

# Nd:YAG 晶体 $1.064 \mu\text{m}$ 受激发射截面随温度变化特性研究\*

赵圣之 陈磊 张路 张福军

(山东大学信息科学与工程学院, 济南 250100)

Alexandra Rapaport Michael Bass

(美国中佛罗里达大学光学学院光学与激光研究中心, 奥兰多 FL-32816-2700)

**摘要** 测量了 Nd:YAG 晶体从  $-70^\circ\text{C}$  到  $+80^\circ\text{C}$  不同温度下的荧光发射光谱和荧光寿命, 计算了该晶体在不同温度下  $1.064 \mu\text{m}$  受激发射截面, 首次获得在此温度变化范围内受激发射截面随温度的线性变化关系。

**关键词** Nd:YAG 晶体; 受激发射截面; 荧光光谱; 温度依赖性

**中图分类号** TN244 **文献标识码** A

## 0 引言

Nd:YAG 是  $1.06 \mu\text{m}$  激光的重要晶体, 其优良的热、光学性能和大的受激发射截面使之成为高功率固体激光器最为广泛使用的激活介质。一般说来, 激光器工作在一较宽的温度范围, 设计人员可根据激光腔内光学元件的热、光性能进行设计。大部分光学元件如反射镜、光束分离器 etc 性能在一较宽的温度范围 ( $-70^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$ ) 不发生变化, 但是激光晶体的受激发射截面随温度而变, 并且这种变化对激光器的阈值、输出能量(功率)、脉冲宽度、转换效率等具有非常大的影响。因此, 深入研究激光晶体的受激发射截面随温度的变化特性对于激光器件的设计具有重要的意义。

通常激光晶体的受激发射截面可由测量的荧光发射光谱、荧光寿命及相关的参数求得。人们对室温下 Nd:YAG 晶体光谱特性和受激发射截面已进行了详细的研究<sup>[1,2]</sup>, 并进而研究了 Nd:YAG 晶体小信号增益在温度范围  $250 \sim 500 \text{K}$  的变化特性和 Nd:YAG 激光器的阈值和斜效率在  $300 \sim 80 \text{K}$  温度的变化特性<sup>[3,4]</sup>。但系统的研究激光晶体受激发射截面随温度变化的特性还未见报道。本文首次给出 Nd:YAG 晶体  $1.064 \mu\text{m}$  受激发射截面随温度 ( $-70^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$ ) 线性变化的研究结果。

## 1 实验装置

图 1 给出了测量 Nd:YAG 晶体不同温度荧光光谱的实验装置。泵浦源为发射波长  $804 \text{nm}$  的阵列

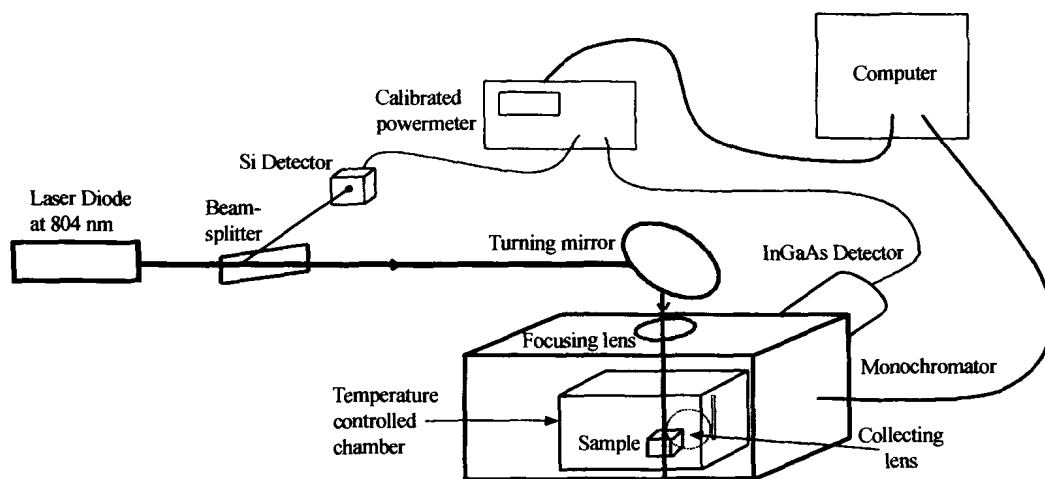


图 1 荧光光谱测量实验装置

Fig. 1 Experimental setup of fluorescent emission spectrum at different temperature

\* 国家留学基金委 DVSP、教育部博士点基金、山东省科技发展计划资助项目

Tel: 0531-8364509 Email: shengzhi\_zhao@sdu.edu.cn

收稿日期: 2003-03-10

激光二极管, 该二极管的温度由自动温控仪控制。二极管激光经光纤耦合、光束分离器和自聚焦透镜被聚焦到样品上。光束分离器后接一功率计以监测二极管激光的功率。样品为厚度  $0.9 \text{mm}$  的

Nd:YAG 晶片 ( $\text{Nd}^{3+}: 1.38 \times 10^{20} \text{ at. cm}^{-3}$ ), 被放入温度为  $-70^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$  的控制室. 二极管激光激励后, Nd:YAG 晶体发射的荧光用一透镜聚焦到 Jarell-Ash 单色仪, 单色仪的狭缝为  $50 \mu\text{m}$ , 分辨率为  $0.4 \text{ nm}$ , 光谱扫描波长范围为  $850 \sim 1550 \text{ nm}$ . 一高灵敏度的功率计与单色仪的出口狭缝相连, 并与监测功率计一起连接到计算机上, 记录下激光相应波长的输入功率和 Nd:YAG 晶体的荧光发射光谱.

Nd:YAG 晶体不同温度下的荧光寿命可用上述类似的装置测量, 这时激励源换为光学参量振荡器, 输出波长为  $804 \text{ nm}$ , 脉冲宽度为  $5 \text{ ns}$ , 单色仪的波长为  $1.064 \mu\text{m}$ , 其出口狭缝连接到光电倍增管上, 并通过 TDS694C 存储示波器与计算机相联, 由此测量  $1.064 \mu\text{m}$  荧光强度随时间的衰减变化.

## 2 实验结果

Nd:YAG 晶体经  $LD804 \text{ nm}$  激光泵浦后, 晶体基态粒子吸收泵浦光先跃迁到激发态, 经过弛豫, 到相应的能级. 粒子由上能级跃迁到下能级时, 发射荧光光谱. 温度不同, 能级粒子数的配分不同, 相应于某波长的荧光光谱强度不同. 因为晶体的受激发射截面与荧光光谱的线性函数等参量有关, 因此, 受激发射截面依赖于温度. Nd:YAG 晶体的荧光为非偏振光, 如果记录下整个波长范围的荧光发射光谱, 其有效的发射截面可由下式计算<sup>[5]</sup>

$$\sigma(\lambda) = \frac{1}{8\pi} \frac{\lambda^5 \eta}{n^2 c \tau} \frac{I(\lambda)}{\int I(\lambda) \lambda d\lambda} \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  是波长,  $\eta$  是量子效率 (对 Nd:YAG 晶体, 可近似认为  $\eta = 1$ ),  $n$  是折射率,  $c$  是光速,  $\tau$  是荧光寿命,  $I(\lambda)$  为荧光光谱中波长  $\lambda$  处单位波长的强度. 如果  $\lambda$  用  $\text{cm}$ ,  $c$  用  $\text{cm/s}$ , 则  $\sigma$  的量纲为  $\text{cm}^2$ . 从测量不同温度下的整个波段荧光发射光谱, 由式 (1) 可以计算不同温度下的 Nd:YAG 晶体相应某一波长的有效发射截面.

为了由式 (1) 计算其晶体的有效发射截面, 必须知道晶体的荧光寿命. 对于 Nd:YAG 晶体  $1.064 \mu\text{m}$  波长, 从测得的  $1.064 \mu\text{m}$  荧光强度随时间的衰减, 可用 Forster-Dexter 衰减模型拟合获得荧光辐射寿命<sup>[6,7]</sup>. 我们测量了从  $-70^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$  温度范围内该晶体  $1.064 \mu\text{m}$  波长的荧光衰减强度, 并用 Forster-Dexter 衰减模型拟合计算了辐射寿命, 结果表明, 在此温度范围内, 辐射寿命  $250 \mu\text{s}$  基本上不随温度而变.

对于 Nd:YAG 晶体, 在  $-70^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$  温度范围内, 折射率的变化小于  $0.001$ <sup>[8,9]</sup>, 在用式 (1) 计算有效发射截面时几乎没有影响, 因此, 在上述温度范

围进行计算时, 我们视它为一常数 ( $n = 1.82$ ).

图 2 是室温下测量的 Nd:YAG 晶体从  $850 \sim 1550 \text{ nm}$  波段内的荧光发射光谱, 图 3 是由图 2 和有关参数计算的有效发射截面. 图示表明  $1.064 \mu\text{m}$  峰值为  $2.3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , 该值与参考文献 [10] 的报道  $2.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$  相近.

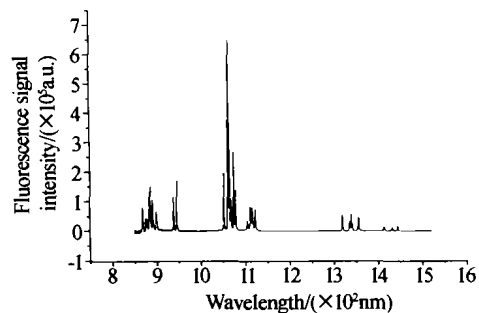


图 2 Nd:YAG 晶体室温下荧光发射光谱  
Fig. 2 Fluorescent emission spectrum of Nd:YAG crystal at room temperature

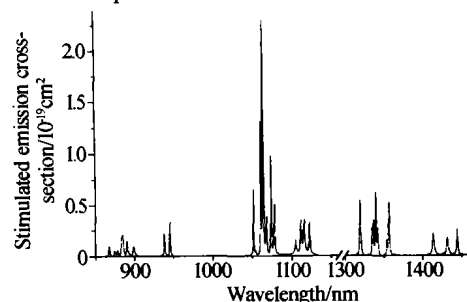


图 3 室温下 Nd:YAG 晶体有效受激发射截面  
Fig. 3 Effective stimulated emission cross section of Nd:YAG crystal at room temperature

通过调节 Nd:YAG 晶体的温度控制系统 ( $-70^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$ ), 可测得不同温度下晶体的荧光发射光谱, 然后由式 (1) 计算出不同温度下的受激发射截面. 图 4 给出  $1.064 \mu\text{m}$  有效受激发射截面

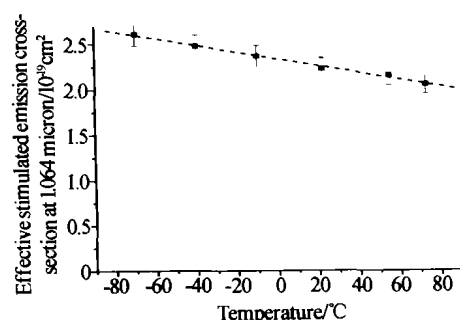


图 4 Nd:YAG 晶体有效受激发射截面随温度的变化  
Fig. 4 Effective stimulated emission cross section versus temperature

随温度的变化曲线, 点是由测量的荧光发射光谱计算的值, 虚线是线性拟合线. 图示表明, 在  $-70^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$  温度范围内, Nd:YAG 晶体  $1.064 \mu\text{m}$  有效受激发射截面随温度线性变化, 其斜率为  $-3.7 \times 10^{-22} \text{ cm}^2/\text{C}$ . 如果温度  $T$  用  $^\circ\text{C}$  表示, 则有效受激发射截面  $\sigma(\text{cm}^2)$  与温度  $T$  的线性关系可表示为

$$\sigma = (2.35 - 3.7 \times 10^{-3} T) \times 10^{-19} \quad (2)$$

### 3 结论

采用激光二极管泵浦 Nd:YAG 晶体,测量了该晶体在  $-70^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$  范围内荧光发射光谱,计算了该晶体的有效受激发射截面,首次获得了该晶体 1.064  $\mu\text{m}$  有效受激发射截面随温度的线性变化关系. 相信这种线性变化关系对于激光器件的设计具有重要的指导意义.

#### 参考文献

- 1 Singh S, Smith RG, Van Uiter L G. Stimulated emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd in yttrium aluminum garnet at room temperature. *Phys Rev (B)*, 1974, **10**(10):2566 ~ 2572
- 2 Kushida T, Marcos H M, Geusic J E. Laser transition cross-section and fluorescent branching ratio for  $\text{Nd}^{3+}$  in yttrium aluminum garnet. *Phys Rev*;1968, **167**(2):289 ~ 291
- 3 Buchenkov V A, Vitrishchak I B, Evdokimova V G, et al. Temperature dependence of giant pulse amplification in  $\text{Nd}^{3+}$ :YAG. *Sov J Quantum Electron*, 1981, **11**(6):702 ~ 705
- 4 Brauch U, Muckenschnabel J. Temperature dependence of flashlamp-pumped Nd:YAG and Nd:Cr:GSGG lasers. *Opt Comm*, 1989, **73**(1):62 ~ 66
- 5 Moulton F P. Spectroscopic and laser characteristics of  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ . *J Opt Soc Am (B)*, 1986, **3**(1):125 ~ 133
- 6 Garcia-Rubio I, Pardo J A, Merino R I, et al. Concentration and temperature dependence of  $\text{Nd}^{3+}$  luminescence in  $\text{LaGaO}_3$ . *J of Lumin*, 2000, **86**(2):147 ~ 153
- 7 Sakun V P. Kinetics of energy transfer in a crystal. *Sov Phys, Solid-State*, 1973, **14**(8):1906 ~ 1914
- 8 Pfistner C, Weber R, Weber H P, et al. Thermal beam distortions in end-pumped Nd:YAG, Nd:GSGG, and Nd:YLF rods. *IEEE J Quant Electron*, 1994, **30**(7):1605 ~ 1615
- 9 Fan T Y, Daneu J L. Thermal coefficients of the optical path length and refractive index in YAG. *Appl Opt*, 1998, **37**(9):1635 ~ 1637
- 10 Koechner W. Solid-State Laser Engineering. New York: Springer-Verlag, 1999

## Study on Temperature Dependence of the 1.064 $\mu\text{m}$ Stimulated Emission Cross Section of Nd:YAG Crystals

Zhao Shengzhi, Chen Lei, Zhang Lu, Zhang Fujun

School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100

Alexandra Rapaport, Michael Bass

School of Optics and Center for Research and Education in Optics and Lasers (CREOL)

University of Central Florida, Orlando, FL 32816-2700, U. S. A.

Received date:2003-03-10

**Abstract** The fluorescent emission spectra and radiative lifetime of Nd:YAG crystal between  $-70$  and  $+80^{\circ}\text{C}$  are measured, and the peak stimulated emission cross sections at 1.064  $\mu\text{m}$  for different temperature are calculated. A linear temperature dependence between  $-70$  and  $+80^{\circ}\text{C}$  is reported for the peak stimulated emission cross section of Nd:YAG crystal.

**Keywords** Nd:YAG crystal; Stimulated emission cross section; Fluorescent emission spectra; Temperature dependence



**Zhao Shengzhi** was born in 1957, in Yuncheng, Shandong Province. He received his B. S. degree in laser in 1982 from Shandong University and his M. S. degree in optics in 1986 from Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, respectively. He is a professor and a supervisor for Ph. D. degree with School of Information Science and Engineering, Shandong University. His research fields include lasers, laser technology, nonlinear optics and optoelectronics. He has published more than 100 papers.