

Nd:YAG 单晶光纤光学特性研究*

张松斌 丁祖昌 董绵豫 周斌和 童利民
(浙江大学物理系, 杭州 310027)

提 要

本文测量了用激光加热基座法制成的 Nd:YAG 单晶光纤(具有块状晶体)的吸收谱线, 荧光谱线等光谱学特性。根据测得的散射特性分析了用该法制成的单晶光纤的生长缺陷和直径波动及其与单晶光纤质量的关系。

关键词: 单晶光纤、光学特性、生长缺陷。

一、引 言

自 1975 年 Burrus 和 Stone^[1]首先采用激光加热基座法生长出 Nd:YAG 单晶光纤以来, Nd:YAG 单晶光纤被广泛应用于制作光学器件, 如 Nd:YAG 脉冲放大器、连续 Nd:YAG 光纤振荡器和 Nd:YAG 光纤温度传感器^[2]。其中 Nd:YAG 单晶光纤激光器的研究更为广泛。Burrus 等^[3~6]先后研制出波长为 $1.06\mu\text{m}$ 和 $1.3\mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 单晶光纤激光器。Nightingale 和 Byer^[7]也报道了一种整体式 Nd:YAG 光纤激光器。

大块 Nd:YAG 激光工作物质的光学性质研究已有较多报道^[8~9]。可是测定大块 Nd:YAG 晶体吸收光谱, 荧光光谱和散射损耗的方法难以用来测定单晶光纤的光学性质。本文采用自建的单晶光纤光学特性专门测量装置^[10]测量了 Nd:YAG 单晶光纤的吸收谱, 荧光光谱及散射位置谱, 并分析了激光加热基座法生长引起的散射特性。

二、实验装置及方法

图 1 为自建的测量单晶光纤吸收光谱, 荧光光谱, 散射光谱以及沿光纤长度的散射位置谱的实验装置。

吸收光谱和散射损耗的测量: 用 L_2 可调谐的宽带光源经聚焦注入单晶光纤的端面。分别由 D_1 和 D_2 接收器测得透过光强和散射光强。

荧光光谱的测量: 用 3WCuBr 脉冲激光器 L_1 作为激励光源。激励波长为 578.2nm 和 510.6nm , 经聚焦照射到单晶光纤侧面, 从单晶光纤端面输出的荧光和原激励光通过单色仪, 再由 D_1 接收器探测。

由探测器输出的信号经程控锁相放大器 A 处理后, 通过 A/D 卡转换被 IBM-PC 微机采集, 处理, 打印输出谱图。

收稿日期: 1991年2月4日; 收到修改稿日期: 1991年4月24日

* 本工作得到国家自然科学基金的资助。

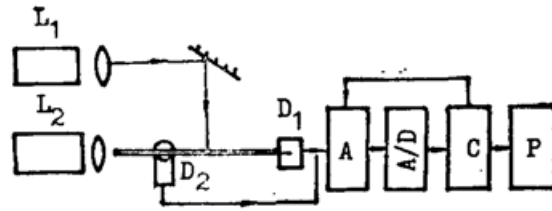


Fig. 1. SCF measurement set and data handling system
 L_1 —CuBr laser L_2 —tunable lamp D_1 —photomultiplier D_2 —
 photomultiplier with integrating sphere A —digital control
 lock-in amplifier C —computer P —printer

本装置能够由微机自动地控制光源 L_2 的调谐, 控制 D_2 沿光纤长度方向移动以及控制锁相放大器 A 自动量程转换。同时实现数据自动采集处理, 提高了测量精度。由于探测器的限制, 测量光谱的范围是 200 nm 至 1150 nm。本装置可以实现同时测量吸收和散射损耗。

样品处理: 测量之前样品光纤两端面首先经过抛光, 然后用酒精擦洗两端面和侧面。

三、实验结果

1. Nd:YAG 单晶光纤吸收光谱

图 2 为常温下 Nd:YAG 单晶光纤的吸收光谱, 从紫外至近红外波段内, 有 11 个吸收带, 分别对应于基态 $^4I_{9/2}$ 向高能级之间的跃迁。表 1 为 11 个吸收带处的吸收衰减, 及其相对应的能级跃迁。其中, 中心波长位于 $0.81 \mu\text{m}$, $0.75 \mu\text{m}$, $0.58 \mu\text{m}$ 和 $0.53 \mu\text{m}$ 的四个吸收带吸收较强, 测量结果与文献[8、9]报道的光谱线基本是一致的。说明晶纤与大块晶体具有基本一致的吸收光谱。

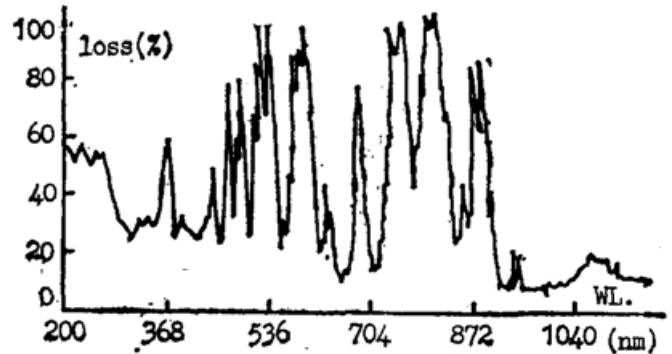


Fig. 2 Room-temperature absorption spectrum of Nd:YAG SCF

2. Nd:YAG 单晶光纤的荧光光谱

受激励的 Nd:YAG 晶体中的 Nd^{3+}

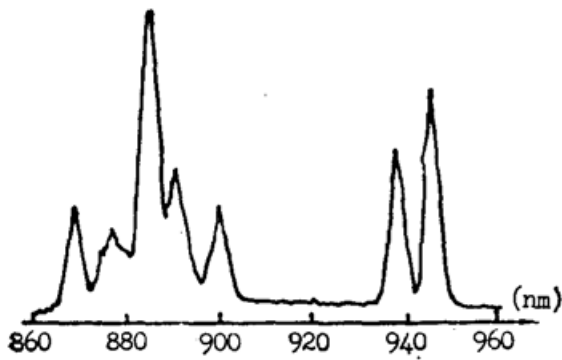
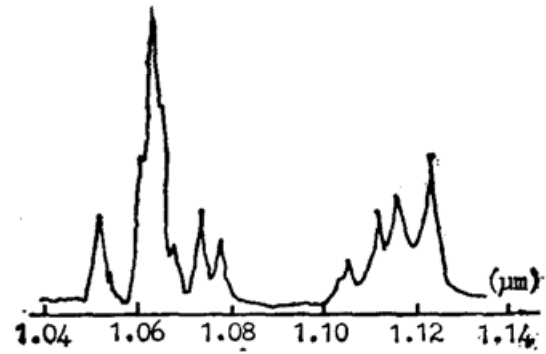
无辐射地跃迁至亚稳态 $^4F_{3/2}$, 亚稳态 $^4F_{3/2}$ 向下面 4I 多重态斯塔克能级跃迁产生荧光。图 3 和图 4 为常温下由亚稳态 $^4F_{3/2}$ 向 $^4I_{9/2}$ 和 $^4I_{11/2}$ 跃迁的荧光光谱。表 2 列出了荧光光谱对应的峰值波长, 为比较起见, 表中还列出文献[9]中大块 Nd:YAG 晶体对应的发射波长。实验表明单晶光纤具有与大块晶体相同的荧光谱线并且同样在 $1.06 \mu\text{m}$ 附近有强的荧光发射。

3. Nd:YAG 单晶光纤散射位置谱

图 5 为 1^* 与 2^* 光纤沿晶纤方向的散射位置谱。由图可见同一根单晶光纤各部分散射损耗是不同的, 并且损耗值相差较大。图中还可见晶纤头部散射损耗相对尾部要小。

Table 1 Results of the absorption measurements and transition of energy levels

Wavelength(μm)	absorption Loss(dB/cm)	Transition of Energy level
0.87	0.76	$^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$
0.81	2.52	$^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$
0.75	3.0	$^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$
0.68	0.64	$^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$
0.63	0.29	$^4I_{9/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$
0.58	2.22	$^4I_{9/2} \rightarrow ^2G_{7/2} + ^4G_{5/2}$
0.53	2.1	$^4I_{9/2} \rightarrow ^2G_{9/2} + ^2K_{13/2} + ^3G_{7/2}$
0.48	0.57	$^4I_{9/2} \rightarrow ^4G_{9/2} + ^4G_{11/2}$
0.45	0.54	$^4I_{9/2} \rightarrow ^2K_{15/2} + ^2D_{3/2}$
0.43	0.28	$^4I_{9/2} \rightarrow ^2P_{1/2} + ^2D_{5/2}$
0.36	0.40	$^4I_{9/2} \rightarrow ^2P_{3/2} + ^4D_{3/2}$

Fig. 3 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ fluorescence spectrum of Nd^{3+} in YAG SCFFig. 4 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ fluorescence spectrum of Nd^{3+} in YAG SCFTable. 2 Wavelength of fluorescence lines for Nd^{3+} in YAG SCF and bulk crystal

$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$		$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	
Wavelength of SCF(nm)	Wavelength of bulk crystal ^[9]	Wavelength of SCF(nm)	Wavelength of bulk crystal ^[9]
868.8	8688	1051.8	{10515
875.0	8757		{10546
879.0	8790	1063.9	10618
884.6	{8839		10638
	{8861		10650
890.8	{8911	1067.8	10678
	{8929	1073.4	10743
900.2	9003	1077.7	10784
938.0	9378	1105.2	11004
945.7	9459	1112.2	11113
		1116.0	11178
		1122.4	11245

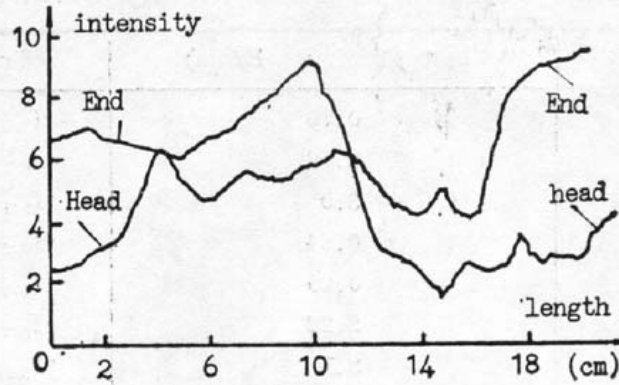


Fig. 5 Scattering loss as a function of position for 1* and 2* Nd:YAG SCF

四、讨 论

1. 晶体不同部位的散射

为了弄清单晶光纤散射损耗的来源,可以在高倍金相显微镜下仔细观察同一根单晶光纤各部分的形貌。图6为同一根单晶光纤生长头部和尾部的金相显微镜照片。由照片可见头部质量明显优于尾部,头部光纤透明无缺陷,而尾部中心处有沿生长方向的条纹,并且有少量散射颗粒。同时可观察到尾部晶纤直径波动比头部晶纤厉害。

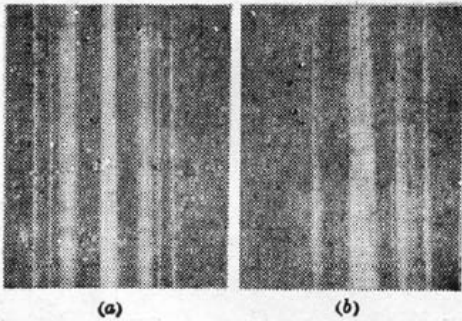


Fig. 6 Photograph of the Nd:YAG SCF
(a) Head (b) End



Fig. 7 Photograph of the 1* Nd:YAG SCF (100 mm)

文献[11~14]对激光加热基座法生长规律进行了大量研究。指出该法生长单晶光纤类似于区熔生长过程,对于分凝系数小于1的杂质生长过程是一个排杂过程,随着晶纤生长,熔区的杂质浓度越来越高,导致尾部晶纤中缺陷增多。同时生长到尾部时,系统的抖动也得到放大。导致直径波动也较头部厉害。这就是头部散射损耗比尾部小的原因。

2. 散射损耗产生的原因

为了弄清图51*光纤10cm附近处强散射,用金相显微镜观察发现光纤在此处有急剧的直径波动,并且产生了弯曲。图7是该处的显微照片。这是由于拉制过程中,拉速或送速突然变化^[1]或激光束位置偏离进行调整造成生长平衡状态被破坏,导致生长不稳,引起直径的变化。

在用金相显微镜仔细观察晶纤时,还能观察到晶纤存在一些散射颗粒和表面缺陷。为了能清楚地观察到晶纤表面的附着物。图8为在扫描电镜(SEM)下观察到的Nd:YAG单

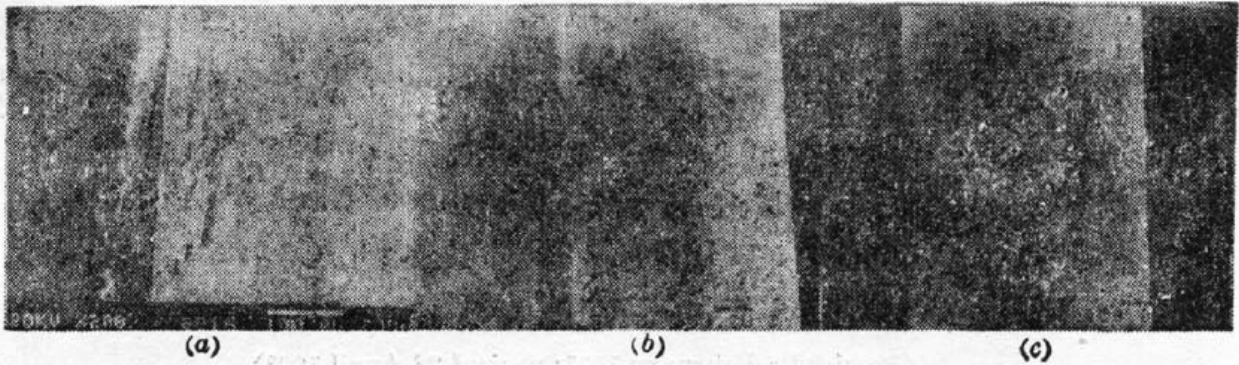


Fig. 8 Surface morphology of Nd:YAG SCF by SEM

晶光纤表面不同附着物的扫描电镜像。可见直径波动,表面缺陷,散射颗粒是产生光纤散射损耗的重要原因。

在制作激光器件时,Nd:YAG 单晶光纤生长缺陷,直径波动引起的散射损耗,严重影响光纤激光器的阈值和效率。实际应用晶纤制作光学器件时,使用 Nd:YAG 晶纤长度只需 10 mm 左右,因此,测量散射位置谱有利于选择低损耗,高质量的晶纤。

参 考 文 献

- [1] C. A. Burrus, J. Stone; *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**, No. 6(Mar), 318.
- [2] K. T. V. Gratten *et al.*; *IEE Proc.*, 1987, **134**, No. 5(Oct), 291.
- [3] C. A. Burrus *et al.*; *Electronics Lett.*, 1976, **12**, No. 22 (Oct), 600.
- [4] C. A. Burrus, B. I. Miller; *Opt. Commun.*, 1971, **4**, No. 4(Dec), 307.
- [5] J. Stone *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **29**, No. 1 (Jul), 37.
- [6] J. Stone, C. A. Burrus; *Fiber & Integrated Opt.*, 1979, **2**, No. 1(Jan), 19.
- [7] J. I. Nightingale, R. L. Byer; *Opt. Lett.*, 1986, **11**, No. 7(Jul), 137.
- [8] J. A. Koningstein; *J. Chem. Phys.*, 1966, **44**, No. 10 (May), 3957.
- [9] J. A. Koningstein; *Phys. Rev. (A)*, 1964, **136A**, No. 3 (Nov), 711.
- [10] 董绵豫等;《光学学报》,1991, **11**, No. 7 (Jul), 660~664。
- [11] 陈继勤等;《浙江大学学报》,1990, **24**, No. 4 (Jul), 622。
- [12] 卢子宏等;《硅酸盐学报》,1990, **18**, No. 3 (Jun), 262。
- [13] 陈溪芳等;《人工晶体学报》,1990, **19**, No. 3 (Aug), 235。
- [14] 卢子宏等;《人工晶体学报》,1989, **18**, No. 4(Dec), 293。

Study on optical properties of Nd:YAG single-crystal optical fiber

ZHANG SONGBIN, DING ZUCHANG, DONG MIANYU,

ZHOU BINHE AND TONG LIMIN

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 4 February 1991; revised 24 April 1991)

Abstract

This paper presents the absorption spectrum, fluorescent spectrum and scattering characteristic of Nd:YAG single-crystal optical fiber (SCF). The measured results indicate that the Nd:YAG SCF grown up by means of LHPG method is conformity with the bulk crystal in the properties such as absorption spectrum, fluorescent spectrum. The defects and diameter variations of the SCF are also analysed.

Key words: single-crystal optical fiber, optical feature, defect.