

# 光纤单程小信号增益的单光束测量技术

王 劼 陈一竑 程瑞华 沈红卫 干福熹

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 探讨了将 ASE 测增益技术应用到激活光纤的增益测量。根据建立的理论模型, 用计算机算得了光纤中的相对增益。

**关键词** 光纤单程增益, 增益测量

## 1 引 言

对于激光器件, 激活介质的增益特性是一个极重要的参数。激光的阈值、输出功率、斜率效率等都与增益特性有关, 因此增益的测量成为激光实验中的重要内容。从实验上看, 增益测量的最直接方法是双光束测量技术<sup>[1~3]</sup>, 即首先用一束光(泵浦光)将激活离子激发到激光的上能级, 形成粒子数反转状态, 再用另一束光(信号光)去扫描整个荧光带, 从而获得在不同波长区间的增益值。但实际上由于在某上波段上连续可调的信号源不易获得甚至于不存在, 因而很大程度上影响了这种方法的使用。W. T. Silfvast 和 J. S. Deech 首先提出了用放大的自发辐射(ASE)方法间接测增益技术<sup>[4]</sup>, 其后许多人进一步将这种方法应用到不同形态的激光材料中<sup>[5~7]</sup>, 但至今仍未看到将该技术应用到光纤激光器中的报道。一个重要原因是由于对于光纤器件, 泵浦光只能从光纤的某一端入射, 因而光纤的增益随位置而变。而在其他固体激光器中, 泵浦光可采用侧向泵浦, 这样介质的增益沿纵向是一个常数。本文将 ASE 间接测增益法用于光纤, 推出了光纤增益满足的方程, 并在实验上测量了光纤的增益谱。

## 2 理论分析

图 1 表示了 ASE 法测光纤增益的示意图。泵浦光从光纤的一端射入, 在距光纤出射端为  $P$  处为探测系统  $D$ 。单模增益在  $Z$  处的值为<sup>[8]</sup>

$$\gamma(\nu, z) = \frac{\sigma(\nu)\tau_f}{h\nu_p} \alpha_s P_p \exp[-(\alpha_s + \alpha_p)(L - Z)] \int_0^{\circ} \frac{2\pi r_p(r) S_1(r) r dr}{1 + \frac{2S_1(r)}{I_{sat}} [p^+(z) + p^-(z)]} \quad (1)$$

式中  $\sigma(\nu)$ ,  $\tau_f$  为激光离子的辐射截面和荧光寿命,  $\alpha_s$ ,  $\alpha_p$  为光纤对于泵浦光的吸收系数和损耗系数,  $r_p(r) S_1(r)$  为泵浦光和信号光的重迭部分,  $I_{sat}$  为饱和光强。在小信号情况下, 取近似  $p^+ + p^- \ll I_{sat}$ , 则有

$$\gamma(\nu, z) = \frac{\sigma \cdot \tau_f}{h\nu_p} \alpha_s P_p \exp[-(\alpha_s + \alpha_p)(L - Z)] \int_0^{\circ} 2\pi r_p(r) S_1(r) r dr \quad (2)$$

$$\text{令 } \gamma(\nu) = \frac{\sigma \cdot \tau_f}{h\nu} \alpha_a P_a \int_0^a 2\pi r_s(r) S_1(r) r dr$$

$$\text{则有 } \gamma(\nu, z) = \gamma(\nu) \exp[-(\alpha_a + \alpha_s)(L - Z)] \quad (2a)$$

考虑到实际光纤中  $\alpha_a \gg \alpha_s$ , 令  $\alpha = \alpha_a + \alpha_s \sim \alpha_a$ , 有

$$\gamma(\nu, z) = \gamma(\nu) \exp[-\alpha(L - Z)] \quad (2b)$$

因此只要求得  $\gamma(\nu)$ , 则可知道光纤内任一点的增益情况。

由于光纤的波导特性, 探测器  $D$  接收到的光强为

$$I_L(\nu) = C \int_0^L \frac{\exp[\int_0^z \gamma(\nu, z') dz']}{P^2} \quad (3)$$

式中  $C$  为与泵浦有关的常数。将(2b)代入(3)得

$$I_L(\nu) = \frac{C}{P^2} \frac{1}{\alpha} \int_1^{\exp(\alpha L)} \frac{\exp[A_L(x-1)]}{x} dx \quad (4)$$

式中  $A_L \triangleq [\gamma(\nu)/\alpha] \exp(-\alpha L)$ , 同理, 对长为  $L'$  的光纤有

$$I_{L'}(\nu) = \frac{C}{P^2} \frac{1}{\alpha} \int_1^{\exp(\alpha L')} \frac{\exp[A_{L'}(x-1)]}{x} dx \quad (5)$$

(4), (5)两式相除得

$$k(\nu) \triangleq \frac{I_L(\nu)}{I_{L'}(\nu)} = \frac{\int_1^{\exp(\alpha L)} \frac{\exp[A_L(x-1)]}{x} dx}{\int_1^{\exp(\alpha L')} \frac{\exp[A_{L'}(x-1)]}{x} dx} \quad (6)$$

(6)式给出了增益系数  $\gamma(\nu)$  与实验测量值  $k(\nu)$  之间的方程。通过解此方程可求得光纤的增益谱。

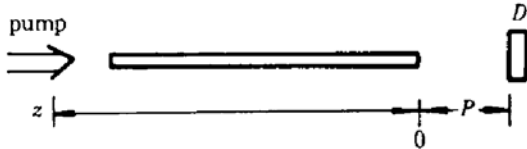


Fig. 1 Optical arrangement for gain measurements with the ASE technique. The length of fiber is  $L$ , and  $D$  is a detector system. The coordinate direction is opposite to that of the pumping light

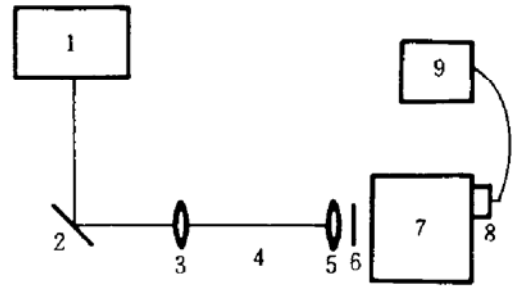


Fig. 2 The experiment setup

1; Ar-ion laser; 2; reflector; 3; microscopic objective; 4; fiber; 5; convergent lens; 6; filter; 7; monochromator; 8; photomultiplier tube; 9; x-y recorder

### 3 实验与结果

实验装置如图 2 所示。光纤为掺  $\text{Nd}^{3+}$  的单模石英光纤, 芯径  $4 \sim 5 \mu\text{m}$ , 在  $514.5 \text{ nm}$  处的吸收系数约为  $80 \text{ dB/m}$ , 在  $1080 \text{ nm}$  处的损耗系数约为  $20 \text{ dB/km}$ , 初始长度  $L = 974 \text{ m}$ 。泵浦源为 360 型 Ar 离子激光器, 泵浦光束经显微物镜会聚后耦合进光纤。光纤的出射光经过滤光片(HWB11)后进入单色仪(WDG-30 型, 分辨率  $\sim 0.1 \text{ nm}$ )。探测元件为 GDB-411 倍增管, 其输出由 x-y 记录仪记录。显然这套系统只能记录到增益谱的线型而无法确定增益的绝对数值。测量分为两步。首先记录下当光纤长为  $L$  时的荧光光谱。保持 Ar 离子激光器的输出功率和光纤

的耦合状态不变,截去  $\Delta L$  后记录长度为  $L'$  ( $L' = L - \Delta L = 565 \text{ mm}$ ) 的输出信号。为保证光纤的输出端在前后两次相对于探测系统的状态一致,实验中未使用通常的光纤架,而是使用了精密的 V 型槽固定光纤,这样在技术上保证了测量的可重复性。

在测量过程中,  $x$ - $y$  记录仪记录到的荧光曲线已受到探测系统的影响。在此,“探测系统”表示从会聚透镜 5 一直到倍增管 8。设该系统的响应曲线为  $g(\lambda)$ ,“真正的”荧光信号为  $I_{\text{real}}(\lambda)$ ,记录到的荧光曲线为  $I_{\text{rec}}(\lambda)$ ,则有

$$I_{\text{real}}(\lambda) = I_{\text{rec}}(\lambda)/g(\lambda) \quad (7)$$

将(7)代入(6)得

$$k(\lambda) = \frac{I_L^{\text{real}}(\lambda)}{I_{L'}^{\text{real}}(\lambda)} = \frac{I_L^{\text{rec}}(\lambda)/g_L(\lambda)}{I_{L'}^{\text{rec}}(\lambda)/g_{L'}(\lambda)}$$

由于两次测量均保持整个系统的状态不变,即  $g_L(\lambda) = g_{L'}(\lambda)$ ,故有

$$k(\lambda) = \frac{I_L^{\text{rec}}(\lambda)}{I_{L'}^{\text{rec}}(\lambda)} \quad (8)$$

此式表明,只要保证探测系统的状态不变,则系统的响应将不会影响增益的计算。

由于  $\text{Nd}^{3+}$  的 1080 nm 荧光带是四能级跃迁,易于实现粒子数反转,因此在实验中测量了 1080 nm 荧光的增益。图 3 给出了光纤为  $L = 974 \text{ mm}$  和  $L' = 565 \text{ mm}$  时记录下的荧光光谱。在计算增益时,每隔 6.2 nm 读数一次(在记录纸上对应 1 cm 的长度),计算出不同波长处的  $k(\lambda)$  值,输入计算机求方程(6)的根。图 4 是数值计算的结果。增益的最大值位于  $\lambda = 1063 \text{ nm}$  处,这与文献[9]报道的激光实验十分符合。当  $\lambda = 1084 \text{ nm}$  时,增益由正变为负。

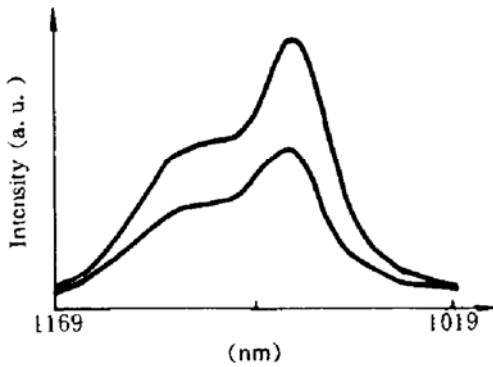


Fig. 3 The spectral emission intensities as a function of  $L$ .  
top:  $L = 974 \text{ mm}$ ; bottom:  $L = 565 \text{ mm}$

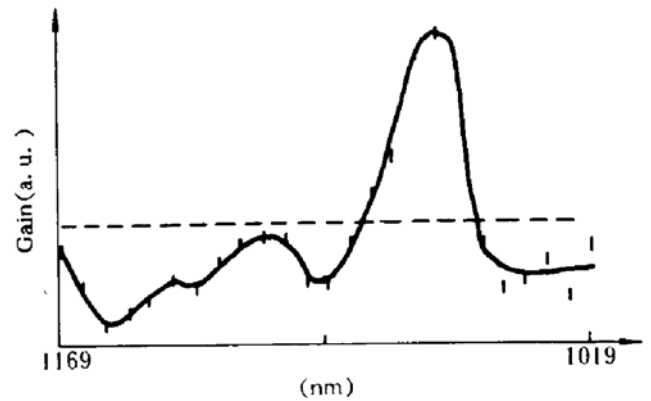


Fig. 4 The fiber gain spectrum calculated in terms of experimental data. The dashed line is the zero gain level

实际上,我们不仅对增益的线型感兴趣,更重要的是增益的“绝对”值。根据(6)式,只要  $I_L(v)$  和  $I_{L'}(v)$  为绝对光强的值,则求得的  $\gamma(v)$  就是真正的增益值。设有一功率计在荧光谱范围内的响应为常数,则有

$$I_{\text{dec}} = M_L \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_L(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

式中  $M_L$  为比例因子,它与  $\lambda$  无关。则在  $\lambda \sim \lambda + d\lambda$  范围内的光强为

$$I_L^{\text{obs}}(\lambda) = M_L \cdot I_L(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

将(10)代入(6)得

$$\frac{M_L \cdot I_L(\lambda)}{M_{L'} \cdot I_{L'}(\lambda)} = \frac{\int_1^{\exp(aL)} \frac{\exp[A_L(x-1)]}{x} dx}{\int_1^{\exp(aL')} \frac{\exp[A_{L'}(x-1)]}{x} dx} \quad (11)$$

因此,利用经功率计校正过的荧光谱可求得绝对的  $\gamma(\nu)$ 。

值得注意的是,根据上述理论模型,ASE 测量增益法原则上可推广到多模光纤中去,这方面的工作有待于进一步开展。

从我们的实验看出,ASE 测量光纤的增益是可行的。尽管实验还是初步的,如增益线型随泵浦功率的变化情况,光纤增益如何随归一化频率  $\nu$  的变化而变化等令人感兴趣的方面还未开展,但已取得了与激光实验相一致的结果。当然,ASE 技术也有其自身的缺陷,如它的灵敏度不如双光束方法高。但这种技术所需装置少,且易获得,至少可作为一种初级的增益线型的测量手段,在有些情况下甚至是唯一的手段。

### 参 考 文 献

- 1 J. Duran, P. Evesque, M. Billardon. Tunable optical gain in the near UV  $F^+$  centers in CaO. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**: 1004
- 2 P. G. Baranov, V. P. Danilov, V. I. Zhecov *et al.*. Optical absorption induced in  $KI-Tl^+$  crystals by intense UV laser radiation. *Sov. Phys. Solid State*, 1980, **20**: 1626
- 3 A. M. Hawryluk, J. A. Mangano, J. H. Jacob. Gain and absorption measurements in a KrF laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **31**: 164
- 4 W. T. Silfvast, J. S. Deech. Six dB/cm single-pass gain at 722.9 nm in lead vapor. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**: 97
- 5 C. V. Shank, A. Dienes, W. T. Silfvast. Single pass gain of exciplex 4-Mu and rhodamine 6G dye laser amplifier. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **17**: 307
- 6 G. Marowsky, F. K. Tittel, W. L. Wilson *et al.*. Laser gain measurements by means of amplified spontaneous emission. *Appl. Opt.*, 1980, **19**: 138
- 7 P. Fabeni, R. Linari, G. P. Pazzi *et al.*. Optical gain measurements with the amplified spontaneous emission technique. *Appl. Opt.*, 1987, **26**: 5317
- 8 M. J. F. Digonnet. Theory of superfluorescence fiber lasers. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT4**: 1631
- 9 陈一竑,程瑞华,干福熹. Ar 离子激光泵浦的掺 Nd 光纤激光特性. *科学通报*, 1991, (20): 1539

## A Measurement Technique of Fiber Single Pass Gain of Small Signal with a Unitary Light Beam

Wang Jie Chen Yihong Cheng Ruihua Shen Hongwei Gan Fuxi  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** A gain measurement technique with amplified spontaneous emission (ASE) has been applied to active fibers for the first time. In terms of a theoretical model, the relative gain of the  $Nd^{3+}$ -doped silicate fiber at 1080 nm is obtained by using numerical calculation.

**Key words** fiber single pass gain, gain measurements