

Nd:YAG 单晶光纤荧光特性的研究¹⁾

孙 平

M. J. F. DIGONNET

(清华大学无线电系)

(美国 Litton 公司)

1987 年 12 月 29 日收到

本文对 Nd:YAG 单晶光纤的荧光发射特性做了实验研究。用 MPG (Miniature Pedestal Growth) 单晶生长工艺制备的直径为 41 至 120 微米、直径波动在 0.5% 范围内的具有不同包层的四根光纤和一根细棒为样品,在 0.6 微米 300 毫瓦的泵浦激励下测试了它们在 1.06 微米的荧光发射放大特性,分析预示了超荧光发生的条件和可能。

引 言

由于单晶光纤 MPG 生长工艺设备的研制成功和日益改进完善,使多种高熔点单晶材料拉制成精细的光纤成为现实。红宝石、蓝宝石和 Nd:YAG 以及 LiNbO₃ 等光纤问世以来受到越来越多的关注。这些光纤兼备单晶材料和导波特性的特点。除了高熔点、抗腐蚀性等外,晶体的非线性光学特性及光纤中能达到的高光强、高效率的导波特性的特点使单晶光纤成为光纤系统中具有生命力的小型元件材料^[1],可用来制成各类调制器、谐振器、放大器及光源等器件^[2,3],满足光传输、处理和传感等系统中的特定要求。

目前一些无源光纤元件如相调器、相控器、耦合器及波分复用等器件已得到了广泛应用。单晶光纤制成有源器件就能替代非光纤元件从而实现小型化结构的全光纤系统,完成越来越多的功能。这种系统能明显减小光学系统中的损耗、不稳定性 and 元件准直对接等种种复杂问题。

Nd:YAG 单晶光纤是作小型激光振荡器和放大器的材料。在获得高质量生长的精细光纤之后,便开展了对其荧光发射特性的研究,并探究其超荧光发生的可能和途径。

实 验 方 法

1. Nd:YAG 单晶光纤生长

采用 MPG 生长单晶光纤的设备获得 Nd:YAG 光纤^[4,5]。单晶生长如图 1 所示。15 瓦 CO₂ 激光束通过一组镀金反射镜聚焦成直径为 30 微米的光点,对熔融区加热,温度可高达 2000℃ 以上。通过电光调制器使输出动态范围达 100:1。子晶和原棒料均分别由两微型马达带动夹持它们的皮带使之上下移动,它们各自的速度由直径变比确定,保持锥形熔区的位置不变。除光学系统和传动装置外,又有光纤直径测量和控制系统对生长过

1) 本工作是在美国 Stanford 大学完成的。

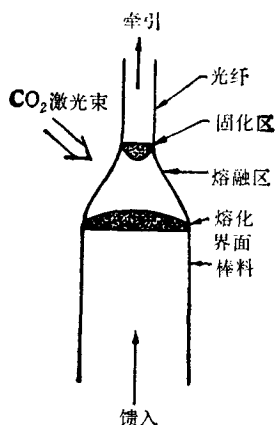


图1 光纤生长

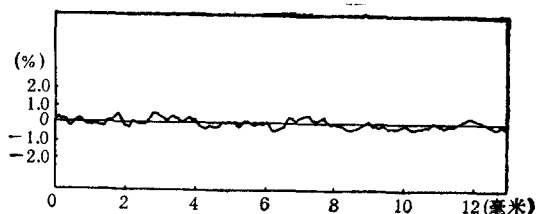


图2 Y-106 光纤直径随长度的波动

程进行监控^[5]。

用直径为 400—450 微米的 Nd:YAG 棒料经过两次直径变比为 1:3 的生长,便可获得直径 45 微米左右的光纤。图 2 是一根标号 Y-106 光纤生长的实时记录,可以看到在 13 毫米长度内,直径波动最大不超过 0.48%。

2. Nd:YAG 单晶荧光特性的测试

实验装置如图 3 所示。通过测试光纤被激励后荧光发射的斜率效率来观察在 1.06 微米的荧光特性。

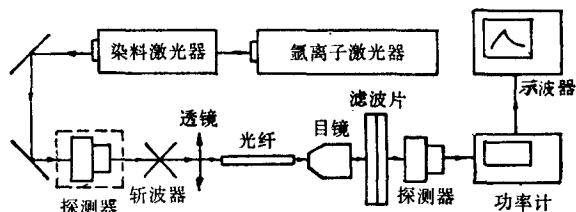


图3 实验测试框图

用 0.5145 微米连续波氩离子激光器泵浦 0.6 微米染料激光器,输出 200—300 毫瓦光束,光束通过透镜聚焦准直激发 Nd:YAG 光纤。斩波器是为避免光纤热损耗并获得荧光信号的动态特性而采用的。滤波片用来将荧光信号和泵浦剩余信号分离,其波长在 0.850 至 1.100 微米范围。光纤固定在调节架上,由一目镜集光并将输出荧光信号送入探测器后由功率计或示波器读出。

为了将测出的 1.06 微米和 0.91 微米信号相分离,先用单色仪进行波长扫描,测得 0.860 至 1.090 微米的荧光光谱,光谱仪狭缝为 0.05 毫米,分辨率为 2 毫微米,每波长携带功率正比光谱线上所对应的面积,再根据所用探测器波长响应灵敏度就可以分离出 1.06 微米信号成分,并找到此波长下的输出斜率效率 $S_{1.06}(\%)$ 和总输出斜率效率 $S_t(\%)$ 的关系。

$$S_t = P_i / P_{abs} (\%), \quad (1)$$

其中 P_t 是总输出, P_{abs} 是光纤吸收功率。

为了得到泵浦和荧光信号的最佳互作用,尽可能使入射光纤中激励起低阶模,基模

LP_{01} 是最理想的,这对于透镜和光纤入射条件提出了特定要求。

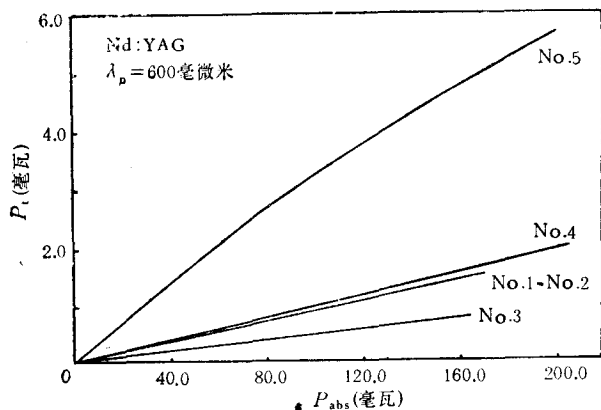


图4 输出荧光功率随吸收泵功率的变化

实 验 结 果

前后对一根 3 毫米直径的 Nd:YAG 细棒和四根直径为 120 至 41 微米的光纤作了测试。这些样品分别有空气、环氧树脂、金和玻璃制成的包层,具有不同长度 L 。测试特性参数列在表 1 中,表 1 中 T_x , P_{abs} 和 $P_{p,inc}$ 分别表示光纤的传输系数、吸收和入射功率。可以看到有玻璃包层的 41 微米的 No. 5 光纤有明显增高的斜率效率,

达到 $S_{1.06}=1.95\%$ 。图 4 表示五个样品的荧光输出信号随吸收泵功率变化的曲线。它们基本上都呈线性,随着光纤直径减小,除了包层为金的以外相应的斜率效率有上升趋势。

表 1 样品测试结果

No.	ϕ (微米)	l (毫米)	包 层	T_x	$P_{abs}/P_{p,inc}$	$S_t(\%)$	$S_{1.06}(\%)$
1	3000(∞)	8.3	/	0.024	0.82	0.91	0.54
2	120	7.5	环氧树脂	0.034	0.82	0.95	0.56
3	48	6.0	金	0.067	0.79	0.51	0.30
4	45	5.3	环氧树脂	0.092	0.76	1.00	0.59
5	41	4.0	玻璃	0.165	0.71	3.3	1.95

讨 论

以 No. 5 光纤为例,其可能存在的导波模式数为

$$N \approx \frac{4}{\pi} V^2 \approx 1000. \quad (2)$$

其中 V 是光纤在 1.06 微米波长下的归一化频率。对那些包层折射率较低的光纤,模式就更多。如果有合适的激励条件,则基模、低阶模就可以通过模式耦合获得比高阶模高得多的增益^[3],而将高阶模抑制下去,输出出现随泵浦功率增高的指数增长。

从增益公式看

$$g = (\sigma\tau_f/h\nu_p)(P_{abs}/A_p^*), \quad (3)$$

$$A_p^* = A/F. \quad (4)$$

其中 σ , τ_f , A , $h\nu_p$ 和 F 分别是激发截面,荧光光子寿命,光纤截面,泵浦光子能量和耦合系数, A_p^* 定义为有效泵浦面积。由此可以得到 No. 5 光纤的增益在取最大泵浦功率 ($P_{abs} = 200$ 毫瓦) 激励下为 31 dB, 远高出理论预示的 20 dB 的超荧光阈值。实验中得到了较大的荧光放大而没有出现明显的超荧光现象^[6], 分析认为光纤被激励的模式中含有众多高阶模,耦合系数 F 较小, 近于 1。探测器截获功率对其接受立体角的关系由实验确定是近似线性的,说明事实上确实有很多高阶模混杂其中。

在低于超荧光阈值的线性区, S_t 可以表示为

$$S_t = P_t/P_{abs} = (h\nu_s/h\nu_p)(Q^+/4\pi). \quad (5)$$

其中 $h\nu_p$ 和 $h\nu_s$ 分别是泵浦和信号光子能量. 对 No. 5 光纤立体角 $Q^+ = 0.58$, $S_t = 2.8\%$, 这个值和所测结果 3.3% 相近, 可见 No. 5 光纤和其它光纤均工作在线性区.

No. 3 光纤 S_t 值低是因为金包层增加了对导模的传输损耗, 而 No. 5 获得高的 S_t 主要是由于光纤具有折射率匹配的玻璃包层, 虽然它显示了近均匀的模式分布, 但实际上对于高阶模的损耗要大些.

结 论

1. 随着光纤直径减小, 有较小的但十分明显的斜率效率的上升趋势, 可以解释为光纤中有一定程度的荧光信号放大. 然而输出的线性特征说明了光纤元件没有工作在超荧光区, 但功率输出很大, 在所取最大激励条件 No. 5 光纤在 1.06 微米波长上输出 3.3 毫瓦.

2. 对于有折射率匹配包层的光纤, 比其它光纤有高得多的输出, 说明传输损耗是控制荧光功率的重要因素. No. 5 光纤的 S_t 和线性荧光理论是一致的.

3. 计算信号增益为 31 dB, 远在超荧光理论阈值之上, 但没有明显的超荧光现象, 推测信号增益实际上低于计算值, 原因是未能获得光纤最佳信号激励.

为获得超荧光放大, 进一步减小单晶光纤的直径是根本措施, 这就对光纤生长技术、设备提出了更高要求. 另外减小光纤的传输损耗, 除了生长过程中减小它的直径波动外, 需要在光纤上生长折射率匹配的(诸如玻璃等)包层. 最后是泵浦模式质量的严格控制, 合适的光纤空间定向和光学耦合.

- [1] M. M. Fejer, J. L. Nightingale, G. A. Magel and R. L. Byer, *Proceeding of Guided Wave Optoelectronic Materials*, 460(1984), 26.
- [2] M. J. F. Digonnet and H. J. Shaw, Second European Conference on Integrated Optics, Firenze, Italy, (1983).
- [3] M. J. F. Digonnet and C. J. Gaeta, *Appl. Opt.*, 24(1985), 333.
- [4] M. M. Fejer, J. L. Nightingale, G. A. Magel, R. L. Byer, *Rev. Sci. Instrum.*, 55(1984), 1791.
- [5] M. M. Fejer, G. A. Magel, R. L. Byer, *Appl. Opt.*, 24(1985), 2362.
- [6] C. S. Wang, W. H. Cheng, C. J. Hwang, W. K. Burns, R. P. Moeller, *Appl. Phys. Lett.*, 41(1982), 587.

INVESTIGATION OF FLUORESCENT CHARACTERISTIC IN Nd:YAG SINGLE CRYSTAL FIBERS

SUN PING

M. J. F. DIGONNET

(Department of Radio Electronics, Tsinghua University)

(Litton System Incorporation U. S. A.)

ABSTRACT

The fluorescent characteristic in Nd: YAG single crystal fibers has been investigated. One rod and four claded fibers produced with MPG process were tested, of which the diameters ranged from 41 micron to 120 micron with variations less than 0.5%. Excited by 300 milliwatt power laser at 0.6 micron, the fluorescence amplification at 1.06 micron was observed. The analysis predicted the condition and capability of superfluorescence.