

## Nd:YAP 的偏振光谱性质的研究

马 沂, 蔡志平

(厦门大学物理学系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 提出一种简单的偏振光谱分析法, 并考虑在各向异性激光晶体的色散关系情况下, 测量并标定了  $a$  轴切割 Nd:YAP 激光晶体在 3 个主要跃迁波段 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ ,  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  和  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  的偏振受激发射截面光谱. 该偏振光谱法简单易行, 且精度高, 所标定的结果可为激光器件的设计和理论分析提供重要的光谱数据.

**关键词:** 偏振光谱; 受激发射截面;  $a$  轴切割; Nd:YAP 晶体

**中图分类号:** O 433.5

**文献标识码:** A

近年来, 激光二极管(LD)泵浦 Nd:YAP 激光器以其高效率、小型化、高功率、偏振输出等特点受到各国研究人员的广泛研究<sup>[1,2]</sup>. 与主要的固体激光材料 Nd:YAG 相比, Nd:YAP 有较快的生长速度、对稀土杂质接近理想的分布系数、偏振输出、可掺入较高 Nd 浓度、有可能选择不同的棒轴方向来改变增益以及因晶体生长速度快而成本低等优点. 在此之前, 数位研究人员<sup>[3~5]</sup>已经报道了 Nd:YAP 在 3 个主要跃迁波长 930 nm ( $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ ), 1 080 nm ( $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ ) 和 1 340 nm ( $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ ) 的受激发射截面峰值. 虽然已有几种不同的方法来确定受激截面, 但这些测定值相差较大(例如对于 1 080 nm 跃迁, 其值从  $24.4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  到  $47 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ), 这些不同的受激截面值给激光器的设计和理论分析带来很大的困难. 实际上, Nd:YAP 是双轴晶体, 它的光学和光谱特性很大程度上依赖于晶轴取向和不同 Stark 能级间的具体跃迁. 本文提出一种光谱技术, 对于具体偏振方向能够确定完整的截面光谱.

## 1 光谱分析方法

一般来说, 确定激光材料的发射截面主要有 3

种方法<sup>[6]</sup>: 1) 对易法(Reciprocity Method), 根据 McCumber<sup>[7]</sup>的光子确定原理, 通过测量吸收截面可以推导出发射截面. 2) J-O(Judd-Ofelt)分析方法, 运用 Judd-Ofelt<sup>[8]</sup>原理测量吸收截面以确定辐射跃迁速率, 然后可从校准的发射光谱中计算出发射截面. 3) - 光谱方法, 发射截面可通过辐射量子效率、具体荧光的线型和分支比计算出.

对易法对于三能级和准三能级激光跃迁来说是非常有效的, 但不能运用于四能级系统. J-O 分析方法对于具体的偏振方向来说是合适的, 但它要求详细的吸收和发射光谱以及复杂的技术, 而且结构存在很大的误差. - 光谱方法是基于爱因斯坦关系式发展起来, 确定截面只需校准的发射光谱, 是最简单的方法. 所以, 我们在测量中选用 - 光谱方法.

Aull 等<sup>[9]</sup>给出在非偏振即各向同性情况下受激发射截面作为波长连续函数关系式, 这种基于光谱积分方法对于单个线型参数是不敏感的, 为

$$\sigma(\lambda) = \frac{5}{8} \frac{n^2 c f_i f_f}{n^2} \frac{I(\lambda)}{I(\lambda)_d} \quad (1)$$

式中,  $\sigma(\lambda)$  是波长为  $\lambda$  时的受激发射截面,  $n$  是晶体的折射率,  $c$  是真空中光速,  $f_i$  是根据玻尔兹曼分布, 在具体的 Stark 亚能级上泵浦粒子数的比例,  $f_f$  是 $^4F_{3/2}$ 上激光能级的荧光寿命,  $I(\lambda)$  是荧光光谱强度. 式(1)中积分是对整个荧光光谱进行的, 对于各向同性和各向异性晶体来说, 积分大小不同. 式(1)中并没有考虑偏振效应, 所以要做必要的修改以适合不同的偏振方向. Nd:YAP 为畸变形钙钛矿结构, 属正交晶系. YAP 晶体是负光性双轴晶体, 两光轴方向在  $ac$  平面上互成  $70^\circ$  角, 锐角等分线是  $c$  轴,

收稿日期: 2003-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(69878023, 60277026)和福建省自然科学基金(2002F011)资助

作者简介: 马 沂(1977-), 男, 硕士研究生.

表 1 在  $T = 293$  K 时,  $B, C, D, E$  各常数数值  
Tab. 1 The values of constants of  $B, C, D, E$  at 293 K

	$B$	$C/10^{-2}$	$D/10^{-2}$	$E$
$a$ 偏振方向	2.715 339	1.237 917	9.034 607	8.389 919
$b$ 偏振方向	2.682 368	1.219 273	8.804 046	8.133 462
$c$ 偏振方向	2.643 755	1.081 181	- 11.601 96	3.932 196

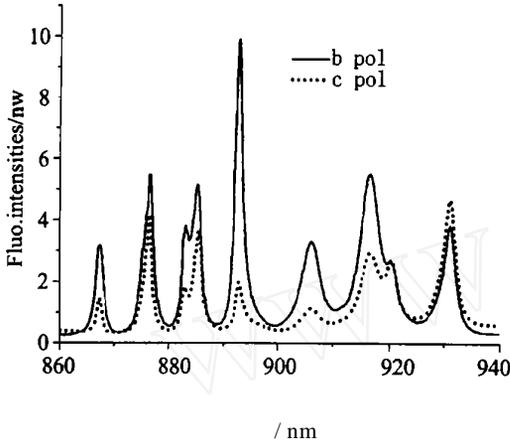


图 1  $a$  轴切割 Nd YAP 晶体在  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$  跃迁波段的偏振荧光发射光谱

Fig. 1 Polarized fluorescence spectra of the  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$  transition for a-cut Nd YAP crystal

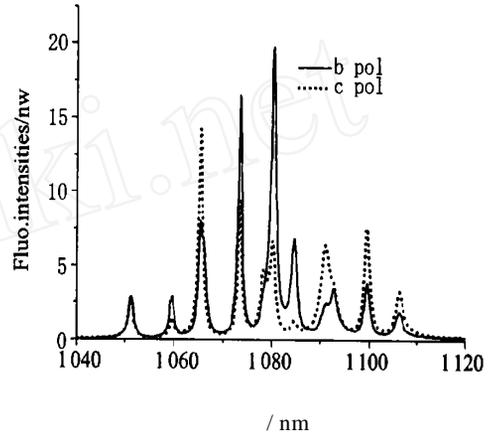


图 2  $a$  轴切割 Nd YAP 晶体在  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$  跃迁波段的偏振荧光发射光谱

Fig. 2 Polarized fluorescence spectra of the  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$  transition for a-cut Nd YAP crystal

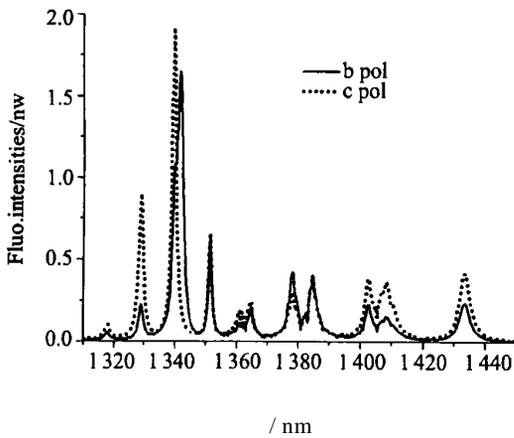


图 3  $a$  轴切割 Nd YAP 晶体在  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$  跃迁波段的偏振荧光发射光谱

Fig. 3 Polarized fluorescence spectra of the  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$  transition for a-cut Nd YAP crystal

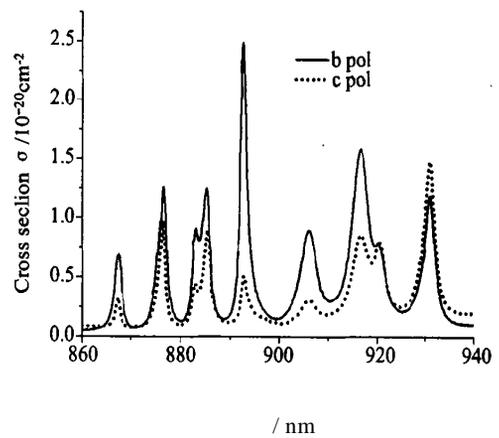


图 4  $a$  轴切割 Nd YAP 晶体在  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$  跃迁的偏振发射光谱

Fig. 4 Polarized emission spectra of the transition of  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$  for an a-cut Nd YAP crystal

有 3 个典型的偏振方向:  $a$  轴切割、 $b$  轴切割和  $c$  轴切割晶体。一个  $a$  轴切割 Nd YAP 晶体是偏振各向异性的, 有沿着  $b$  轴和  $c$  轴的 2 个典型发射光谱。对于  $a$  轴切割 Nd YAP 晶体, 它沿着  $b$  轴和  $c$  轴 2 个典型发射光谱的正交偏振截面可写成如下形式:

$$I_{b,c}(\lambda) = \frac{i^5}{8 n_{b,c}^2 c f_i} \frac{I_{b,c}(\lambda)}{[I_b(\lambda) + I_c(\lambda)]d} \quad (2)$$

式中,  $I_b(\lambda)$  和  $I_c(\lambda)$  分别为  $b$  和  $c$  偏振方向的荧光光谱强度。在式 (2) 中, 对应于  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$ 、 ${}^4I_{11/2}$  和  ${}^4I_{13/2}$  跃迁, 有一个重要参数, 即荧光分支比  $i$  ( $i = 1, 2, 3$ ),  $i = 1, 2, 3$  分别对应于  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$ 、 ${}^4I_{11/2}$  和  ${}^4I_{13/2}$  跃迁。 $i$  定义为从上能级跃迁至特定能级的光通量与总的光通量的比值, 能够通过积分相应的荧光光谱从实验校准的发射光谱中导出。

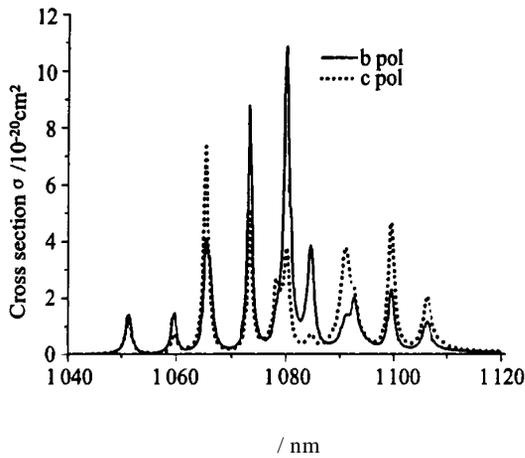


图5 a轴切割Nd:YAP晶体在<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>跃迁的偏振发射光谱

Fig. 5 Polarized emission spectra of the transition of <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> for an a-cut Nd:YAP crystal

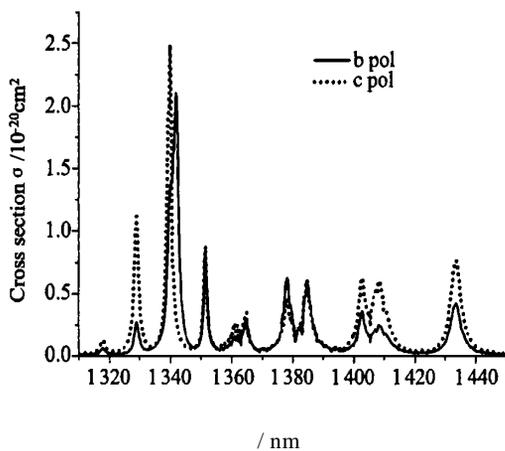


图6 a轴切割Nd:YAP晶体在<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>跃迁的偏振发射光谱

Fig. 6 Polarized emission spectra of the transition of <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> for an a-cut Nd:YAP crystal

$$i = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{I_i(\nu)}{h\nu} d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{I_i(\nu)}{h\nu} d\nu} = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} I_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} I_i(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

在式(2)中,  $n_{b,c}$ 分别为  $b$  和  $c$  偏振方向的折射率.对Nd:YAP双轴激光晶体,沿其3个主光轴方向的折射率各不相同,其常温下色散关系由下列Sellmeier<sup>[10]</sup>方程给出:

$$n_i^2(\lambda) = 1 + \frac{B_i}{1 - \frac{C_i}{\lambda^2}} + \frac{D_i}{1 + \frac{E_i}{\lambda^2}}, \quad (i = a, b, c) \quad (4)$$

式中,以 $\mu\text{m}$ 为单位, $B$ 、 $C$ 、 $D$ 和 $E$ 常数值如表1.由式(3)可知,只要知道a轴切割Nd:YAP晶

表2 a轴切割Nd:YAP晶体在3个主要跃迁波段的分支比  $i$

Tab. 2 The fluorescence branching ratio  $i$  of the three main transitions for an a-cut Nd:YAP crystal

	$1(^4F_{3/2} - ^4I_{9/2})$	$2(^4F_{3/2} - ^4I_{11/2})$	$3(^4F_{3/2} - ^4I_{13/2})$
$i (i = 1, 2, 3)$	0.455 3	0.504 3	0.040 4

表3 a轴切割Nd:YAP晶体在  $b$ 、 $c$  偏振方向的折射率  $n$

Tab. 3 The refractive index  $n$  of  $b, c$  polarized for a-cut Nd:YAP crystal

$\lambda / \text{nm}$	890	1 070	1 370
$n_b$	1.931 86	1.929 27	1.927 80
$n_c$	1.913 35	1.908 61	1.903 05

体沿  $b$  和  $c$  偏振方向的折射率  $n_{b,c}$ 、激光上能级的寿命  $\tau_f$ 、偏振发射光谱和荧光分支比  $i$ ,就可以针对具体的偏振方向来确定完整的截面光谱.而以上各参量都容易通过实验测量和式(3)、(4)较精确地得到,所以我们认为经过发展的偏振光谱方法是确定各向异性晶体完整的截面光谱的有效方法.

## 2 实验分析及结果讨论

为了获得a轴切割Nd:YAP晶体在3个主要跃迁波段(<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>和<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>)的偏振发射谱,采用1 W 808 nm 半导体连续激光器泵浦a轴切割Nd:YAP晶体样品进行实验.同时,为了能区分输出光的  $b$ 、 $c$  偏振方向,在输出光进入光谱分析仪之前插入一块格林-汤姆逊棱镜.该棱镜起到检偏器的作用,而且其几何平面要与荧光光轴垂直,以确保偏振方向的准确性.这样,就得到了a轴切割Nd:YAP晶体在3个主要跃迁波段的偏振光谱(图1~3).值得一提的是,所测的光谱由等光强校正过的光谱仪测得.本实验中的光谱分辨率均为0.16 nm.

对所求得的a轴切割Nd:YAP晶体发射谱强度积分,可根据公式(3)求得晶体在3个主要跃迁波段(<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>和<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>)的分支比  $i$ ,结果由表2给出.而晶体在  $b$ 、 $c$  偏振方向的折射率  $n$  可根据公式(4)求得,结果由表3给出.

我们测得样品的<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>上激光能级的荧光寿命  $\tau_f = 175 \mu\text{s}$ ,根据图1~3所得数据和公式(2),可得到在室温下(293 K) a轴切割Nd:YAP晶体在3个主要跃迁波段,沿  $b$ 、 $c$  偏振方向的受激发射截面与

波长的关系图(图4~6)。

本文运用一种新的光谱分析方法并考虑到各向异性晶体的色散关系,求出双轴晶体Nd:YAP在其3个主要跃迁波段的受激发射截面与波长关系。在以往的文献中,各国科研人员的注意力主要集中于Nd:YAP晶体的 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 和 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁波段,由于在这2个波段上有较大的受激发射截面和易于出光。然而,随着蓝光激光器的研究越来越受到人们的重视,对于Nd:YAP晶体在 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 跃迁波段的研究也是很有必要的,Zarrabi等<sup>[11]</sup>已用KNbO<sub>3</sub>晶体倍频Nd:YAP晶体得到465 nm的蓝光输出。所以,我们计算了Nd:YAP晶体在其3个主要跃迁波段的受激发射截面值。

### 3 结 论

通过测量a轴切割Nd:YAP激光晶体在3个主要跃迁波段 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 、 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 和 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 的偏振光谱,发展一种简便的偏振光谱分析方法,并考虑了各向异性激光晶体的色散关系,得到了a轴切割Nd:YAP激光晶体在3个主要跃迁波段的偏振受激发射截面谱。与其他确定激光晶体的受激发射截面的方法相比,该方法简便易行,且引起误差较小,可为激光器件的设计和理论提供重要光谱数据。

#### 参考文献:

[1] Li Xiaoying, Pan Qing, Jing Jietai, et al. LD pumped intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YAP/KTP laser with 1.1W output at 540 nm[J]. Opt. Comm., 2002, 201: 165 - 171.

[2] Boucher M, Musset O, Boquillon J P, et al. Multiwatt CW diode end-pumped Nd:YAP laser at 1.08 and 1.34  $\mu\text{m}$ : influence of Nd doping level[J]. Opt. Comm., 2002, 212: 139 - 148.

[3] Weber M J, Varitimos T E. Optical spectra and intensities of Nd<sup>3+</sup> in YAlO<sub>3</sub> [J]. J. Appl. Phys., 1971, 42 (12): 4996 - 5005.

[4] Kaminskii A A, Sarkisov S E, Mochalov I V, et al. Anisotropy of spectroscopic characteristics in the biaxial YAlO<sub>3</sub>:Nd<sup>3+</sup> laser crystals[J]. Phys. Stat. Sol., 1979, 51: 509 - 520.

[5] Shen Hongyuan, Lian Tianquan, Zheng Ruirong, et al. Measurement of the stimulated emission cross section for the  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  transition of Nd<sup>3+</sup> in YAlO<sub>3</sub> crystal [J]. IEEE J. Quantum Electronics, 1989, 25 (2): 144 - 146.

[6] Payne S A, Chase L L, Smith L K, et al. Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup>, and Ho<sup>3+</sup> [J]. IEEE J. Quantum Electronics, 1992, 28 (11): 2619 - 2629.

[7] McCumber D E. Einstein relation connecting broadband emission and absorption spectra [J]. Physical Review, 1964, 136(4A): A954 - A957.

[8] Judd B R. Optical absorption intensities of rare-earth ions [J]. Phys. Rev., 1962, 127(3): 750 - 761.

[9] Aull B F, Jessen H P. Vibronic interactions in Nd:YAG resulting in non reciprocity of absorption and stimulated emission cross sections [J]. IEEE J. Quantum Electronics, 1982, 18(5): 925 - 930.

[10] Zeng Z D, Shen H Y, Huang M L, et al. Measurement of the refractive index and thermal refractive index coefficients of Nd:YAP crystal [J]. Applied Optics, 1990, 29 (9): 1281 - 1286.

[11] Zarrabi J H, Gavrilovic P, Singh S. Intracavity, frequency-doubled, miniaturized Nd:YAlO<sub>3</sub> blue laser at 465 nm [J]. Appl. Phys. Lett., 1995, 67 (17): 2439 - 2441.

## Polarized Spectral Characteristics of Nd:YAP

MA Yi, CAI Zhi-ping

(Dept. of Phys., Xiamen Univ., Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A simple polarized spectroscopic determination method was employed to measure the polarized stimulated emission cross-section spectra of the three principal transitions  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ ,  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  and  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  of a-cut Nd:YAP laser crystals. The dispersion relation of anisotropic laser crystal is considered. Compared with other spectroscopic determination methods, this polarized spectral method is simple with higher accuracy. The obtained results are useful for theoretic analysis and design.

**Key words:** polarized; stimulated emission cross sections; a-cut; Nd:YAP crystal