

$$V_{\text{eff}} = \frac{2 \sin \alpha / 2}{\alpha} \cdot \frac{\arcsin P}{\arcsin \left(\frac{2 \sin \alpha / 2}{\sin \alpha} \cdot P \right)} \cdot V \quad (5)$$

当电流很小时即 $P \rightarrow 0$, 容易由上式导出最大 V_{eff} 与理想值 V 之间的关系

$$V_{\text{eff}} = \frac{\sin \alpha}{\omega} \cdot V \quad (6)$$

这说明交叉绕制的传感头的等效 Verdet 常数比理想值下降了 $\sin \alpha / \alpha$ 倍, 只与单圈光纤的感应双折射大小有关, 与光纤的总圈数 N 无关。因此, 采用交叉绕制的传感头可以大大减小弯曲双折射的影响, 获得与理想介质相近的测量灵敏度。实验中实际采用的传感头 $N=20$, $R=0.06 \text{ m}$, $\alpha=25.6^\circ$ 。代入

(6) 式解得 $V_{\text{eff}}=0.0156 \text{ 分/A}$, 与实验结果 $V_{\text{eff}}=0.0155 \text{ 分/A}$ 符合得很好。另外, (5) 式也可以纠正非线性现象。根据 $I=1200 \text{ A}$ 时的测量值 $P=0.2068$, 易从 (5) 式得 $V_{\text{eff}}=0.0156 \text{ 分/A}$, 与 $I=0$ 时的实验值 $V_{\text{eff}}=0.0155 \text{ 分/A}$ 吻合, 从而完全克服了非线性误差, 拓宽了线性动态范围。

参 考 文 献

- 1 Smith A. M., *Appl. Opt.*, **17**, 52 (1978)
- 2 杨雪郁 *eta al.*, *中国激光*, **14** (5), 308~312 (1987)

(收稿日期: 1987 年 3 月 24 日)

KRS-5 多晶光纤研制及 $10.6 \mu\text{m}$ 损耗

王风云 侯印春 权宁三 王人淑 钟鹤裕

(中国科学院上海光机所)

Loss of polycrystalline KRS-5 fiber at $10.6 \mu\text{m}$

Wang Fengyun, Hou Yinchun, Quan Ningsan, Wang Renshu, Zhong Heyü
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: Polycrystalline fiber KRS-5 with $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ in diameter and up to 10 meters long have been prepared by an extrusion method. The effects of fiber length and the features of fiber end on the measured value of fiber loss are studied. After comparing the losses of KRS-5 fibers prepared in different conditions, possible ways to further reduce the fiber are briefly discussed.

一、引 言

目前, CO_2 激光传能光纤的研制已受到了人们的普遍重视。一些重金属卤化物, 特别是 KRS-5 晶体 ($\text{TlBr} + \text{TlI}$ 混晶), 作为红外光学材料, 早为人们所熟知。KRS-5 晶体透射波长范围 $0.5 \sim 40 \mu\text{m}$, 不易潮解。制成光纤的可挠性好, 适于传输高功率 CO 和 CO_2 激光, 被认为是一种很有希望的材料。已用 KRS-5 晶体制成了多晶光纤^[1], 并试用激光加工和激光手术器件中^[2, 3]。

KRS-5 晶体光纤, $6 \mu\text{m}$ 附近的理论最低损耗

为 10^{-3} dB/km , 比石英光纤的理论最低损耗值小两个数量级。在 $10.6 \mu\text{m}$ 理论损耗值为 10^{-1} dB/km ^[4]。目前所获得的多晶光纤 $10.6 \mu\text{m}$ 最低损耗为 $2 \times 10^2 \text{ dB/km}$ ^[2], 单晶光纤^[5, 6]为 $4 \times 10^2 \text{ dB/km}$, 比理论值高三个数量级以上。为了监视和评定 KRS-5 多晶光纤质量, 为改善光纤制作工艺提供依据, 需正确测量并分析光纤在 $10.6 \mu\text{m}$ 处的损耗。

二、实验及结果

KRS-5 多晶光纤的制作工艺和质量评定过程如下: 将 TlBr 和 TlI 粉末按一定比例混合均匀后装

入硬质玻璃或石英坩埚中,用 Bridgman 法生长晶体,生长速度 1.5~3mm/h,晶体直径 10~30mm。生长气氛为空气、流通 Ar 气或流通 Ar+I₂ 混合气体。采用保护性气氛和还原性气氛(RAP 法)是为了减少晶体中含氧阴离子杂质,含氧阴离子团在近红外和中红外波段往往具有特征吸收,从而造成红外光纤的附加吸收损耗。为了减少晶体中有害阳离子杂质,还采用过二次或三次重复结晶工艺。

将生长出的 KRS-5 单晶加工成所需尺寸的预成型晶段,置于压模中,在 250~300°C、4~10 t/cm² 压力下挤压,获得 0.5~1mm 直径,长数米的多晶 KRS-5 光纤。光纤直径由模孔决定,晶粒大小由模具温度和挤压速度决定,在本实验条件下,晶粒尺寸一般为 30~70 μm。

光纤损耗测量在图 1 所示的装置内进行。光源用 CW 6W 单模 CO₂ 激光器,光束直径约 2mm,发散角小于 3mrad。将光束用斩波器调制成约 80 Hz 的光脉冲,输至待测光纤的输入端。用热释电红外探测器接收,在示波器和数字电压表上显示。为了监视 CO₂ 激光器的输出功率,在入射端放置半透片,用功率计测量并监视入射激光能量。

测量采用剪断法,即将一根光纤剪短,分别读出剪断前后的输出电压信号 V₁ 和 V₂。因为工作区选在热释电探测器的线性范围内,所以光纤损耗可由下式算出。

$$\alpha = \frac{10}{l} \lg \frac{V_2}{V_1} \quad (1)$$

式中 l 为剪断光纤长度。

实验结果如下:

(1) 将一根长 1.5m 的光纤逐步剪断,分别测出各段的损耗,结果示于图 2(a) 中。由图 2(a) 可以看出,当待测光纤逐步剪短时,光纤损耗测定值增大。从最初的 5 dB/m (1.3m 处) 增加到 30 dB/m

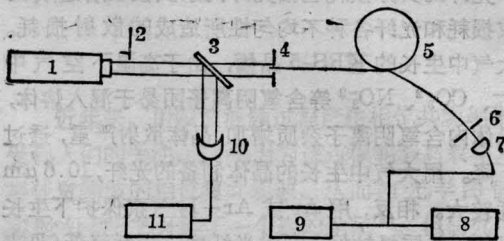


图 1 光纤损耗测量装置

- 1—CO₂ 激光器; 2—调制栅; 3—分光板; 4—小孔;
5—待测光纤; 6—光阑; 7—热释电接收器; 8—数字电压表; 9—示波器; 10—碳斗功率计; 11—显示器

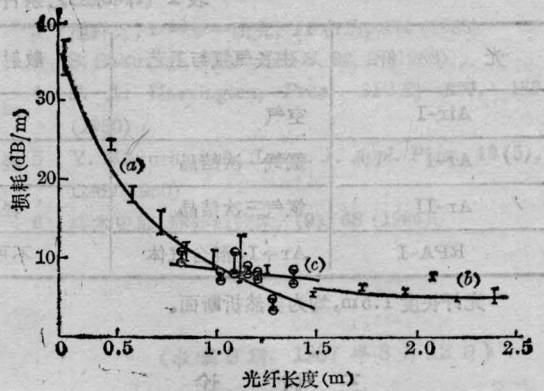


图 2 光纤损耗测量值

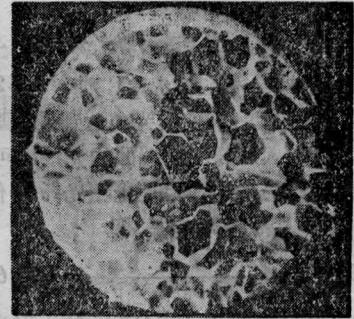


图 3 光纤端面电子显微镜照像(130×)

(0.3m 处)。但是,正如图 2(b) 所示,当光纤达到一定长度时,其损耗测定值趋于一常数。实验中发现,趋于平衡时的长度,与光纤质量、光纤端面状态有关,一般大于 1.5m。

图 2(a) 和 (b) 所用光纤的入射端面为自然断裂面,光纤端面由几微米到几十微米的晶粒组成(见图 3)。光纤端面经研磨抛光后则成为一光滑平面。将一根入射端面为光滑平面的光纤逐步剪短并测量各段损耗值,其结果示于图 2(c)。由图 2(c) 可知,入射端面为光滑平面的光纤损耗测量值与光纤长度的关系不大。应指出,在相同条件下,端面抛光过的光纤输出的电压信号比自然折断光纤大一个数量级。

(2) 在不同气氛条件下生长 KRS-5 晶体,用 7mW He-Ne 激光定性观察晶体内散射。分别从晶体内切出预成型晶段并热压成纤,在尽可能相同条件下测量光纤损耗,其结果列于表 1。由表 1 可见,大气中生长的晶体散射严重,成纤后光纤损耗较大。用 Ar 气或 Ar+I₂ 生长晶体散射较少,成纤后光纤损耗较小,但是还原气氛 I₂ 的作用不明显,用重复结晶也未收到明显效果,关于这方面的实验仍在继续进行之中。

表1 不同工艺条件下制备的光纤的损耗值*

光 纤	生长气氛与工艺	散射情况	透射光谱	
			9 μm 处有吸收峰	10.6 μm 损耗 dB/m
Air-I	空气	严重	9 μm 处有吸收峰	1.1±0.5
Ar-I	氩气一次结晶	轻微	—	2±0.5
Ar-II	氩气三次结晶	轻微	—	1.8±0.5
RPA-I	Ar+I ₂ 混合气体	不可见	—	1.7±0.5

* 光纤长度 1.5m, 均为自然折断面。

三、讨 论

KRS-5 晶体的折射率 $n_1=2.37$, 无包层的 KRS-5 多晶光纤的数值孔径

$$NA = (n_1^2 - n_0^2)^{1/2} \quad (2)$$

式中 n_0 为空气折射率。取 $n_0=1$, 则 $NA=2.15$ 。由于 $NA>1$, 原则上说, 即使受光角达到最大可能的角度 90° 时, 所有入射到光纤端面的光线均可经光纤内部传播到光纤另一端。但是光在光纤内传播时, 光路长度 P 与入射角 θ_0 有关, 即

$$P(\theta_0) = \frac{L}{[1 - (\sin\theta_0/n_1)^2]^{1/2}} = L \sec\theta_1 \quad (3)$$

式中 L 为光纤总长度, θ_1 为对应 θ_0 的入射光线在光纤内传播时与光纤轴线间夹角。当入射端面为理想平面时, θ_0 可近似取作激光束的发散角, 即 $\theta_0=3$ mrad, 则 $P(\theta_0) \approx L$ 。但是, 入射端面为多晶断裂面时, 情形就不同了。设一束平行光入射到一个如图 4 所示的立方小晶粒上, 则折射进入光纤的光线与光纤轴线间夹角 $\theta_1=27.6^\circ$, 此时光路长 $P(\theta_1=27.6^\circ)=1.13L$ 。因此, 光纤入射端面不平整, 将增加光路长度, 带来附加损耗。

另外, 光在光纤内以全反射方式传播时, 全反射次数 N 与 θ_1 角有关, 即,

$$N = \frac{L}{d} \tan\theta_1 \quad (4)$$

式中 d 为光纤直径。若取 $L=1.5$ m, $d=0.5$ mm,

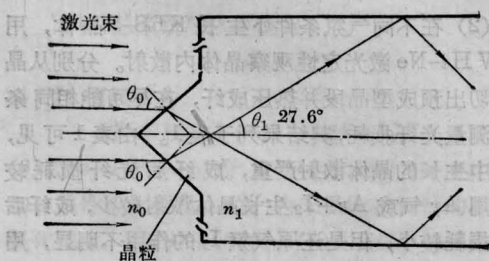


图4 平行激光入射到晶粒上的情形

则 $N(\theta_1=27.6^\circ) \approx 1600$ 次。只要 $\theta_1>1^\circ$, 全反射次数将超过 100 次。由于热压多晶光纤表面存在晶粒间界、划痕、表面沾污和包裹体等缺陷, 光在光纤表面反射时将产生损耗。若每次反射后剩余光量为 $\eta=0.98$, 经 100 次全反射后, 剩余光量 $\eta^{100}=0.1$ 。可见, 只要光在光纤表面处的全反射损耗达到 2% 左右, 几乎所有在光纤内传播的高次模光线, 将由于表面全反射损耗而无法传输至很长的距离。

综上所述, 光纤入射端面不光滑, 将使入射到光纤内光的模次增加, 这不但增加了光路长度, 引起附加的吸收与散射损耗, 更重要的是大大增加了光在光纤内的全反射次数, 从而增加了全反射损耗。显然, 待测光纤越短, 入射端面不平整对损耗测定值的影响越严重, 正如图 2(a) 所示。当光纤加长到一定长度之后, 几乎所有高次模光线全部损耗殆尽, 达到平衡状态, 此时, 在光纤内传播的只是少数几个低次模光线。在平衡状态下用剪断法测量光纤损耗则比较接近光纤的实际损耗(见图 2(b))。当光纤入射端面加工成光滑表面时, 入射角可近似取作激光束发散角, 即 $\theta_0=3$ mrad。传输 2.5 m 长, 全反射次数为 15 次。用端面光滑的较短光纤测量光纤损耗时, 所得结果也应当与光纤的实际损耗相接近, 这已为图 2(c) 所证实。

光纤的实际损耗包括光纤内杂质吸收所造成的吸收损耗和光纤各种不均匀性所造成的散射损耗。在大气中生长的 KRS-5 晶体, 由于高温下空气中 OH⁻、CO₃²⁻、NO₃²⁻ 等含氧阴离子团易于混入熔体, 使晶体内含氧阴离子杂质增加, 晶体散射严重, 透过率下降。用大气中生长的晶体制备的光纤, 10.6 μm 损耗较大。相反, 用 Ar 或 Ar+I₂ 气氛保护下生长的晶体, 其质量较好, 制成光纤后, 损耗降低(见表 1)。但是 I₂ 的反应效果不明显, 这可能是在温度(约 450°C)下使用, I₂ 的离化度低, 或者是在只通过熔体表面进行反应, 由于坩埚内熔体对流缓慢而反应不充分。另外, 重复结晶的效果也不明显, 这似乎

可以认为阳离子杂质对光纤损耗的影响并不十分重要。应进一步改善晶体生长条件,获得透明度高、散射少的优质晶体,改善压纤工艺和压纤环境,获得表面缺陷少、无沾污的光纤,则 KRS-5 多晶光纤的损耗将会进一步降低。

该课题为 85 年中国科学院基金项目,光纤端面电子显微镜照片为王浩炳同志提供,光纤端面加工由郑连生同志完成。在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 D. A. Pinnov *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1),

- 28(1978)
- 2 池戸才,レーザー研究, **11** (11), 834 (1983)
- 3 S. Sakuragi, *Proc. SPIE*, **32**, 2 (1982)
- 4 J. A. Harrington, *Proc. SPIE*, **227**, 133 (1980)
- 5 Y. Mimura *et al.*, *Japan. J. Appl. Phys.*, **19** (5), L269(1980)
- 6 桜木史郎,赤外線技术, (9), 48 (1984)

(收稿日期: 1987 年 8 月 12 日)

用微扰近似理论研究简并四波混频过程中的相位畸变现象

赵明君 李育林

(中国科学院西安光机所)

Study on phase distortion in degenerate four-wave mixing by means of perturbation approximation theory

Zhao Mingjun Li Yulin

(Xian Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Xian)

Abstract: A perturbation approximation theory is used for analysis of phase distortion in degenerate four-wave mixing. It is seen from the calculation result that an important way of increasing the readout wave's ratio of signal to noise (s/n) is to reduce the resultant distortion ϕ of other wave's.

一、引 言

近年来,用四波混频过程产生相位共轭越来越受到人们的关注,这是因为该过程能够高效率地获得任意物波的相位复共轭波,从而为光学图像的实时处理^[1~3]开辟了一个新的途径^[4]。但研究中大都认为在非线性介质中,参与混频的各波是理想的平面偏振波。实际上激光源产生的光波并非是完全的平面偏振波,加之,整个光学系统也不理想,不可避免地产生一定的畸变效应。此外在四波混频的实验中,很难保证两束泵浦波理想对准。故导致读出

光波中存在着一一定的畸变(称为背景噪声),它有时很严重,甚至在接收屏上难以分辨信息。

关于这个问题,文献[6]曾作过初步的分析,但是繁琐,物理意义也不明显。本文提出了一种微扰简化的近似模型,讨论了简并四波混频过程中各个入射波的相位畸变(或称噪声)对读出光波的影响,给出了一些有意义的结论。

二、用微扰近似理论处理相位畸变引起的噪声

如图 1 所示, E_1 、 E_2 是一对泵浦波; E_3 是信号