

# 可用于自倍频激光器的 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$ 和 $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$ 晶体光学特性的研究

刘振林

(理化学研究所光动力学研究中心, 980 日本国宫城县仙台市)

**摘要**  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  和  $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$  晶体具有较宽的荧光光谱, 从红光到近红外光。 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  晶体在 744 nm 到 852.5 nm 之间被检测到光学增益。最大单程增益为 1.9, 对应波长为 820 nm。 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  晶体的二次谐波产生 (375 nm) 的转换效率是 LBO 晶体的 1.5 倍。

**关键词:** 自倍频, 紫外激光, 掺铬晶体

## 1 引言

双功能(自倍频)激光晶体指这种晶体既是增益介质, 又是非线性光学晶体。采用腔内自倍频结构, 这种晶体非常适合于紧凑的可见光或紫外光光源。然而, 目前只有少数双功能激光晶体见之于报道, 如  $\text{Nd}:\text{LiNbO}_3$  晶体<sup>[1]</sup>和  $\text{Nd}:\text{YAB}$  晶体<sup>[2]</sup>等。所有这些晶体都是 Nd 离子激活激光介质, 它们不具有波长可调谐性。获得宽带可调谐的办法之一是将过渡金属离子掺入到非线性光学晶体中。 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  (简记为  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$ ) 和  $\text{Cr}^{3+}:\text{Y}(\text{Ga}, \text{Al})_3(\text{BO}_3)_4$  (简记为  $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$ ) 就属于这类晶体。YAB 的晶体结构属于三角晶系, R32 空间群, 是负单轴晶体。YGAB 的晶体结构同 YAB 相同。

有关  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  晶体的吸收, 荧光及荧光寿命的报道见于参考文献[3]和[4], 然而他们没有讨论有关激活激光介质和自倍频晶体的问题。本文将讨论  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  和  $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$  作为新的可调谐固体激光材料和新的自倍频晶体的可能性。最后将给出  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  晶体光学增益测量的结果。

## 2 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$ 和 $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$ 晶体的光学特性

图 1(a)和 1(b)分别为  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  晶体(Cr 的初始含量为 0.2 at. %)和  $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$  晶体(Cr 的初始含量为 0.2 at. %, Ga 的初始含量为 25 at. %)的吸收谱。它们由两个宽带(Y 带和 U 带)和一个窄带(R 线)构成, 分别对应于  ${}^1\text{A}_2 \rightarrow {}^1\text{T}_1$ ,  ${}^1\text{A}_2 \rightarrow {}^1\text{T}_2$  和  ${}^1\text{A}_2 \rightarrow {}^2\text{E}$  跃迁。 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  晶

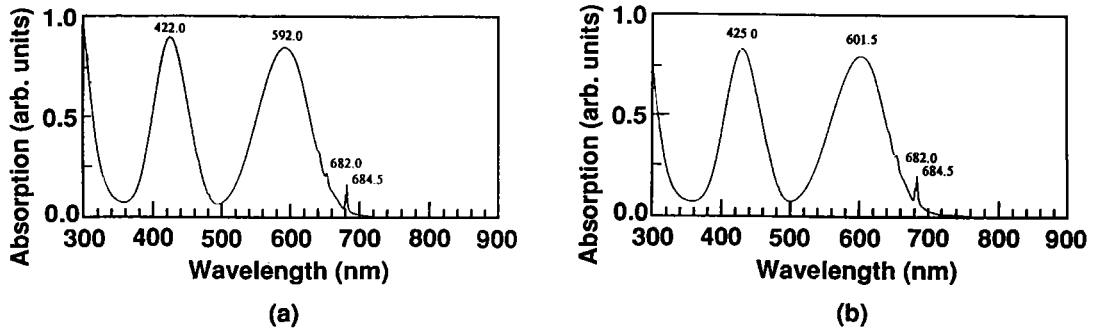


Fig. 1 Absorption spectra of the crystals (a)  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  and (b)  $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$  (Ga is 25 at. % in the initial mixture. ). The peak of U band of  $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$  crystal is at wavelength about 10 nm longer than that of  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  crystal. It seems that  $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$  crystal is suitable for LD (laser diode) pumping.

体的两个宽吸收带峰在 422.0 nm 和 592.0 nm,  $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$  晶体的两个宽吸收带峰在 425.0 nm 和 601.5 nm.  $\text{YGAB}$  晶体的吸收波长向长波长方向移动, 这说明它更适合于用半导体激光器泵浦. 图 2 给出  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  晶体 (Cr 的初始含量为 0.5 at. %) 的荧光谱.  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  晶体的宽带荧光来源于  ${}^4\text{T}_2 \rightarrow {}^4\text{A}_2$  跃迁, 范围从 640 nm 到 850 nm, 而且  $\pi$ -偏振 (偏振方向平行于晶体的光轴) 荧光强度大于  $\sigma$ -偏振 (偏振方向垂直于晶体的光轴) 荧光强度.  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  晶体 (Cr 的初始含量为 0.2 at. %) 的荧光寿命在室温下为 170  $\mu\text{s}$ . 图 3 是  $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$  晶体 (Ga 的初始含量为 25 at. %) 的荧光谱. 这种晶体在室温下的荧光寿命为 87  $\mu\text{s}$ .

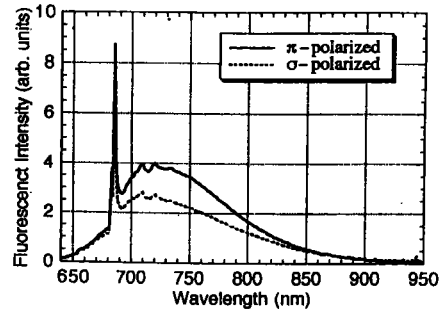


Fig. 2 Fluorescence spectrum of  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  (Cr concentration was 0.5 at. % in the initial mixture) crystal. A CW He-Ne laser was used as the pumping source.

图 4 是  $\text{Cr}^{3+}$  离子的能级结构图. 基态  ${}^4\text{A}_2$  的振动能级足够高, 可使  $\text{Cr}^{3+}$  离子运转在四能级系统激光能级.

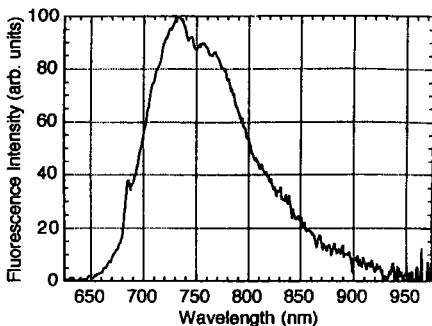


Fig. 3 Fluorescence spectrum of  $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$  (Ga is 25 at. % in the initial mixture) crystal

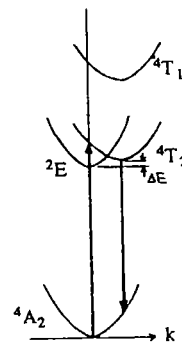


Fig. 4 Schematic energy states of  $\text{Cr}^{3+}$  ions in octahedral crystal fields

表 I 给出了本实验所用晶体的峰值辐射截面计算值和荧光寿命测量值及其它参考晶体的数据。 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  晶体的辐射截面计算值为  $0.8 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ ,  $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$  晶体的辐射截面计算值为  $1.6 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ 。这些晶体的  $\sigma \times \tau$  值略小于  $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCaAlF}_6$  晶体的相应值(0.63;0.65;1)。

Tab. 1 Comparison of emission cross section and emission lifetime.

\* Ga is 25 at. % in the initial mixture.

	peak emission cross section $\sigma (\times 10^{-20} \text{cm}^2)$	emission lifetime $\tau (\mu\text{s})$	reference
$\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$	0.8	170	this work
$\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$	1.6	87	this work
$\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$	3	260	6.7
$\text{Cr}^{3+}:\text{Garnet family}$	0.36—1.6	86—241	8
$\text{Cr}^{3+}:\text{LiSrAlF}_6$	5	$67 \pm 5$	9
$\text{Cr}^{3+}:\text{LiCaAlF}_6$	1.23	175	5

### 3 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$ 晶体的倍频效率及增益

为了研究  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  晶体的激光振荡及自倍频的可能性,我们进行了增益测量和二次谐波产生的实验。

图 5 是用于测量光学增益的实验装置示意图。我们用脉冲 DCM 染料激光(630 nm, 80 mJ, 10 ns, 10 Hz)作泵浦光源,用连续锁模掺钛宝石激光(744—852.5 nm, 1 ps, 82 MHz)作信号光。泵浦光和信号光被分别聚焦( $f=30, 50 \text{ cm}$ ),共线重合在二向色反射镜上(HT 表示对泵浦光高透过,HR 表示对信号光高反射)。这种光学结构可以保证泵浦光和信号光有很好的空间重合性,便于控制泵浦光通量而不改变其它条件。实验所用的  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  晶体长 2.5 mm。泵浦光通量为  $5 \text{ J/cm}^2$ ,其中 70% 的泵浦光能量被吸收。信号光由一个对 82 MHz 重复频率脉冲序列具有足够快的响

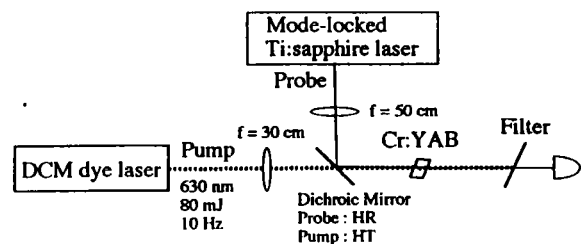


Fig. 5 Experimental setup for the gain measurement. Gain was measured by pump and probe method. A pulsed DCM dye laser (630 nm, 80 mJ, 10 ns, 10 Hz) was used as the pump source and a CW mode-locked Ti:sapphire laser (744-852.5 nm, 1 ps, 82 MHz) was used as the probe. The path length of the  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  crystal was 2.5 mm.

应时间的双板光电管接收。通过计算有泵浦光和无泵浦光条件下的信号强度比,就可得到增益。如图 6 所示,在本实验的整个波长变化范围内(744—852.5 nm)都有较大的增益(大于 1.4)。最大单程增益达到 1.92,对应波长为 820 nm。这个结果说明,实现可调谐激光振荡具有较高的可能性。

用脉冲掺钛宝石激光作基波光源进行紫外区域二次谐波产生的实验。Nd:YAB 晶体的非线性系数为  $d_{11} = 1.789(\text{pm}/\text{V})$ <sup>[10]</sup>。它的非线性源于  $(\text{BO}_3)^{3-}$ 。因此,  $\text{Cr}^{3+}$ ; YAB 和  $\text{Cr}^{3+}$ ; YGAB 晶体的非线性系数与 Nd:YAB 几乎相同。在 750 nm 基波波长处, 计算所得的位相匹配角为  $\theta = 40.8$  度, 有效非线性系数为  $d_{eff} = 1.35(\text{pm}/\text{V})$ 。这个值比 LBO ( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ ) 晶体的  $d_{32} (= 1.17\text{pm}/\text{V})$  高, 因此有希望得到更高的转换效率。实验中基波波长为 750 nm, 脉冲能量为 3.3 mJ, 脉冲宽度为 10 ns, 脉冲重复频率为 10 Hz。2.5 mm 长的  $\text{Cr}^{3+}$ ; YAB 晶体的倍频转换效率达到 1.6%。在相同条件下, 5 mm 长的 LBO 晶体的倍频转换效率是 4%。考虑到晶体厚度的差别,  $\text{Cr}^{3+}$ ; YAB 晶体的倍频转换效率是 LBO 晶体的 1.5 倍。

总之,  $\text{Cr}^{3+}$ ; YAB 和  $\text{Cr}^{3+}$ ; YGAB 晶体具有两个宽吸收带和一个宽荧光谱。它们的峰值辐射截面分别为  $8 \times 10^{-21}\text{cm}^2$  和  $1.6 \times 10^{-20}\text{cm}^2$ 。荧光寿命可与  $\text{Cr}^{3+}$ ;  $\text{LiCaAlF}_6$  和  $\text{Cr}^{3+}$ ;  $\text{LiSrAlF}_6$  晶体相比。这些晶体的  $\sigma \times \tau$  值略小于  $\text{Cr}^{3+}$ ;  $\text{LiCaAlF}_6$  晶体的相应值。在 744—852.5 nm 波长范围内都有增益。最大单程增益达到 1.92, 对应波长为 820 nm。2.5 nm 长的  $\text{Cr}^{3+}$ ; YAB 晶体的倍频转换效率达到 1.6% (二次谐波波长为 375 nm)。

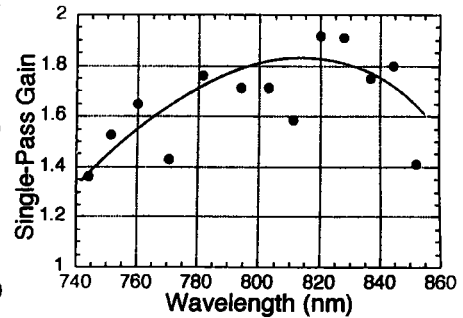


Fig. 6 Single-pass gain spectrum of a 2.5-mm-long  $\text{Cr}^{3+}$ ; YAB crystal.

### 参 考 文 献

- [1] Y. G. Dmitriev, E. V. raevskii, N. M. Rubina, L. N. Rashkovich, O. O. Silichev and A. A. Fomichev, *Sov. Tech. Phys. Lett.*, 1979, 4: 590
- [2] Z. D. Luo, J. T. Lin, A. d. Jiang, Y. C. Huang and M. W. Qui, *Proc. SPIE*, 1989, 1104: 132
- [3] G. Blasse and A. Bril, *Phys. Status Solidi*, 1967, 20: 551
- [4] F. Kellendonk, T. van den Belt and G. Blasse, *J. Chem. Phys.*, 1982, 76: 1194
- [5] S. A. Payne, L. L. Chase, H. W. Newkirk, L. K. Smith and W. F. Krupke, *IEEE J. Quantum Electronics*, 1988, 24: 2243
- [6] J. C. Walling, D. F. Heller, H. Samelson, D. J. Harter, J. A. Pate and R. C. Morris, *IEEE J. Quantum Electronics*, 1985, 21: 1568
- [7] J. C. Walling, O. G. Peterson, H. P. Jenssen, R. C. Morris and E. Wayne O'Dell, *IEEE J. Quantum Electronics*, 1980, 16: 1302
- [8] K. Petermann and G. Huber, *J. Lumin.*, 1984, 31&32: 71
- [9] S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway and H. W. Newkirk, *J. Appl. Phys.* 1989, 66: 1051
- [10] S. Amano and T. Mochizuki, *Nonlinear Opt.*, 1991, 1: 297

## Optical Characterization of $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$ and $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$ Crystal for self-frequency-doubling Laser

Zhenlin Liu

*(Photodynamics Research Center, The Institute of Physical and Chemical Research,  
Nagamachi Koeji 19-1399, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980, Japan)*

### Abstract

$\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  and  $\text{Cr}^{3+}:\text{YGAB}$  crystals have broad fluorescence spectra ranging from the red to near-IR region. The optical gain of  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  crystal was measured in the range from 744 nm to 852.5 nm. The maximum single-pass gain was 1.9 at 820 nm. Second harmonic generation in the UV region (375 nm) was obtained by a  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAB}$  crystal with the conversion efficiency 1.5 times as high as that of LBO crystal.

**Key words:** Self-frequency-doubling, UV laser,  $\text{Cr}^{3+}$ -doped crystal

**刘振林** 男, 1965年12月出生。1986年7月毕业于南开大学物理系光学专业。1989年7月在中国科学院长春光机所获理学硕士学位, 并留所工作。1993年7月到日本理化学研究所工作, 至今。现主要从事红外及紫外区域波长可调谐固体激光器及其应用的研究。美国光学学会会员。