

## LBO 的腔内倍频特性研究

蔡添志<sup>1</sup>, 许惠英<sup>2</sup>, 王晓忠<sup>2</sup>, 黄朝红<sup>2</sup>, 石梦静<sup>1</sup>, 庄昌辉<sup>1</sup>, 蔡志平<sup>2</sup>

(1.厦门大学 物理系, 福建 厦门 361005; 2.厦门大学 电子工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 从倍频转换效率公式和腔内倍频的稳定态条件出发, 得到倍频波的功率密度公式, 进而得出倍频晶体最佳长度和倍频波最大功率密度的表达式。以 LBO 晶体 类临界相位匹配腔内倍频 946 nm 为例, 根据倍频波的功率密度公式, 从理论上讨论了 LBO 长度、功率密度比对倍频波功率密度的影响, 为 LBO 倍频产生 473 nm 蓝光实验提供了理论指导。虽然这里只是讨论了 LBO 类临界相位匹配倍频 946 nm, 但对所有腔内倍频实验 (不同倍频晶体或不同倍频频率) 具有借鉴作用。

**关键词:** 腔内倍频; LBO; 类临界相位匹配

**中图分类号:** O437 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2007)增(激光)0071-04

## Intracavity frequency doubling characteristic of LBO

CAI Tian-zhi<sup>1</sup>, XU Hui-ying<sup>2</sup>, WANG Xiao-zhong<sup>2</sup>, HUANG Chao-hong<sup>2</sup>, SHI Meng-jing<sup>1</sup>,  
ZHUANG Chang-hui<sup>1</sup>, CAI Zhi-ping<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** By the use of the formula for SHG conversion efficiency and the steady-state condition for intracavity frequency doubling, the expression for second-harmonic power density was obtained, and then the optimum length of the nonlinear crystal and the maximum second-harmonic power density were calculated. Taking LBO (cut for type-I critical phase matching) intracavity frequency doubling 946 nm as an example, how second-harmonic power density changing with the length of LBO and the ratio of power densities were discussed, which can conduct us well in the 473 nm blue laser experiment, and is of important reference for all the intracavity frequency doubling experiments (different non-linear crystal or different doubling frequency).

**Key words:** Intracavity frequency doubling; LBO; Type-I critical phase matching

## 0 引言

1961 年, Frank 发现红宝石激光束通过石英时, 能够产生 2 倍于该光束频率的紫外光。从此非线性光学领域成为激光领域的研究热点之一, 而倍频则是其

中最基本、最典型、应用最为广泛的技术。温度、长度、基波功率密度等各因素对倍频晶体转换效率的影响已经有比较深入的研究, 并有效地指导了倍频实验, 倍频输出功率不断提高<sup>[1-3]</sup>。笔者所在的课题组在福建省科技计划重大项目和厦门大学科技创新项

**收稿日期:** 2007-04-30

**基金项目:** 福建省科技计划重大项目(2004HZ01-1-3); 厦门大学科技创新项目(XDKJCX20041003)

**作者简介:** 蔡添志(1982-), 男, 福建晋江人, 硕士, 主要从事 DPSSL 方面的研究。Email: g887866@126.com

**通讯作者:** 蔡志平, Email: zpcail@xmu.edu.cn

目的支持下,对 LBO 晶体 类临界相位匹配,腔内倍频 Nd:YAG 产生 473 nm 蓝光进行了研究,获得了最高 1.6 W 的蓝光输出,为同类腔型(直腔)中目前已知的最高水平<sup>[4]</sup>。

研究中发现倍频晶体长度和功率密度比对倍频功率密度有较大的影响,但是相关研究未见比较系统的报道。文中将倍频转换效率与腔内倍频的稳定态条件相结合,以 LBO 腔内倍频 946 nm 为例,讨论了晶体长度,功率密度比对倍频功率密度的影响。

## 1 倍频晶体的最佳长度

通过求解在非线性介质中传播的耦合基波和二次谐波的麦克斯韦方程,可得到倍频转换效率的公式:<sup>[5]</sup>

$$\frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \tanh^2 \left[ lK^{1/2} \left( \frac{P_{\omega}}{A} \right)^{1/2} \frac{\sin(\Delta kl/2)}{\Delta kl/2} \right] \quad (1)$$

式中:  $P_{\omega}$ 、 $P_{2\omega}$  为基波和二次谐波的功率;  $l$  为非线性晶体的长度;  $A$  为基波在倍频晶体中的面积;  $\eta$  为平面波阻抗;  $\omega$  为基波角频率;  $d_{\text{eff}}$  为有效非线性系数;  $\Delta k$  为相位失配因子,  $K$  的值为:

$$K = 2\eta^3 \omega^2 d_{\text{eff}}^2 \quad (2)$$

当转换效率较低时,公式(1)近似为:

$$\frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = l^2 K \frac{P_{\omega}}{A} \frac{\sin^2(\Delta kl/2)}{(\Delta kl/2)^2} \quad (3)$$

腔内倍频的稳定态条件:激光往返饱和增益等于线性损耗与非线性损耗之和<sup>[6]</sup>,即:

$$\frac{2g_0 l^*}{1 + I/I_s} = L + K'I \quad (4)$$

式中:  $g_0$  为非饱和增益系数;  $l^*$  为增益介质长度;  $I$  为基波在增益介质中的功率密度;  $L$  为基波的线性损耗;  $I_s$  为增益介质的饱和功率密度,其值<sup>[7]</sup>为:

$$I_s = \frac{h\nu}{(f_a + f_b)\sigma\tau} \quad (5)$$

式中:  $h$  为普朗克常数;  $\nu$  为基波功率;  $f_a$ 、 $f_b$  分别为上下能级中起作用的粒子数分数;  $\sigma$  为受激发射截面;  $\tau$  为上能级寿命。

$K'I$  为由于倍频所引起的非线性损耗,非线性耦合系数  $K'$  定义<sup>[8]</sup>为:

$$I(2\omega) = K'I^2(\omega) \quad (6)$$

$$K' = \kappa l^2 K \quad (7)$$

式中:  $\kappa$  为基波在倍频晶体和增益介质棒中的功率密度比,即  $\kappa = I_{\text{crystal}} / I_{\text{rod}}$ 。

由公式(4)可得  $I(\omega)$ , 并将其代入公式(6)则得到倍频波的功率密度为:

$$I(2\omega) = \frac{1}{4} \left[ - \left( \sqrt{K'} I_s + \frac{L}{\sqrt{K'}} \right) + \sqrt{\left( \sqrt{K'} I_s + \frac{L}{\sqrt{K'}} \right)^2 + 4(2g_0 l^* - L) I_s} \right]^2 \quad (8)$$

公式(8)中,  $I(2\omega)$  对  $\left( \sqrt{K'} I_s + \frac{L}{\sqrt{K'}} \right)$  因子的导数小于 0, 因此  $I(2\omega)$  是  $\left( \sqrt{K'} I_s + \frac{L}{\sqrt{K'}} \right)$  因子的递减函数, 由此可得, 当:

$$K' = \frac{L}{I_s} \quad (9)$$

时, 倍频波功率密度最大, 其值为:

$$I_{\text{op}}(2\omega) = \left[ -\sqrt{I_s L} + \sqrt{I_s L + (2g_0 l^* - L) I_s} \right]^2$$

此时, 由公式(5)、公式(7)、公式(9)可得倍频晶体的最佳长度为:

$$l_{\text{op}} = \left[ \frac{(f_a + f_b) L \sigma \tau \lambda}{2\kappa h c \eta^3 \omega^2 d_{\text{eff}}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

从公式(10)可以看出  $l_{\text{op}}$  正比于  $L^{\frac{1}{2}}$ , 反比于  $d_{\text{eff}}$ , 而与腔内非饱和增益无关。

## 2 LBO 长度对倍频功率密度的影响

所在课题组研究的固体蓝光激光器, 以 LBO 作为倍频晶体, 采用 类临界相位匹配 ( $\theta=90^\circ$ ,  $\phi=19.37^\circ$ ), 腔内倍频 Nd:YAG 946 nm 基波, 从而得到 473 nm 蓝光。其各项参数如下:  $f_a=0.0074$ ,  $f_b=0.6$ ,  $\sigma=5.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ <sup>[9]</sup>,  $\tau=230 \mu\text{s}$ ,  $d_{\text{eff}}=0.81 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ <sup>[10]</sup>,  $n_0=1.56$ <sup>[8]</sup>, 并取  $L=0.02$ ,  $g_0 l^*=0.1$ ,  $\kappa=50$ <sup>[8]</sup>, 则由公

式 (10) 可得到晶体的最佳长度为 15.3 mm。

根据公式 (8)，通过数值模拟计算，可得到倍频功率密度在不同饱和增益下和不同线性损耗下随倍频晶体长度的变化关系，分别如图 (1)，图 (2) 所示。

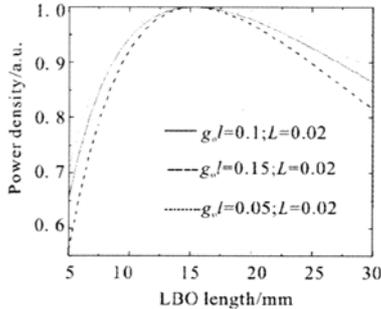


图 1 不同非饱和增益下的功率密度

Fig.1 Power density under different unsaturated gains

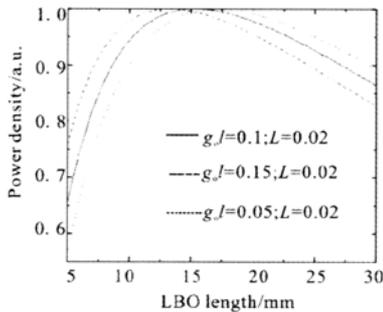


图 2 不同线性损耗下的功率密度

Fig.2 Power density under different linear losses

从这两图中，可以得出：

(1) 倍频功率密度并不是晶体长度的递增函数，这有别于倍频转换效率与晶体长度平方成正比。这主要是因为晶体长度的增加虽然增大了转换效率，但转换效率的增加，却导致基波功率密度的减少，从而使得倍频功率密度并不是随着晶体长度增长而一直增加的，这类似于耦合输出镜的透射率。当透射率较小时，输出功率随着透射率的增加而增加，但当透射率大于某个特定的值后，输出功率随着透射率的增加反而减少；

(2) 晶体长度存在一个最佳长度令倍频功率密度达到最大。当晶体长度远小于最佳长度时，倍频功率密度与晶体长度成线性关系，对晶体长度的变化相当敏感；当长度大于最佳长度时，倍频功率密度随着长度的增加而减少，但对晶体长度的敏感程度小于晶体长度小于最佳长度时的情况；

(3) 倍频功率密度在晶体最佳长度附近相当长的一段范围内，变化不是很明显；

(4) 在不同非饱和增益下，倍频功率密度对晶体长度的敏感程度是不一样的。非饱和增益越大，晶体长度的变化所引起的倍频功率密度的变化越小；

(5) 在不同的线性损耗下，倍频功率密度对晶体长度变化的敏感程度几乎是一样的。但晶体的最佳长度随着线性损耗的增加而增加，从公式 (10) 可以看出，其值与线性损耗的平方根成正比。

### 3 功率密度比对倍频功率密度的影响

根据公式 (8)，通过数值模拟计算，可得到：倍频功率密度在不同晶体长度下随功率密度比的变化关系 (如图 3 所示)，及其在不同功率密度比值下随晶体长度的变化关系 (如图 4 所示)。

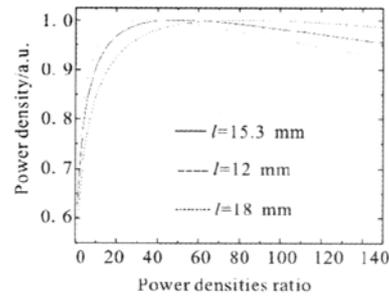


图 3 不同 LBO 长度下的功率密度

Fig.3 Power density under different LBO lengths

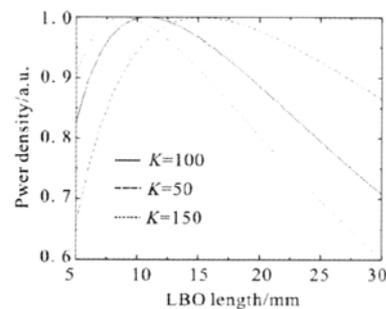


图 4 不同功率密度比下的功率密度

Fig.4 Power density under different power densities

从这两图中，可以得到：

(1) 倍频功率密度并不是功率密度比的递增函数，这与倍频功率密度并不随晶体长度增长而一直增加的情况是相类似的。

(2) 功率密度比存在着一个最佳值, 并且其值是随着晶体长度的增加而减小的, 从公式(10)可得到, 最佳值与晶体长度平方成反比。

(3) 功率密度比小于最佳值时, 倍频功率密度跟功率密度比值几乎成线性关系, 随功率密度比的变化非常显著; 而大于最佳值时, 变化已不是很明显;

(4) 晶体长度越长, 倍频功率密度随功率密度比的变化越明显。

(5) 功率密度比越大, 倍频功率密度对晶体长度的变化越敏感。

## 4 结 论

通过以上的分析和讨论, 知道晶体长度的增加和基波在倍频晶体中功率密度的增加(相应地增加了功率密度比), 虽然使倍频转换效率增加了, 但倍频功率密度并不是一直增加的。当晶体长度和功率密度比之间的关系满足公式(9)时, 倍频功率密度达到最大。因此在 LBO 腔内倍频 Nd:YAG 产生 473 nm 蓝光实验中, 应注意以下几点:

当腔体结构及 LBO 的位置确定, 即功率密度比一定时, 增大(或减小)LBO 长度, 若输出功率有较大增加时, 说明晶体长度远离其最佳长度, LBO 长度应该再增大(或减小)。若变化较小, 则说明 LBO 长度已接近最佳长度, 再次改变 LBO 长度也不会对输出功率有很大的影响。

当 LBO 长度确定时, 若改变腔体结构或 LBO 的位置, 改变基频波在增益介质中或倍频晶体中的功率密度, 致使功率密度比改变时, 功率有较大变化, 说明功率密度比小于其最佳值, 应当增大基波在倍频晶体中的功率密度或减小其在增益介质中的功率密度。

通过调整 LBO 长度和功率密度比, 均可使输出

功率达到最大。但鉴于 LBO 长度的不易改变, 应先根据其他要求(如功率稳定性, 输出光斑质量等)大致确定腔体结构及 LBO 的位置, 即确定功率密度比, 而后确定 LBO 的长度, 然后通过细调腔体结构及 LBO 的位置, 使得输出功率达到最大值。

## 参考文献:

- [1] ZHENG Quan, WANG Jun-ying, XUE Qing-hua. LBO frequency doubled CW red laser at 671nm up to 1.8W[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(1): 9-12.
- [2] XU De-gang, YAO Jian-quan, ZHANG Bai-gan, et al. Influence of the KTP crystal boundary temperature on conversion efficiency in high power green laser [J]. Chinese optics letters, 2005, 3(2): 85-88.
- [3] Czeranowdky C, Heumann E, G.huber. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG-BiBO laser with 2.8-W output power at 473 nm [J]. Opt lett, 2003, 28(6): 432-434.
- [4] LIU Sun-li, WANG Yi-shu, CAI Zhi-ping, et al. CW output of 1.60W/473nm line-cavity blue laser [J]. Journal of Xiamen University, 2007, 46(2): 179-182.
- [5] BLOEMBERGEN N. Nonlinear optics [M]. Singapore: World Scientific, 1996.
- [6] Geusic J E, Levinstein H J, Singh S, et al. Continuous 0.532- $\mu$  solid-state source using Ba<sub>2</sub>NaNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub> [J]. Appl Phys Lett, 1968, 12(9): 306-308.
- [7] FAN T Y, BYER R L. Modeling and CW Operation of a Quasi-Three-level 946nm Nd:YAG Laser [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1987, 23(5): 605-612.
- [8] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. 北京: 世界图书出版公司, 2005.
- [9] SINGH S, SMITH R G, VAN UITERT L G. Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd<sup>3+</sup> in yttrium aluminum garnet at room temperature [J]. Phys Rev B 1974, 10(6): 2566-2572.
- [10] PIERROU M, LAURELL F, KARLSSON H, et al. Generation of 740mW of blue light by intracavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched KTiOPO<sub>4</sub> crystal [J]. Opt Lett 1999, 24(4): 205-207.