

# 低对称非线性光学晶体 $\text{Ca}_4\text{RO}(\text{BO}_3)_3$ ( $\text{R} = \text{Gd}, \text{Y}$ ) 的研究与进展\*

王正平 王继扬 邵宗书\*\*

山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100

**摘要** 介绍了新型非线性光学晶体  $\text{Ca}_4\text{RO}(\text{BO}_3)_3$  ( $\text{R} = \text{Gd}, \text{Y}$ ) 的基本性质. 综述了该晶体的研究现状, 并对它们在非线形光学领域的发展前景进行了展望.

**关键词**  $\text{Ca}_4\text{RO}(\text{BO}_3)_3$  晶体 倍频 自倍频 非临界相位匹配 非线性光学系数

在现代社会生活中, 激光器扮演着越来越重要的角色. 在光信息存储、光盘技术、激光打印、彩色复印等领域中, 红绿蓝 (RGB) 可见光激光器, 尤其是蓝绿光激光器具有十分重要的意义. 由于固体激光器的激光波长大都处在红外区, 通常获得可见光的方式是采用非线性晶体把激光晶体产生的红外光经频率转换之后获得可见光, 这种类型的激光器主要有 Nd:YAG/KTP, Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP, Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 等. 功能的复合是功能材料发展的一个重要趋势. 随着光电子技术的发展, 人们非常希望将一些能够产生激光跃迁的激活离子如  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  等掺入非线性晶体中, 或发现自身具有非线性性质的激光工作物质, 从而实现激光和非线性光学的功能复合, 形成激光自倍频复合功能晶体, 即自倍频晶体. 它能利用基质的非线性效应把激活离子受激辐射产生的基频光进行频率转换, 得到倍频光. 因此, 这类晶体必须具有非对称中心, 而且按照相位匹配方向加工.

1992 年, Norrestam 等首次合成了一族新型的硼酸盐晶体, 即  $\text{Ca}_4\text{REO}(\text{BO}_3)_3$  ( $\text{RE} = \text{La}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Y}^{3+}$ )<sup>[1]</sup>. 1997 年, Aka 等首次报道了  $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$  (GdCOB) 晶体的生长和结构, 以及线性、非线性光学性质<sup>[2]</sup>. 随后 Iwai 等报道了  $\text{Ca}_4\text{YO}(\text{BO}_3)_3$  (YCOB) 晶体的相应性质<sup>[3]</sup>. 由于这两种晶体在掺入  $\text{Nd}^{3+}$  后可获得自倍频性能, 因而近年来备受瞩目. 此外, Yoshimura 等证实 YCOB 中的  $\text{Y}^{3+}$  离子被不同比例的  $\text{Gd}^{3+}$  离子取代后, 将形成折射率连续变化的置换型固溶体  $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{COB}$ , 进而可实现非临界相位匹配波长的连续可调<sup>[4]</sup>. 本文总结了 GdCOB, YCOB 晶体的基本性质, 概述了上述晶体近年来的研究进展, 并对今后的发展方向进行了展望.

## 1 晶体性质

结构研究表明, GdCOB, YCOB 均属对称性较低的单斜晶系 (点群  $m$ 、空间群  $C_m$ ), 其主要性

2000-11-20 收稿, 2001-01-20 收修改稿

\* 国家自然科学基金重大项目 (批准号: 69890235) 和教育部科学技术研究重点项目 (批准号: 99182) 共同资助

\*\* E-mail: zshao@icm.sdu.edu.cn

质如表 1 所示<sup>[3,5,6]</sup>. 两种晶体都是同成分共融化合物,故可用提拉法生长,在较短时间内就可获得高光学质量的大体积单晶. 目前,我们实验室用一星期左右的时间,可稳定生长出  $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$  的无宏观缺陷的 GdCOB, YCOB 晶体. 其他几种常用的非线性光学晶体,如 KTP, LBO, BBO 等,都是用熔盐法生长,生长周期较长. YCOB 透射波长短至 200 nm,与 BBO 相当, GdCOB 的截止波长在数个强吸收峰的影响下推移至 350 nm. YCOB 主平面内的有效非线性系数为  $1.1 \text{ pm/V}$ , GdCOB 在  $(23^\circ, 20^\circ)$  方向的有效非线性系数可达  $1.3 \text{ pm/V}$ ,高于 LBO<sup>[3]</sup>. 两种晶体的双折射率都比较适中,有利于在较宽的范围内实现相位匹配. 根据它们的折射率拟合方程,通过计算可知 YCOB 的一类倍频截止波长为 723 nm,二类倍频截止波长为 1023 nm, GdCOB 的相应值分别为 831, 1205 nm. 而且 YCOB 晶体还可以实现 1064 nm 的三倍频,获得紫外输出<sup>[7]</sup>. GdCOB 的莫氏硬度达到 6.5,略低于石英(7),而高于 KTP(5), LBO(6), BBO(4),易于切割及抛光<sup>[2,8]</sup>. 此外, GdCOB, YCOB 具有光损伤阈值高、物化性能稳定、不潮解等特点,因而是一类非常优良的非线性光学晶体. 同 GdCOB, YCOB 一样,利用提拉法可方便地长出高质量 Nd:GdCOB, Nd:YCOB 晶体,从而使自倍频激光器的商业化成为可能. 作为传统的自倍频晶体, NYAB 虽有优良的性质,但难于生长阻碍了它的应用.

表 1 GdCOB, YCOB, BBO 和 LBO 的基本性质

晶体	参数						生长方法	化学稳定性
	相位匹配角 ( $\theta, \phi$ )/( $^\circ$ )	有效非线性 系数/ $\text{pm} \cdot \text{V}^{-1}$	走离角 / $\text{mrad}$	允许角 / $\text{mrad} \cdot \text{cm}$	透光范围 / $\text{nm}$	光损伤阈值 / $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$		
GdCOB	(90, 46)	0.70	13	2.2	350 ~ 2700	1.0 <sup>a)</sup>	提拉法	稳定
YCOB	(32, 0)	1.10	23	1.3	200 ~ 2700	18.4 <sup>b)</sup>	提拉法	稳定
BBO	(23, 90)	2.00	70	1.4	200 ~ 2600	1.0 <sup>a)</sup>	熔盐法	轻微潮解
LBO	(90, 12)	0.82	7	1.3	160 ~ 2600	1.0 <sup>a)</sup>	熔盐法	稳定

a) 532 nm, 6 ns; b) 1064 nm, 1.1 ns

## 2 发展现状

自从 GdCOB, YCOB 被发现以来,对该类化合物的生长和性能研究一直是非线性光学领域的热点. 在 2000 年 3 月召开的 CLEO (Conference on Lasers and Electro-Optics) 会议上,相关文献有 5 篇. 在 2000 年 9 月召开的欧洲 CLEO 会议上,相关文献达到 9 篇. 目前看来,法国的 Mougel 小组将工作重心放在 GdCOB 及其相关晶体的研究上<sup>[2,9~12]</sup>,美国的 Chai 小组则致力于 YCOB 及其相关晶体的研究<sup>[13~17]</sup>,而日本的 Yoshimura 小组更多关注混晶  $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{COB}$  的三倍频性质<sup>[4,7,18,19]</sup>,我国科研工作者在以上领域亦已做出不少开创性工作<sup>[20~25]</sup>. 以下分 4 个方面介绍该类晶体的发展现状.

### 2.1 倍频性质

非线性光学晶体的倍频性质主要取决于有效非线性系数的大小. 由于 GdCOB, YCOB 属对称性较低的单斜晶系,其非线性性质与 KDP, KTP, LBO, BBO 等晶体相比有明显差异. 邵宗书等<sup>[20]</sup>的理论计算指出, GdCOB, YCOB 晶体的最大有效非线性系数并不位于主平面或第 1 象限 ( $90^\circ > \theta > 0^\circ, 90^\circ > \phi > 0^\circ$ ) 内,而是位于第 2 象限 ( $180^\circ > \theta > 90^\circ, 90^\circ > \phi > 0^\circ$ ). 我们在进一步的实验中证实了该理论<sup>[21~23]</sup>. 在 Nd:YAG 激光的腔外倍频方面,  $(113.2^\circ, 47.4^\circ)$  切向的 GdCOB 转换效率达到 48%,  $(113^\circ, 36.5^\circ)$  切向的 YCOB 转换效率达到 42%;在腔内倍频方面,两种晶

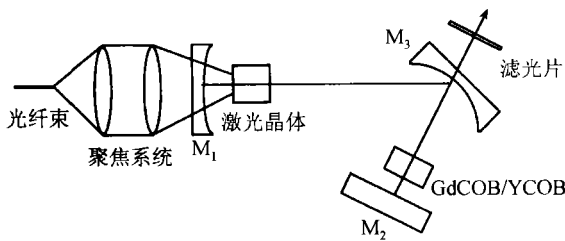


图 1 GdCOB, YCOB 腔内倍频装置图

$M_1$  为凹面全反镜,  $M_2$  为平面全反镜,  $M_3$  为绿光输出镜

体均获得了 W 级以上绿光, GdCOB 的 532 nm 输出达到 1.22 W, YCOB 达到 2.35 W, 实验装置如图 1 所示<sup>[21,22]</sup>。

我们的计算和实验还表明, 对 Nd:YAG 激光的三倍频而言, YCOB 的最佳切向也位于第 2 象限. 当输入功率密度为  $0.76 \text{ GW/cm}^2$  时, ( $106^\circ, 77.2^\circ$ ) 切向的 YCOB 晶体三倍频转换效率达到 26.2%, 具体实验过程将另文发表。

以上研究表明, GdCOB, YCOB 很适于用作

近红外光的频率转换器件。

### 2.2 自倍频性质

自倍频激光器与使用两块晶体的腔内倍频激光器相比, 具有紧凑、易调整、造价低等特点, 因而自问世以来倍受关注. 目前对 GdCOB, YCOB 系列晶体的研究主流, 是掺稀土离子后的自倍频性质. Nd:GdCOB, Nd:YCOB 有 3 条主要的荧光发射谱线, 即 1332, 1061, 936 nm, 其自倍频分别对应可见波段的红、绿、蓝光. 王长青等以钛宝石激光器为泵浦源, 利用图 2

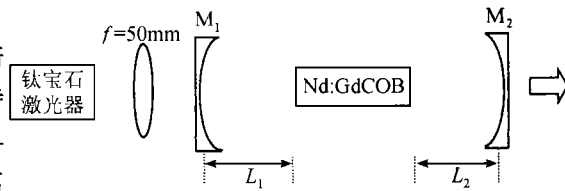


图 2 Nd:GdCOB 自倍频装置示意图

$f$  为聚焦镜的焦距,  $L_1$  为晶体前表面与全反镜  $M_1$  之间的距离 (8.5 mm),  $L_2$  为晶体后表面与输出镜  $M_2$  之间的距离 (6.5 mm)

所示的装置, 在 1.56 W 的输入功率下 530.5 nm 连续输出达到 225 mW, 转换效率为 14.4%, 阈值低至  $1.8 \text{ mW}$ <sup>[23]</sup>. Auge 等以 LD(激光二极管)泵浦 Nd:GdCOB, 当吸收泵浦功率为 1.25 W 时获得了 115 mW 的自倍频绿光<sup>[9]</sup>. 此外, 他们以脉冲钛宝石激光器为泵浦源, 实现了 Nd:GdCOB 的自倍频蓝光<sup>[10]</sup>. Ye 等用 Nd:YCOB 作为激光介质, 得到了 16 mW 的 666 nm 自倍频红光<sup>[13]</sup>。

### 2.3 混晶 $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{COB}$ 的非临界相位匹配

对双轴晶而言, 非临界相位匹配是指沿主轴方向相位匹配. 与临界相位匹配相比, 它具有容许角大、走离角为 0 的特点, 因而便于用长晶体提高倍频转换效率. Yoshimura 等的研究表明, 混晶  $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{COB}$  的晶格常数比随组分  $x$  的增加线性变化, 进而引起折射率的连续变化. 利用这一性质, 通过改变组分  $x$  就可实现不同波长的非临界相位匹配<sup>[4]</sup>. Burnester 等用  $z$  向切割的  $\text{Gd}_{0.84}\text{Y}_{0.16}\text{COB}$  晶体实现了 930 nm 的二倍频非临界相位匹配<sup>[26]</sup>. Furuya 等用  $y$  向切割的  $\text{Gd}_{0.28}\text{Y}_{0.72}\text{COB}$  晶体实现了 1064 nm 的三倍频非临界相位匹配, 实验结果如图 3 所示. 他们采用提高晶体温度的方法有效地避免了高功率下的光致损伤, 当基频功率

具有容许角大、走离角为 0 的特点, 因而便于用长晶体提高倍频转换效率. Yoshimura 等的研究表明, 混晶  $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{COB}$  的晶格常数比随组分  $x$  的增加线性变化, 进而引起折射率的连续变化. 利用这一性质, 通过改变组分  $x$  就可实现不同波长的非临界相位匹配<sup>[4]</sup>. Burnester 等用  $z$  向切割的  $\text{Gd}_{0.84}\text{Y}_{0.16}\text{COB}$  晶体实现了 930 nm 的二倍频非临界相位匹配<sup>[26]</sup>. Furuya 等用  $y$  向切割的  $\text{Gd}_{0.28}\text{Y}_{0.72}\text{COB}$  晶体实现了 1064 nm 的三倍频非临界相位匹配, 实验结果如图 3 所示. 他们采用提高晶体温度的方法有效地避免了高功率下的光致损伤, 当基频功率

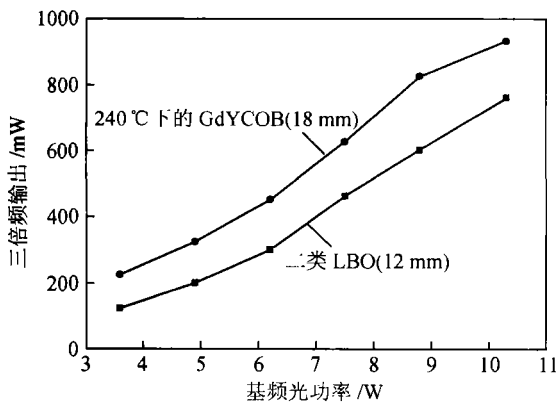


图 3  $\text{Gd}_{0.28}\text{Y}_{0.72}\text{COB}$ , LBO 的三倍频输出随基频输入的变化关系

为 10.3 W 时, 355 nm 紫外输出达到 0.93 W, 这一结果已经可与 LBO 相比<sup>[18]</sup>.

## 2.4 其他研究

以波长为 829.6 nm 的钛宝石激光泵浦 Nd:GdCOB, 通过自和频实现了大于 1 mW 的 465 nm 蓝光输出<sup>[11]</sup>. 用 Nd:GdCOB 制成的微片激光器 2 W 泵浦下基频(波长  $\lambda = 1061$  nm)输出 150 mW, 自倍频输出 22 mW, 并观察到自和频现象<sup>[12]</sup>. 张树君等利用  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  饱和吸收体作为被动调 Q 器件, 在 Nd:GdCOB 的实验中得到脉宽 85 ns、重复率 170 kHz、能量 2.5 mJ 的调 Q 脉冲输出<sup>[27]</sup>.

Yb:GdCOB, Yb:YCOB 的吸收峰位于 976 nm, 荧光发射从 1020 nm 延伸到 1080 nm, 峰值位于 1040 nm 附近. 实验证实, 它们是非常优良的激光晶体, 斜效率可以达到 77%, 并且有望实现频率可调谐的自倍频绿光输出<sup>[28]</sup>. 目前, Yb:GdCOB 的 1043 nm 连续输出已达 3.2 W, 斜效率 68%, 光转换效率 38%, 并实现了 90 fs 的 LD 泵浦被动锁模<sup>[29,30]</sup>.

此外, 在 GdCOB, YCOB 中掺入其他离子, 以实现改性目的的研究也有不少<sup>[24,25,31-33]</sup>.

## 3 前景展望

虽然高质量 GdCOB, YCOB 的生长已不成问题, 但是人们对其非线性性质的认识仍待完善. 在考虑了 Kleimann 对称性之后, GdCOB, YCOB 的独立非线性系数仍有 6 个之多, 全部实验标定有一定难度, 但有助于准确判断整个空间内有效非线性系数的分布. 我们已经开展了这项工作, 它不仅指明了此类晶体的最佳二倍频、三倍频方向, 而且将进一步用于掺  $\text{Nd}^{3+}$  晶体最佳自倍频方向的推断.

Nd:GdCOB, Nd:YCOB 具有两个不利于自倍频输出的性质, 即激光发射截面小、热导率低, 如表 2 所示<sup>[34,35]</sup>. Nd:RCOB 的最大发射截面为  $0.42 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ , 小于 NYAB, 更无法与 Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub> 相比. 即便是如此小的发射截面也无法被充分利用, 因为发射截面的最大值位于主轴上, 而自倍频晶体必须沿偏离主轴的相位匹配方向切割. 大功率激光器对激光晶体的基本要求之一, 就是要有较高的热导率. Nd:RCOB 的热导率仅为  $2.1 \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 对自倍频输出的提高十分不利. 根据这两个性质可以预言, Nd:GdCOB, Nd:YCOB 的主要发展方向将是实用化的中、小功率自倍频激光器. 在这种情况下, 同时考虑非线性性质与激光性质, 在整个空间内寻找最佳自倍频方向, 并对激光谐振腔进行优化设计, 将是十分迫切和必要的.

不同激光器的输出波长不同, 改变  $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{COB}$  晶体的组分  $x$ , 可实现这些波长的非临界相位匹配. 确定各晶轴上可实现非临界匹配的波长范围, 以及相应非线性系数的大小, 具有重要的实际意义. 我们在生长实践中发现, 生长高光学质量的  $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{COB}$  晶体并不容易, 而且晶体中的组分  $x$  与配料和生长条件都有密切关系. 探讨生长条件对组分的影响, 提高晶体质量, 是该晶体走向实用化的基础.

## 4 结论

低对称性非线性光学晶体 GdCOB, YCOB 以及  $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{COB}$  非常适用于近红外激光的频率

表 2 不同晶体发射截面及热导率的比较

晶体	发射截面 $\times 10^{-19}/\text{cm}^2$	热导率 $/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Nd:RCOB	0.4	2.1
NYAB	2.0	3.0
Nd:YAG	2.8	13.0
Nd:YVO <sub>4</sub>	15.6	5.1

转换. Nd:GdCOB, Nd:YCOB 是具有实际应用前景的激光自倍频晶体. 对于上述晶体非线性性质的进一步研究, 将有助于输出功率及转换效率的继续提高, 从而充分发掘该类晶体在相关非线性应用中的潜力, 推进实用化进程. 相信该研究对于其他低对称性非线性晶体的开发也将具有借鉴作用.

### 参 考 文 献

- 1 Norrestam R, et al. Structure investigations of new calcium-rare earth (R) oxyborates with the composition  $\text{Ca}_4\text{RO}(\text{BO}_3)_3$ . *Chem Mater*, 1992, 4(6): 737
- 2 Aka G, 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
- 3 Iwai M, et al. Crystal growth and optical characterization of rare-earth 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, 36(3A): L276
- 4 Yoshimura M, et al. Noncritically phase-matched frequency conversion in  $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  crystal. *Opt Lett*, 1999, 24(4): 193
- 5 Yoshimura M, et al. Crystal growth and optical properties of yttrium calcium oxyborate  $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ . *OSA TOPS Advanced Solid State Lasers*, 1998, 19: 561
- 6 Aka G, et al. A new non-linear and neodymium laser self-frequency doubling crystal with congruent melting:  $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$  (GdCOB). *Eur J Solid State Inorg Chem*, 1996, 33: 727
- 7 Yoshimura M, et al. New nonlinear optical crystal GdYCOB for noncritically phase-matched UV generation. *CLEO'99, Techn Dig, CFF2*: 529
- 8 Dmitriev V G, et al. *Handbook of Nonlinear Optical Crystals*. Second revised and updated edition, Berlin: Springer, 1997. 283
- 9 Auge F, et al. Efficient self-frequency-doubling Nd:GdCOB crystal pumped by a high brightness laser diode. *Advanced Solid-State Lasers*, 1999, Paper MF7-1: 185
- 10 Auge F, et al. Self-frequency doubling of the 936 nm line in Nd:GdCOB. Washington D C: Optical Society of America, *CLEO'2000, CThM8*: 154
- 11 Mougel F, et al. CW blue laser generation by self-sum frequency mixing in Nd:  $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$  (Nd:GdCOB) single crystal. *Opt Mater*, 1999, 13(3): 293
- 12 Frederika Aug, et al. Towards visible microchip lasers based on Nd:Gd  $\text{Ca}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ . *CLEO'2000, CMD5*: 72
- 13 Ye Q, et al. Investigation of diode-pumped, self-frequency doubled RGB lasers from Nd:YCOB crystals. *Opt Comm*, 1999, 164: 33
- 14 Ye Q, et al. Crystal growth of  $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  and its orientation. *J Crystal Growth*, 1999, 197: 228
- 15 Jiang W K, et al. Second harmonic generation in Yb doped  $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ . *Opt Comm*, 1998, 155: 332
- 16 Eichenholz J M, et al. Diode-pumped self-frequency doubling in a  $\text{Nd}^{3+}:\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  laser. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(14): 1954
- 17 Shah L, et al. Laser tunability in  $\text{Yb}^{3+}:\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  (Yb:YCOB). *Opt Comm*, 1999, 167: 149
- 18 Furuya H, et al. Alleviation of photoinduced damage in  $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  at elevated crystal temperature for noncritically phase-matched 355 nm generation. *Opt Lett*, 2000, 25(21): 1588
- 19 Furuya H, et al. Crystal growth and characterization of  $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  crystal. *J Crystal Growth*, 1999, 198/199: 560
- 20 Shao Zongshu, et al. Anisotropic properties of Nd:ReCOB (Re = Y, Gd): a low symmetry self-frequency doubling crystal. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2000, 40: 63
- 21 Zhengping Wang, et al. The second-harmonic-generation property of  $\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  crystal with various phase-matching directions. *Opt Comm*, 2001, 187: 401
- 22 Liu Junhai, et al. Investigation on intracavity second-harmonic generation at 1064 nm in YCOB by using an end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser. *Opt Comm*, 2000, 182: 187
- 23 Wang C Q, et al. Efficient self-frequency doubling of Nd:GdCOB crystal by type-I phase matching out of its principal planes. *Opt Comm*, 2000, 174: 471

- 24 Zhang Shujun, et al. Growth and second-harmonic-generation of  $\text{Bi}^{3+}$  or  $\text{Li}^+$  doped  $\text{GdCOB}$  crystals. *J Crystal Growth*, 2000, 212: 476
- 25 Zhang shujun, et al. Effect of strontium ion on the growth and second-harmonic generation properties of  $\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  crystal. *Chin Phys Lett*, 2001, 18(1): 63
- 26 Burmester P B W, et al. Type-I non-critically phase-matched second-harmonic generation in  $\text{Gd}_{1-x}\text{Y}_x\text{Ca}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ . *Appl Phys B*, 1999, 68: 1143
- 27 Zhang Shujun, et al. A new oxyborate crystal,  $\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ : defects and optical properties. *Defect and Diffusion Forum*, 2000, 186-187: 79
- 28 Druon F, et al. Efficient, tunable, zero-line diode-pumped continuous-wave  $\text{Yb}:\text{Ca}_4\text{LnO}(\text{BO}_3)_3$  ( $\text{Ln} = \text{Gd}, \text{Y}$ ) lasers at room temperature and application to miniature lasers. *J Opt Soc Am B*, 2000, 17(1): 18
- 29 Chenais S, et al. 3-W diode-pumped, tunable, CW  $\text{Yb}:\text{GdCOB}$  laser. *CLEO/EUROPE'2000*, CMA3: 32
- 30 Druon F, et al.  $\text{Yb}:\text{GdCOB}$ , a new crystal for sub-100-fs diode-pumped lasers. *CLEO/EUROPE'2000*, CMA1: 32
- 31 Dominiak-Dzik G, et al. Optical investigation of  $\text{Eu}^{3+}$  and  $\text{Tm}^{3+}$  in the  $\text{GdCOB}$  crystal. *CLEO/EUROPE'2000*, CWF19: 72
- 32 Boudrioua A, et al. Frequency doubling in ion-implanted  $\text{GdCOB}$ , planar waveguides. *CLEO'2000*, CtuA11: 96
- 33 Huaijin Zhang, et al. Growth, spectroscopic properties and laser output of  $\text{Er}:\text{Ca}_4\text{YO}(\text{BO}_3)_3$  and  $\text{Er}:\text{Yb}:\text{Ca}_4\text{YO}(\text{BO}_3)_3$  crystals. *J Crystal Growth*, 2000, 218: 81
- 34 Mougel F, et al. Infrared laser performance and self-frequency doubling of  $\text{Nd}:\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$  ( $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ ). *Opt Mater*, 1997, 8: 161
- 35 Scheps R, et al. High-efficiency 1.06  $\mu\text{m}$  output in a monolithic  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  laser. *Applied Optics*, 1994, 33 (24): 5546