

# 钛宝石激光抽运的 Nd: GdCOB 自倍频 激光器研究

吕军华 李光明 张树君 刘均海 陈焕鑫 蒋民华 邵宗书  
(山东大学晶体材料国家重点实验室 济南 250100)

**提要** 报道了 Nd: GdCOB 晶体相位匹配方向不位于主平面上的自倍频特性, 并与位于主平面内的倍频方向进行了比较。获得 11.3 mW 的自倍频绿光输出, 光-光转换效率为 2.3%, 自倍频腔阈值为 1 mW。对实验结果进行了讨论。

**关键词** Nd: GdCOB 晶体, 自倍频, 相位匹配

## 1 引 言

掺钕硼酸氧钙钆(Nd: GdCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, 简称 Nd: GdCOB) 是一种新型晶体<sup>[1~3]</sup>。它是一种多功能材料, 既可用于激光增益介质, 又可当作倍频器件, 还能作为自倍频材料。作为增益介质, 其斜效率可达 45%<sup>[4]</sup>; 作为非线性器件, 其有效非线性系数 ( $d_{\text{eff}}$ ) 约为 1 pm/V, 和 LBO 相当。另外, 它还具有透光波段宽(320~ 2700 nm), 损伤阈值高(1 GW/cm<sup>2</sup>), 走离角小(13 mrad), 容限角宽(2.2 mrad·cm) 等优点。重要的是, Nd: GdCOB 晶体易于生成高质量的大块单晶, 从而使该晶体可以同 NYAB 相比拟。NYAB 是目前最好的自倍频材料之一, 但是不易生长高质量的单晶, 且该晶体在 532 nm 有较强的吸收。

人们对 Nd: GdCOB 晶体的兴趣多集中于它的自倍频特性上。自倍频晶体集增益介质和非线性材料的性能于一身, 可以把自身受激辐射产生的红外光转变为可见光。这种激光器因为具有小型化、结构紧凑的特点, 符合激光器发展的潮流, 因而成为近年来的研究热点之一。目前国外对 Nd: GdCOB 的研究方兴未艾。F. Mougel 等用 LD 和钛宝石激光器作抽运源, 分别获得 21 mW 和 114 mW 的自倍频绿光输出<sup>[5]</sup>。

本文报道了相位匹配方向不位于主平面上的 Nd: GdCOB 晶体的自倍频特性, 并与位于主平面的自倍频方向进行了比较。

## 2 Nd: GdCOB 晶体材料特性

Nd: GdCOB 是单斜晶体, 莫氏硬度为 6.5。晶胞参数为  $a = 0.80937$  nm,  $b = 1.6013$  nm,  $c = 0.35579$  nm,  $\beta = 101.27^\circ$ <sup>[1]</sup>。其色散方程为

$$\begin{aligned}
 n_x^2 &= 2.87968 + \frac{0.0237974}{\lambda^2 - 0.0166759} - 7.34905 \times 10^{-5} \lambda^2 \\
 n_y^2 &= 2.96069 + \frac{0.0261989}{\lambda^2 - 0.0133786} - 3.17661 \times 10^{-5} \lambda^2 \\
 n_z^2 &= 2.99098 + \frac{0.0264639}{\lambda^2 - 0.0137279} - 6.94341 \times 10^{-5} \lambda^2
 \end{aligned} \quad (1)$$

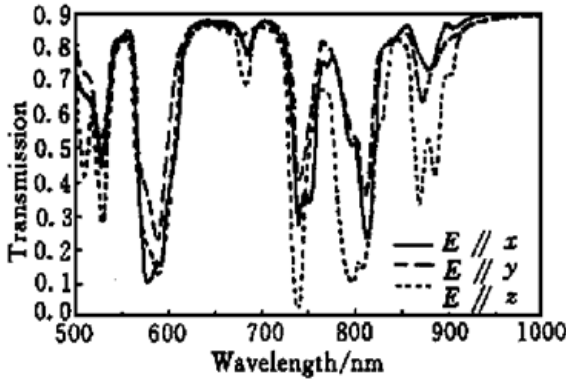


图1 浓度为9%的Nd:GdCOB晶体的偏振吸收光谱

Fig. 1 Polarized transmission spectra of 9% Nd:GdCOB crystal

荧光发射峰位于1061 nm, 发射截面据 F. Mougel 等报道分别为  $\sigma_x = 4.21 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\sigma_y = 2.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\sigma_z = 2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 室温下上能级寿命为 98  $\mu\text{s}$ 。图1所示的是掺杂浓度为 0.09 mol/L, 晶体尺寸为 8 mm  $\times$  8 mm  $\times$  8 mm 的 Nd:GdCOB 晶体沿三个主轴方向的偏振吸收光谱。由图可见, 它在 811 nm 处有较强的吸收峰, 适合用激光二极管直接抽运, 另外, 它在三个平行于主轴的偏振方向上的吸收存在较大差异。几个我们感兴趣的波长处的吸收系数列于表1。由表1可知, 对抽运光和倍频光的吸收, 在  $E \parallel z$  方向上最强,  $E \parallel y$  方向吸收最弱。对基频光的吸收,  $E \parallel x$  最弱,  $E \parallel y$  方向最强。据报道, 在实验中从未获得平行于  $y$  方向的基频光, 这与该方向对基频光吸收较强

有关。

表1 Nd:GdCOB 晶体在530 nm, 811 nm 和 1061 nm 处的吸收系数

Table 1 Absorption coefficient of Nd:GdCOB at wavelengths of 530 nm, 811 nm and 1061 nm

	$E \parallel x$	$E \parallel y$	$E \parallel z$
530 nm	$\alpha = 0.90 \text{ cm}^{-1}$	$\alpha = 0.69 \text{ cm}^{-1}$	$\alpha = 1.45 \text{ cm}^{-1}$
811 nm	$\alpha = 1.73 \text{ cm}^{-1}$	$\alpha = 1.17 \text{ cm}^{-1}$	$\alpha = 2.15 \text{ cm}^{-1}$
1061 nm	$\alpha = 0.02 \text{ cm}^{-1}$	$\alpha = 0.04 \text{ cm}^{-1}$	$\alpha = 0.03 \text{ cm}^{-1}$

Nd:GdCOB 晶体的自倍频特性运转必须兼顾基频增益和倍频转换两个方面。由于该晶体属于单斜晶系, 倍频和基频性能呈现强烈的各向异性, 情况非常复杂。迄今所报道该晶体的自倍频性能研究都是侧重于基频光。首先选择平行于某一主轴的基频光, 然后在垂直于该轴的主平面内寻找倍频方向。报道的方向有位于  $xy$  平面内的 ( $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 46^\circ$ ) (基频光平行于  $z$  轴), 和位于  $zx$  平面内的 ( $\theta = 19.68^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ) (基频光平行于  $y$  轴)<sup>[1]</sup>。由于  $E \parallel y$  方向的基频光在实验中从未观察到, 所以 ( $\theta = 19.68^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ ) 不能实现自倍频运转; 只有 ( $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 46^\circ$ ) 方向的自倍频特性有过报道。我们则兼顾晶体的倍频性能, 选择倍频特性好的方向进行研究。本文报道相位匹配方向位于  $xy$  平面和不位于主平面内时, Nd:GdCOB 晶体的自倍频特性。

### 3 实验装置

实验用的晶体系本研究所采用 Czochralski 方法生长。Nd 离子掺杂浓度为 9%, 晶体尺寸为 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  8 mm。晶体抽运端镀 1061 nm 和 811 nm 双色增透膜, 另一端镀 1061 nm 和

530 nm 双色增透膜。样品 A 和样品 B 的切割方向分别为( $\theta = 90^\circ, \varphi = 46^\circ$ ) 和( $\theta = 66.3^\circ, \varphi = 134.4^\circ$ ), 详见图 2。抽运源为  $Ar^+$  抽运的连续输出钛宝石激光器 (Model 3900S, Spectra-Physics), 经一焦距为 8 cm 透镜聚焦后进入激光晶体。实验装置见图 3。采用平-凹腔, 抽运端镜是平镜, 镀 1061 nm 高反和 811 nm 高透双色膜。输出镜为凹面镜, 曲率半径为 20 mm, 镀 1061 nm 高反和 530 nm 高透双色膜。输出光束中既包括倍频光, 又包含基频光。这是因为输出镜虽然号称对 1061 nm 的基频光高反, 仍然有约 0.1% 的基频光能透过。使用适当的滤波片滤掉基频光, 则可以测量倍频输出的功率。

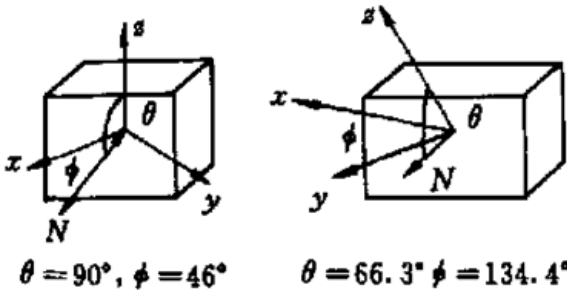


图 2 Nd: GdCOB 晶体 I 类相位匹配方向示意图

$N$  表示光的传播方向

Fig. 2 Configuration of Nd: GdCOB crystals for type I phase-matching

$N$  is the direction of light propagation

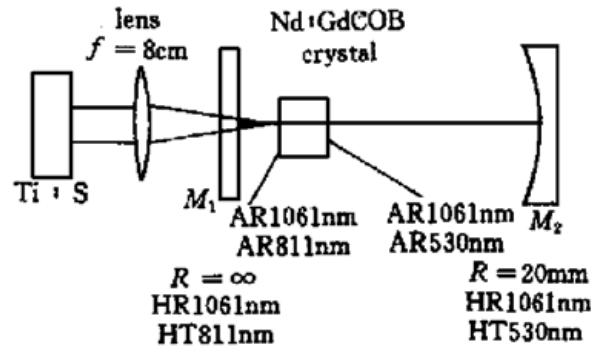


图 3 Nd: GdCOB 自倍频激光器装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the self frequency doubling Nd: GdCOB laser

### 4 实验结果与讨论

图 4 为钛宝石激光抽运的 Nd: GdCOB 激光器的自倍频绿光和漏出的基频光输出曲线。漏出的基频光功率是通过测量总输出功率(包含基频光和倍频光)和倍频输出功率相减而得到的。样品 A 在抽运功率为 530 mW 时获得 11.2 mW 的绿光输出, 样品 B 在抽运功率为 520 mW 时获得 11.3 mW 的绿光输出, 光-光转换效率分别为 2.2% 和 2.3%。自倍频腔起振阈值分别为 1 mW 和 28 mW。由图 4 可见, 样品 A, B 的自倍频输出差别很小, 而它们漏出的基频光则差异显著。在相同的条件下, A, B 样品漏出的基频光的效率分别为 4% 和 2%。显然, A 样品产生的基频光比 B 样品要强。倍频输出和腔内基频光功率存在如下关系

$$P_{SHG} \propto P_c^2 \tag{2}$$

式中,  $P_{SHG}$  表示倍频功率,  $P_c$  表示腔内基频功率。由公式(2) 和实验结果, 可以得出如下结论: 样品 B 产生的基频光比样品 A 要弱, 而它的倍频效率比样品 A 要高。

与国外同行的实验结果相比, 本文报道的输出功率和转换效率较小。主要原因有: (1) 抽运

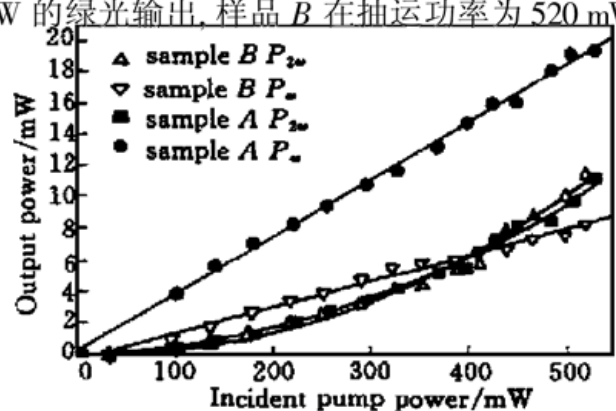


图 4 自倍频输出功率和漏出的基频功率与入射抽运功率关系曲线

$P_c$  表示漏出的基频功率,  $P_{2\omega}$  表示倍频功率

Fig. 4 SHG output power and escaped fundamental power versus incident pump power

$P_c$  represent escaped fundamental power,

$P_{2\omega}$  represent SHG power

功率小。自倍频输出功率与腔内基频功率成平方关系,而腔内基频功率与抽运功率成线性关系,因此自倍频输出功率与抽运功率也成平方关系。自倍频输出功率将随抽运功率的提高而大幅度上升。而我们的抽运功率最高仅到达 520 mW,与报道的 1.25 W 抽运功率相差一半;

(2) 腔型设计有待进一步优化。目前采用的是平-凹腔。与凹-凹腔相比,该腔结构简单易调整,缺点是晶体内部光束的平均半径较大,这样腔内功率密度较低,导致倍频效率不高。

### 参 考 文 献

- 1 Makoto Iwai, Taisuke Kobayashi, Hiroyuki Furuya *et al.*. Crystal growth and optical characterization of rare-earth (Re) calcium oxyborate  $\text{ReCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  (Re= Y or Gd) as new nonlinear optical material. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, Part 2, **36**(3A): 276~ 279
- 2 G. Aka, L. Bloch, J. M. Benitez *et al.*. A new nonlinear oxyborate crystal, characterized by using femtosecond broadband pulses. *OSA TOPS on Advanced Solid-state Lasers*, 1996, **1**: 336~ 340
- 3 G. Aka, A. Kahr-Harari, F. Mougel *et al.*. Linear and nonlinear-optical properties of a new gadolinium calcium oxoborate crystal,  $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ . *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(9): 2238~ 2247
- 4 F. Mougel, G. Aka, A. Kahr-Harari *et al.*. Infrared laser performance and self-frequency doubling of  $\text{Nd}^{3+} : \text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$  (Nd: GdCOB). *Opt. Materials*, 1997, **8**(3): 161~ 173
- 5 F. Mougel, F. Auge, G. Aka *et al.*. New green self-frequency-doubling diode-pumped Nd:  $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$  laser. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**(5): 533~ 535

## Laser Performance of Self-frequency Doubling Nd: GdCOB under Ti: sapphire Laser Pumping

Lü Junhua Li Guangming Zhang Shujun Liu Junhai

Chen Huanchu Jiang Minhua Shao Zongshu

(National Key Lab of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

**Abstract** The self-frequency doubling laser performance of Nd: GdCOB crystal with the phase-matching direction not in the principal plane is reported. The green light with a power of 11.3 mW and an efficiency of 2.3% was obtained. Laser threshold for self-frequency doubling operation is measured to be 1 mW. The experimental results are discussed.

**Key words** Nd: GdCOB, self-frequency doubling, phase-matching