_{TM}), & \text{对 TM}_{0m} \text{ 模,} \\ \text{Re}(Z_{TE} + Y_{TM})/2, & \text{对 HE}_{nm} \text{ 模,} \end{cases}$$

式中 $Z_{TE} = (v^2 - 1)^{-\frac{1}{2}}$, $Y_{TM} = v^2 / (v^2 - 1)^{-\frac{1}{2}}$, v 是壁材料的复折射率, λ 是真空中波长, U_{nm} 可由下式的 Bessel 方程得到

$$J_1(U_{nm}) = 0 \quad (n=0, \text{ 对 TE}_{0m} \text{ 和 TM}_{0m} \text{ 模}),$$

$$J_{n+1}(U_{nm}) = 0 \quad (n \neq 0, \text{ 对 EH}_{0m} \text{ 和 HE}_{nm} \text{ 模}),$$

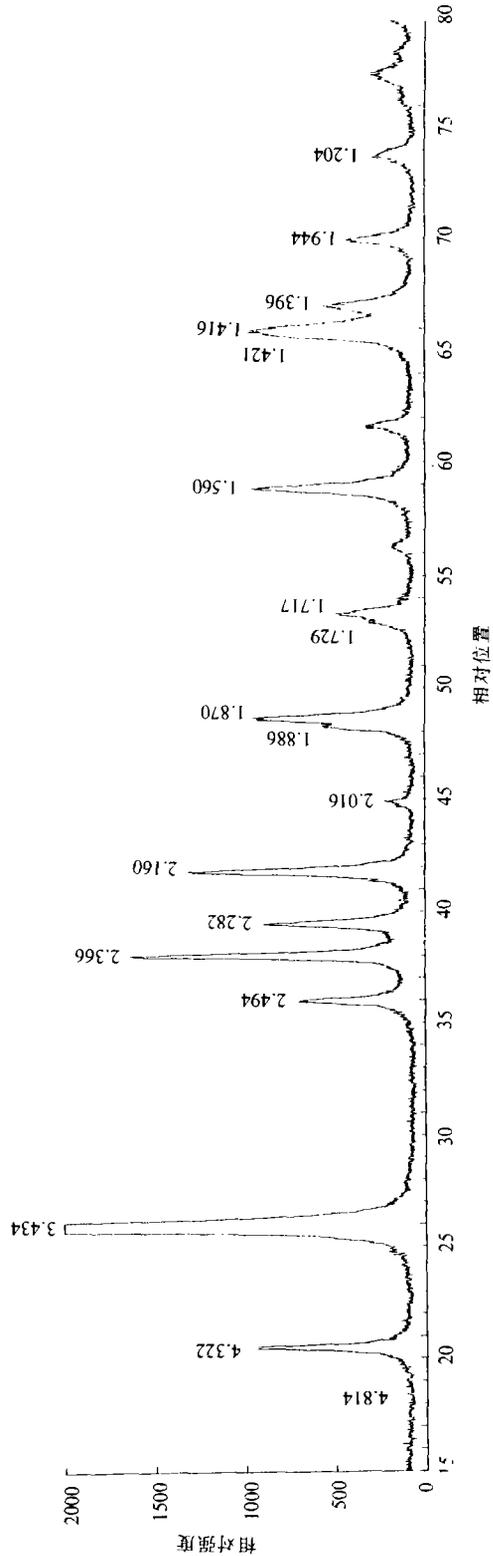


图 5 六方晶系 GeO₂ 的 X 光衍射谱图 ($a=0.4985 \text{ nm}$, $c=0.5648 \text{ nm}$)

应用上式,可以计算不同材料在 $10\mu\text{m}$ 处的各模式损耗. Worrell 等人计算了多种掺杂氧化物的 GeO_2 基玻璃的 n_r 和 K 值,利用上述数据计算了纯 GeO_2 光纤的损耗并和其它材料比较,计算结果见表 4.

在计算中,把光纤直径都规一化为 $\phi 1.0\text{mm}$,并用 M-S 理论加以修正.从表 4 中可以看出,纯 GeO_2 材料制成空芯光纤的各个模式损耗都比其它材料包括金属材料的空芯光纤小.而且其弯曲损耗也比较小.

4 讨论

采用独创的方法研制成功多晶六方 GeO_2 空芯光纤,该光纤的膜层结构尚未达到消除裂纹,平滑晶界和良好的均匀性;尤其还没有对它的传输功率阈值进行测量,不知道它的最大输出功率值.我们相信,经过改进,光纤的性能还会有较大的提高.它在医学、机械、工艺品加工、刻划等方面会有广泛应用.

致谢 对北京玻璃研究所高技术室的同志给予的合作,吉林大学王新旗同志给予的帮助均表示谢意.

参 考 文 献

- 1 Hidaka T, Morikawa T, Shimada J. Hollow-core oxide-glass cladding optical fiber for middle-infrared region. *J Appl Phys*, 1981, 52(7): 4 467
- 2 Worrell C A, Sarda V. CO_2 laser waveguides from germania-based glasses. *J Appl Phys D*, 1989, 22: 535~541
- 3 Machida H, Ishikawa H, Miyagi M. Fabrication of thin dielectric-coated square waveguides for CO_2 laser light transmission. *SPIE Vol 1 591, Infrared Fiber Optics*, 1991, 116
- 4 Christopher C G, James A H. Hollow alumina fibers for CO_2 laser delivery systems. *SPIE Vol 1 228, Infrared Fiber Optics*, 1990, 178
- 5 Nobuhiro Nagano, Mitsunoyi Saito, Mitsunobu Miyagi *et al.* $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ based glasses for infrared hollow waveguides. *Appl Opt*, 1991, 30(9): 1 074~1 079
- 6 Akihito Hongo, Kenichi Morosawa, Tsuneo Shiota. Transmission of 1kW-class CO_2 laser light through circular hollow waveguides for material processing. *Appl Phys Lett*, 1991, 58(15): 1 582~1 584
- 7 Spitzer W G, Kleinman D, Walsh D. Infrared properties of hexagonal silicon carbide. *Phys Rev B*, 1958, 113(1): 127~131
- 8 Hidaka T. Loss Calculations of the hollow-core oxide-glass-cladding middle-infrared optical waveguides. *J Appl Phys*, 1982, 53(1): 93~95
- 9 Worrell C A. Infrared optical properties of glasses and ceramics for hollow waveguides operating at $10.6\mu\text{m}$ wavelength. *SPIE Vol 843, Infrared Optical Materials and Fibers*, 1997, V: 80~87