

文章编号: 1001-3806(2007)03-0246-04

## CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> 晶体的宽带三倍频模拟分析

杨义胜<sup>1,2</sup>, 郑万国<sup>2</sup>, 韩伟<sup>2</sup>, 马驰<sup>2</sup>, 谭吉春<sup>\*</sup>

(1. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

**摘要:** 为了研究高效的宽带三次谐波转换技术, 采用了分步傅里叶变换和四阶龙格-库塔法对 CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> (CLBO) 晶体的宽带三倍频过程进行了数值模拟, 分析了单倍单混和单倍双混模式下三倍频转换效率随入射基频光强度、频谱带宽的变化关系, 并与 KDP 晶体的宽带三倍频转换特性进行了对比。在强度为 3GW/cm<sup>2</sup> 的 40 阶超高斯脉冲入射下, 得到单倍双混模式下三倍频转换效率达到 60% 时对应的频谱宽度为 650GHz。这与利用 KDP 晶体在相同条件下获得的频谱宽度相比, 提高了近 250GHz。研究结果表明, 在单倍双混模式下使用 CLBO 晶体作为频率转换的非线性晶体可以有效地提高宽带三倍频的转换效率。

**关键词:** 非线性光学; 宽带三倍频; 晶体级联; CLBO 晶体

中图分类号: O437.1 文献标识码: A

## Numerical analysis of broadband third-harmonic generation using CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> crystals

YANG Yi-sheng<sup>1,2</sup>, ZHENG Wan-guo<sup>2</sup>, HAN Wei<sup>2</sup>, MA Chi<sup>2</sup>, TAN Ji-chun<sup>1</sup>

(1. College of Photoelectric Science Engineering National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** To study the efficient broadband third-harmonic generation (THG) technology, the process in CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> (CLBO) crystals was studied through numerical simulation based on split-step Fourier transformation and the fourth-order Runge-Kutta method. The dependence of conversion efficiency on input intensity and bandwidth of 1 $\omega$  waves was analyzed in type I/type II and type I/type II/type I quadrature schemes respectively. As a comparison, broadband THG in KDP crystals was also investigated. Conversion efficiency up to 60% with a bandwidth of 650GHz was achieved in the type I/type II/type I quadrature scheme while the temporal profile of 1 $\omega$  was assumed to be super-Gaussian (40 exponent) with an intensity of 3GW/cm<sup>2</sup>. An increase of 250GHz was accomplished in CLBO crystals compared with that in KDP crystals. The obtained results show that broadband THG conversion efficiency can be improved available in the type I/type II/type I quadrature scheme with CLBO crystals.

**Key words** nonlinear optics; broadband THG; cascaded crystals; CLBO crystals

### 引 言

在惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 研究中, 为了满足靶对能量的有效吸收以及束靶耦合等物理方面的要求, 需要使用宽带的短波长激光进行打靶。目前, 世界上在 ICF 高功率固体激光装置中用于高效谐波转换的非线性晶体基本上都为 KDP 晶体, 然而由于 KDP 晶体的非线性系数较小、群速失配大和吸收系数大等缺点, 使在即使采取诸如多块晶体级联<sup>[1]</sup>、光谱角色散补偿<sup>[2]</sup>和啁啾匹配<sup>[3,4]</sup>等方法后, 宽带三次谐波转换效率仍不能有一定的提高。非线性晶

体 CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> (CLBO) 具有非线性系数大、激光损伤阈值高、吸收系数小以及光谱接受带宽大等一系列优点, 且能生长出适用于高功率激光的大尺寸优质单晶<sup>[5,6]</sup>, 目前, 国外已有利用 CLBO 晶体进行强激光三倍频的实验报道<sup>[7]</sup>。作者利用 CLBO 晶体作为谐波转换的非线性晶体, 分别采用 I / II 类角度失谐的单倍单混模式和 I / II / I 类晶体级联的单倍双混模式对在高功率激光条件下三倍频转换过程进行了数值模拟, 分析了入射基频光光强和频谱带宽对三倍频转换效率的影响, 并与 KDP 晶体的相关特性进行了比较。

### 1 CLBO 晶体的 NLO 性质

非线性晶体 CLBO 是负单轴晶体, 属于四方晶系, 空间群为  $D_{2d} - \bar{4}2m$ 。其透光波段为 175nm ~ 2750nm, 激光损伤阈值高达 24GW/cm<sup>2</sup> ~ 26GW/cm<sup>2</sup>。其非线性

作者简介: 杨义胜 (1982-), 男, 硕士研究生, 现从事非线性光学方面的研究。

\* 通信联系人。E-mail: tan4573290@163.com

收稿日期: 2006-03-31; 收到修改稿日期: 2006-04-29

性系数  $d_{36}$  (CLBO) 是 KDP 晶体非线性系数  $d_{36}$  (KDP) 的 2.2 倍, 约为  $0.95 \text{ pm/V}$  ( $1064 \text{ nm}$ ); 吸收系数为  $0.026/\text{cm}$  ( $1064 \text{ nm}$ ) 和  $0.025/\text{cm}$  ( $532 \text{ nm}$ )<sup>[8]</sup>。

## 2 谐波转换基本理论模型

采用 I / II 类角度失谐的单倍单混<sup>[9]</sup>和 I / II / I 类晶体级联的单倍双混<sup>[10]</sup>两种模式实现对 CLBO 晶体的宽带三倍频输出, 其中后者只在前者的基础上增加 1 块 I 类混频晶体。I 类混频晶体和 II 类混频晶体光轴平行放置, 并在 I, II 类混频晶体之间增加 1 块波片, 用于将  $1\omega, 3\omega$  的 e 光转换为 o 光, 而不转换  $2\omega$  的偏振态, 最终使得入射到 I 类混频晶体上的基频光、倍频光和三倍频光均为 o 光<sup>[10]</sup>, 实现在 I 类混频晶体中的频率转换 (见图 1)。

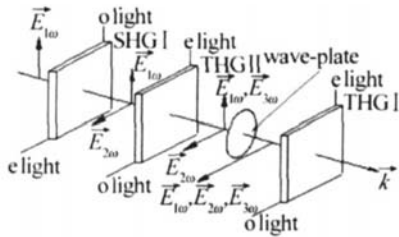


Fig 1 Configuration of broadband frequency tripling using I / II / I scheme

由于在大口径宽带谐波转换过程中, 横向衍射和走离效应的影响相对都比较小, 因此, 本文中忽略它们的影响, 而主要考虑群速度失配和吸收效应等因素, 则表示宽带谐波转换的瞬态耦合波方程可以简化为:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_1} \frac{\partial}{\partial t} + 0.5\alpha_1 \right] E_1(z, t) = \frac{i\omega_1 d_{\text{eff}}}{n_1 c} E_3(z, t) E_2^*(z, t) \exp(i\Delta k_0 z) \quad (1)$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_2} \frac{\partial}{\partial t} + 0.5\alpha_2 \right] E_2(z, t) = \frac{i\omega_2 d_{\text{eff}}}{n_2 c} E_3(z, t) E_1^*(z, t) \exp(i\Delta k_0 z) \quad (2)$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_3} \frac{\partial}{\partial t} + 0.5\alpha_3 \right] E_3(z, t) = \frac{i\omega_3 d_{\text{eff}}}{n_3 c} E_1(z, t) E_2(z, t) \exp(-i\Delta k_0 z) \quad (3)$$

式中,  $E_i, n_i, v_i$  和  $\alpha_i$  分别为对应频率  $\omega_i$  处的复振幅、折射率、群速度和吸收系数 (在混频过程中, 下标  $i = 1, 2, 3$  分别表示基频光、倍频光和三倍频光; 在倍频过程中  $i = 1, 2$  均表示基频入射光,  $i = 3$  表示倍频光);  $d_{\text{eff}}$  为有效非线性系数;  $\Delta k_0$  为相位失配量,  $c$  为真空中光速。

## 3 数值模拟与对比分析

采用目前广泛使用的分步傅里叶变换和四阶龙

格-库塔法对上述耦合波方程进行数值模拟<sup>[11]</sup>。入射基频光采取空间分布为平面波, 时间分布为高斯脉冲的形式, 宽带由时间相位调制进行模拟<sup>[11, 12]</sup>, 则光场分布表达式可表为:

$$E(t) = E_0 \exp\left[-\frac{t^2}{T^2}\right] \exp\{-i[\omega_0 t + \varphi(t)]\} \quad (4)$$

式中, 振幅  $E_0$  由初始入射光强  $I_0$  得到,  $E_0 = (2I_0 / n_{1\omega} \epsilon_0 c)^{1/2}$ ;  $T$  为高斯脉冲的脉宽, 取为  $1 \text{ ns}$ ;  $\omega_0$  为入射基频光中心频率, 取为  $1.053 \mu\text{m}$ ; 时间相位调制项  $\varphi(t)$  用函数  $\sigma \sin 2\pi \Omega t$  表示, 对应半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 为  $2\sigma \Omega$ , 其中  $\sigma$  为调制深度,  $\Omega$  为调制频率。本文中固定调制频率  $\Omega = 25 \text{ GHz}$  不变, 通过改变调制深度  $\sigma$  的值来改变频谱带宽。

### 3.1 I / II 类单倍单混模式

对于 CLBO 晶体的 I / II 类单倍单混模式, I 类倍频晶体以相位匹配角  $\theta_n = 29.37^\circ$ , 方位角  $\phi = 45^\circ$  切割, 角度失谐  $\delta\theta$  有效非线性系数  $d_{\text{eff}}$  表示为  $-d_{36} \times \sin(\theta_n + \delta\theta) \sin 2\phi$ ; II 类混频晶体以相位匹配角  $\theta_n = 49.62^\circ$ , 方位角  $\phi = 0^\circ$  切割, 角度不失谐, 有效非线性系数  $d_{\text{eff}}$  表示为  $d_{36} \sin 2\theta_n \cos 2\phi$ , 其中忽略了频率对非线性系数  $d_{36}$  的微小影响, 均为  $0.95 \text{ pm/V}$ ; 对基频光、倍频光和三倍频光的吸收系数分别取为  $0.026/\text{cm}$ ,  $0.025/\text{cm}$  和  $0/\text{cm}$ 。

经过优化, 得到最佳参数为倍频晶体厚度  $5.7 \text{ mm}$ , 角度失谐  $450 \mu\text{rad}$ , 混频晶体厚度  $3.1 \text{ mm}$ , 角度不失谐。图 2 为在不同的入射基频光频谱带宽情况下三倍

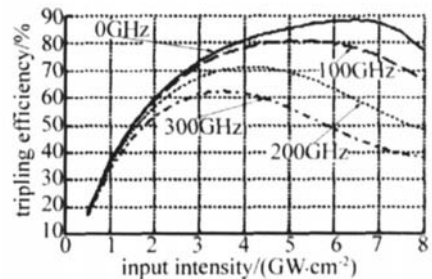


Fig 2 Tripling efficiency of CLBO as a function of fundamental input intensity at different bandwidth using I / II scheme

频转换效率随入射基频光强度的变化曲线 (即强度动态范围曲线), 4 条曲线从上至下分别对应频谱带宽为  $0 \text{ GHz}$ ,  $100 \text{ GHz}$ ,  $200 \text{ GHz}$  和  $300 \text{ GHz}$  的情况。从图中可以看出, 随着入射基频光带宽的增加, 三倍频效率有明显下降的趋势, 这是由于随着带宽的增加, 相位匹配条件和群速度匹配条件愈无法同时满足, 从而使得相位失配量愈大的缘故。而为了突出 CLBO 晶体的优越性, 在图 3 中给出了 CLBO 晶体与 KDP 晶体<sup>[10]</sup> 在  $0 \text{ GHz}$  和  $300 \text{ GHz}$  带宽下的强度动态范围曲线对比。从图中可以看出, 在窄带入射基频光情况下, CLBO 晶

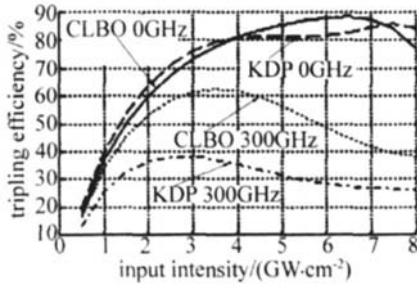


Fig 3 Tripling efficiency of CLBO and KDP as a function of fundamental input intensity at 0GHz and 300GHz using I / II scheme

体与 KDP 晶体的三倍频转换效率相差很小, 所能达到的三倍频转换效率也相近; 但在 300GHz 的宽带情况下, CLBO 晶体的三倍频转换效率明显高于 KDP 晶体的三倍频效率, 其中最大效率之间甚至提高了 20% 多。这主要是由于 CLBO 晶体的非线性系数比 KDP 晶体大(约 2.2 倍), 使得在相同的入射条件和三倍频转换效率要求下 CLBO 晶体的厚度可以更薄, 从而使 CLBO 晶体的光谱接受带宽比 KDP 晶体的光谱接受带宽更宽, 也即对于频谱带宽很宽的入射基频光, CLBO 晶体的三倍频转换效率可以更高。

### 3.2 I / II / I 类单倍双混模式

由于通过单倍单混模式所获得的频谱带宽仍不能满足打靶实验的物理要求, 因此, 为了在更大的带宽范围内获得高的三倍频转换效率, 作者采用了 I / II / I 类晶体级联方案, 即在上述的 I / II 类角度失谐模式之后增加一块 I 类混频晶体。该晶体以晶体匹配角  $\theta_m = 39.45^\circ$ , 方位角  $\phi = 45^\circ$  切割, 角度不失谐, 其有效非线性系数  $d_{eff} = -d_{36} \sin\theta_m \sin 2\phi$ 。经过优化, 得到 I / II / I 类单倍双混模式的最佳参数为倍频晶体厚度 5.7mm, 角度失谐  $450\mu\text{rad}$  前后两块混频晶体厚度分别为 2.2mm 和 5mm, 角度不失谐。

图 4 中给出了在 I / II / I 类晶体级联的单倍双混模式下 CLBO 晶体的三倍频转换效率随入射基频光

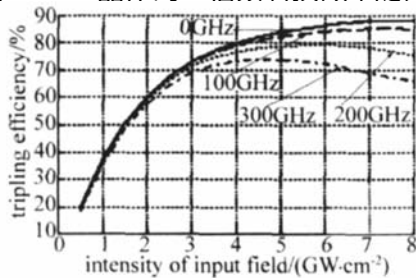


Fig 4 Tripling efficiency of CLBO versus fundamental input intensity for different bandwidth using I / II / I scheme

强度的变化曲线, 图中曲线从上到下分别对应频谱宽度为 0GHz、100GHz、200GHz 和 300GHz 的情况。从图 4 与图 2 的对比中可以看到, 在单倍双混的模式下显著地提高了三倍频的转换效率, 尤其在频谱宽度较宽的情况下。如图中当频谱带宽为 300GHz 时, 在基频

光强度大于  $4\text{GW}/\text{cm}^2$  后, 单倍双混模式下三倍频转换效率比单倍单混模式下提高了 10% ~ 20% 之多。这主要是由于通过两块相位匹配方式不同的混频晶体的级联, 使得一部分不符合第 1 块 II 类混频晶体相位匹配角的基频光、倍频光在第 2 块 I 类混频晶体中达到相位匹配, 从而在宽带激光入射情况下较高的三倍频转换效率。为了更直观地凸显 I / II / I 类单倍双混模式相对于单倍单混模式的优越性, 图 5 中分

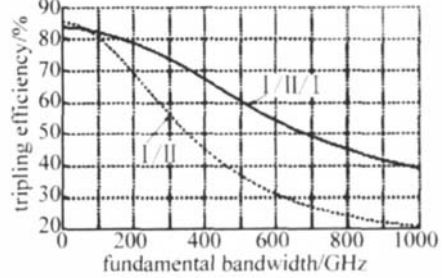


Fig 5 Tripling efficiency of CLBO versus fundamental input bandwidth using I / II / I scheme and I / II / I scheme

别给出了采用 I / II 类单倍单混模式(倍频晶体  $5.7\text{mm}/450\mu\text{rad}$  混频晶体  $3.1\text{mm}/0\mu\text{rad}$ )和 I / II / I 类单倍双混模式(倍频晶体  $5.7\text{mm}/450\mu\text{rad}$  前后两块混频晶体  $2.3\text{mm}/0\mu\text{rad}$ ,  $5\text{mm}/0\mu\text{rad}$ )时, 得到的三倍频转换效率随入射基频光频谱宽度的变化曲线, 其中入射基频光强度为  $5\text{GW}/\text{cm}^2$ 。从图中可以得知, 当频谱宽度较宽时, 单倍双混模式下的三倍频转换效率比单倍单混模式下的值提高了 20% 之多。

图 6 中上下两条曲线分别为 CLBO 晶体与 KDP 晶体在单倍双混模式下三倍频转换效率随带宽的变化

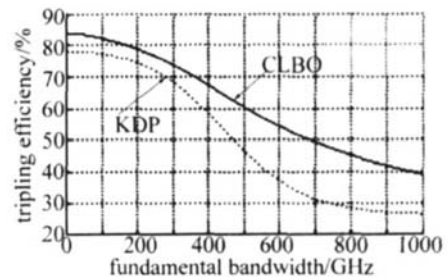


Fig 6 Tripling efficiency of CLBO and KDP versus fundamental input bandwidth using I / II / I scheme

关系, 其中入射基频光强度为  $5\text{GW}/\text{cm}^2$ 。可以看出, CLBO 晶体的三倍频转换效率整体上比 KDP 晶体要高, 而在带宽较大时较为明显。图 7 为当入射基频光时间分布为 40 阶超高斯脉冲, 光强为  $3\text{GW}/\text{cm}^2$  情况时, 在单倍单混模式(倍频晶体  $5.7\text{mm}/350\mu\text{rad}$  混频晶体  $3.5\text{mm}/0\mu\text{rad}$ )和单倍双混模式(倍频晶体  $5.7\text{mm}/350\mu\text{rad}$  前后两块混频晶体  $2.5\text{mm}/0\mu\text{rad}$ ,  $5\text{mm}/0\mu\text{rad}$ )下三倍频转换效率随频谱宽度的变化关系, 发现在单倍双混模式下三倍频转换效率为 60% 时对应的频谱带宽高达 650GHz。而在美国 EMERL 等

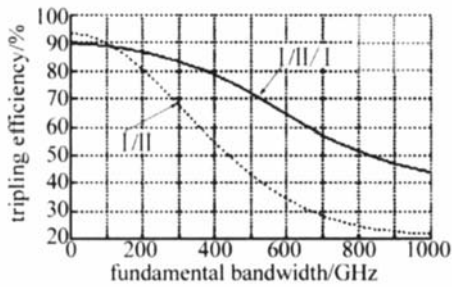


Fig 7 Tripling efficiency of CLBO versus fundamental input bandwidth using I/II scheme and I/II/I scheme, the input temporal profile is superGaussian (40 exponent)

人<sup>[12]</sup>对频率转换晶体为 KDP 晶体时采用 I/II/I 类单倍双混模式所得的曲线中,在相同的入射条件下三倍频转换效率为 60% 时所对应的频谱宽度只有约 400GHz,比利用 CLBO 晶体时小了 250GHz 左右。

#### 4 小结

对比分析了 CLBO 晶体和 KDP 晶体在单倍单混模式和单倍双混模式下三倍频转换效率随入射基频光光强和频谱带宽的变化规律。从模拟结果中可以看出,对于频率转换非线性晶体为 CLBO 晶体时,无论在单倍单混还是单倍双混模式下,所获得的宽带下的三次谐波转换效率比在相同模式和相同入射基频光条件下频率转换晶体为 KDP 晶体时要高,也即对于一定带宽的基频光入射,利用 CLBO 晶体可以获得更高的转换效率。

#### 参 考 文 献

[1] BABUSHKIN A, CRAXTON R S, OSKOUIS *et al*. Demonstration of

the dual-Trippler scheme for increased bandwidth third-harmonic generation [J]. *Opt Lett* 1998, 23(12): 927~929.

- [2] SKELDON M D, CRAXTON R S, KESSLER T J *et al*. Efficient harmonic generation with a broad band laser [J]. *IEEE JQE*, 1992, 28(5): 1389~1399
- [3] OSVAY K, ROSS I N. Broadband sum-frequency generation by chirp-assisted group-velocity matching [J]. *JOSA*, 1996, B13(7): 1431~1438
- [4] QIAN L J. Chirp matched third harmonic conversion for broad-band lasers [J]. *Acta Optics Sinica* 1995, 15(6): 662~667 (in Chinese).
- [5] MORIY, KURODA I, NAKA J M A S *et al*. New nonlinear optical crystal cesium lithium borate [J]. *APL*, 1995, 67(13): 1818~1820
- [6] ZHANG X R, ZHANG Sh X, CHAI Y. Harmonic generation in a new nonlinear crystal CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2000, 27(7): 669~672 (in Chinese).
- [7] KIRIYAMA H, NOUEN, YAMAKAWA K. High energy second-harmonic generation of Nd: glass laser radiation with large aperture CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> crystals [J]. *Optics Express* 2002, 10(19): 1028~1032
- [8] ZHANG K C, WANG X M. Nonlinear optical crystal material science [M]. Beijing Science Press, 2005, 236~240 (in Chinese).
- [9] BIG J, CAIBW, YANG Ch L *et al*. The analysis of the third harmonic generation schemes for CF drivers [J]. *Laser Technology*, 1999, 23(5): 304~308 (in Chinese).
- [10] LIK, ZHANG B, YUAN X D *et al*. Optimizing parameters of third harmonic generation of broadband laser using cascade crystals [J]. *High Power Laser And Particle Beams* 2005, 17(7): 995~999 (in Chinese).
- [11] M LONN I P W, AUERBACH J M, EMERL D. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams [J]. *Proc SPIE*, 1997, 2622, 230~241
- [12] EMERL D, AUERBACH J M, BARKER C E *et al*. Multicrystal designs for efficient third-harmonic generation [J]. *Opt Lett* 1997, 22(16): 1208~1210.

• 简 讯 •

### TEM<sub>00</sub>模连续倍频绿光激光器及应用

德国的 ELS Elektronik Laser System 公司最近研制出二极管抽运薄片 Yb:YAG 激光器,通过 LBO 非线性晶体倍频,输出波长 515nm 的绿光,连续输出功率大于 50W,TEM<sub>00</sub>模,光束质量  $M^2 < 1.1$ 。而按传统方法设计的倍频固体激光器,其输出功率只有它的一半。

这种新型的倍频激光器中激光介质 Yb:YAG 薄片只有约 150μm 厚,纵向抽运、纵向冷却,具有非常好的散热条件。由于没有热透镜效应,即使是在较高的抽运功率下,仍然很容易获得高功率 TEM<sub>00</sub>模激光输出,并且可以长时间稳定工作。为了得到高的倍频转换效率,除采用非线性系数大的 LBO 倍频晶体外,还采用了双 Z 字型谐振腔和温控非临界相位匹配等技术。这种二极管抽运薄片 Yb:YAG 倍频固体激光器的成本低、可靠性高,抽运用的 940nm 二极管半导体激光器的寿命超过 40000h 可以满足工业应用的要求。

在工业加工中应用的固体激光器大都是 1μm 的近红外波长,很多金属和非金属对这种波长的反射率较高,例如铜和金等金属材料,反射率高于 98%,只有很少一部分激光功率被材料吸收。而使用 515nm 波长,铜的吸收系数大于 30%。因此,倍频激光器非常适合于材料加工和半导体工业。与脉冲激光器相比,其工作在连续波状态,激光辐射均匀性好,参数控制方便,从而可以保证材料加工的质量。

(曹三松 供稿)