

LBO 晶体和频产生 589 nm 激光的 数值模拟及实验研究*

石靖波, 张 凯, 马 毅, 王卫民, 彭跃峰, 鲁燕华

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 基于非线性光学理论, 分析了 1 064 nm 和 1 319 nm 和频产生 589 nm 激光源的理论基础。针对 LBO 晶体的 I 类相位匹配条件及最佳晶体长度的选择进行了计算机数值模拟, 给出了最佳晶体长度与总入射功率的关系曲线。当波矢量与光轴夹角为 90° , 波矢量方位角为 3.39° 时, 计算出相应的有效和频系数为 0.952×10^{-12} m/V。设计了一种简便高效的实验和频方案, 二极管泵浦 Nd:YAG 激光器经腔镜镀膜及腔内可倾斜标准具调谐, 分别输出了波长为 1 064 nm 和 1 319 nm 的准连续激光, 然后通过脉冲同步调节, 实现了 589 nm 黄光输出, 平均功率达到 500 mW, 光束质量因子 M^2 约 2.1, 和频效率 18%。

关键词: LBO 晶体; 非线性光学; 钠黄光; 相位匹配; 固体激光器

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

589 nm 激光器作为一种新型的激光器, 在光谱学、激光定位与导航、天文观测及医疗等领域都具有广阔的应用前景。近年来, 589 nm 激光器的设计大体上可以分两个方向: 染料激光器和固体激光器。染料激光器由于功率低、安全性差、染料退化、能量消耗高、性能不稳定等一系列问题, 已经很少应用。在全固态激光领域, 考虑到在 550~650 nm 范围内的激光辐射缺少相应的基频光输出, 所以还不能通过倍频的方式获得 589 nm 激光源^[1], 因此我们采用激光和频技术(SFG), 将 1 064 nm 和 1 319 nm 的基频光在非线性介质中经过光子合成来获得 589 nm 钠黄光。

在非线性晶体的选择上, 高效率 and 频晶体的选用不仅取决于晶体自身的非线性系数, 而且取决于相位匹配情况和晶体的光学损坏特性。LBO 晶体具有走离角小、接受角大、最大作用长度长、接受带宽大的特点, 是一种性能优异的非线性光学晶体^[2]。对于高平均功率激光的应用来说, 它的光学吸收系数较低, 在 1.319 μm , 1.064 μm 和 0.589 μm 的吸收系数分别为 1.2×10^{-3} , 1.8×10^{-3} , 1.7×10^{-3} cm^{-1} , 较低的光学吸收系数将产生较小的热梯度。基于以上考虑, 我们选择 LBO 晶体作为和频晶体。

1 理论分析及数值模拟

基于非线性光学理论, 即

$$\frac{1}{1\,064\,\text{nm}} + \frac{1}{1\,319\,\text{nm}} \approx \frac{1}{589\,\text{nm}} \quad (1)$$

又考虑到 1 064 nm 和 1 319 nm 基频光相对容易获得, 所以采用和频方式产生 589 nm 钠黄光具有一定的可行性。下面根据实验需要, 主要解决 I 类相位匹配、最佳晶体长度的确定及其对应的有效和频系数问题。

1.1 相位匹配

首先从 Maxwell 方程组及物质方程出发, 推导出非线性介质中光波传播的波动方程^[3]

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{D}_L}{\partial t^2} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}_{NL}}{\partial t^2} \quad (2)$$

由波动方程可进一步得到非线性介质中的稳态耦合波方程^[3]

$$dA_1/dz = iB_1 A_3 A_2^* \exp(-i\Delta kz) \quad (3a)$$

$$dA_2/dz = iB_2 A_3 A_1^* \exp(-i\Delta kz) \quad (3b)$$

$$dA_3/dz = iB_3 A_1 A_2 \exp(i\Delta kz) \quad (3c)$$

* 收稿日期: 2005-12-15; 修订日期: 2006-06-09

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 中国工程物理研究院基金资助课题(2004043)

作者简介: 石靖波(1980—), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光器研究; shijingbo@eyou.com。

式中: A_n 表示第 n 个波的电场振幅; z 表示波传播方向的单位矢量; $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$, 为相位匹配因子。为了使光转换效率最高, 就必须满足相位匹配条件: $\Delta k = 0$ 。由于篇幅所限, 本文仅讨论 I 类相位匹配的条件。

由双轴晶体折射率方程, 我们可以得到 LBO 晶体和频的相位匹配曲线 $\theta\phi$ 方程组^[3]

$$\begin{cases} \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{n_1^2 - n_{1x}^2} + \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \phi}{n_1^2 - n_{1y}^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_1^2 - n_{1z}^2} = 0 \\ \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{n_2^2 - n_{2x}^2} + \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \phi}{n_2^2 - n_{2y}^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_2^2 - n_{2z}^2} = 0 \\ \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{n_3^2 - n_{3x}^2} + \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \phi}{n_3^2 - n_{3y}^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_3^2 - n_{3z}^2} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ 为波矢量同光轴的夹角, ϕ 为波矢量方位角; 下标 1, 2, 3 分别表示 3 个波; n_x, n_y, n_z 是晶体的 3 个主折射率, 并规定 $n_x < n_y < n_z$, 该折射率可以由 LBO 色散关系公式求得^[4], 即

$$\begin{cases} n_x^2 = 2.4542 + \frac{0.01125}{\lambda^2 - 0.01135} - 0.01388\lambda^2 \\ n_y^2 = 2.5390 + \frac{0.01277}{\lambda^2 - 0.01189} - 0.01848\lambda^2 \\ n_z^2 = 2.5865 + \frac{0.01310}{\lambda^2 - 0.01223} - 0.01861\lambda^2 \end{cases} \quad (5a)$$

将 $\lambda = 1.064, 1.319, 0.589 \mu\text{m}$ 分别代入, 得

$$\begin{cases} n_{1x} = 1.5648 \\ n_{1y} = 1.5904 \\ n_{1z} = 1.6053 \end{cases} \quad \begin{cases} n_{2x} = 1.5606 \\ n_{2y} = 1.5856 \\ n_{2z} = 1.6005 \end{cases} \quad \begin{cases} n_{3x} = 1.5757 \\ n_{3y} = 1.6033 \\ n_{3z} = 1.6184 \end{cases} \quad (5b)$$

再将式(5b)数据代入方程组(4), 得

$$\begin{cases} \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{n_1^2 - 0.4084} + \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \phi}{n_1^2 - 0.3954} + \frac{\cos^2 \theta}{n_1^2 - 0.3880} = 0 \\ \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{n_2^2 - 0.4104} + \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \phi}{n_2^2 - 0.3978} + \frac{\cos^2 \theta}{n_2^2 - 0.3904} = 0 \\ \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{n_3^2 - 0.4028} + \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \phi}{n_3^2 - 0.3890} + \frac{\cos^2 \theta}{n_3^2 - 0.3818} = 0 \\ \frac{n_1}{1.064} + \frac{n_2}{1.319} = \frac{n_3}{0.589} \end{cases} \quad (6)$$

方程组(6)没有简单的解析解形式, 我们采用 MATLAB 软件模拟得到所需的 $\theta\phi$ 曲线, 如图 1 所示, 即 LBO 晶体在 I 类情况下相位匹配角 ($\theta\phi$) 曲线图。

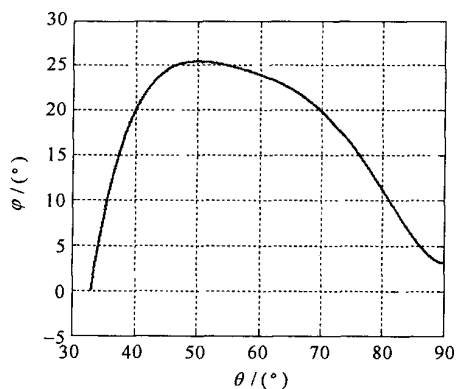


Fig. 1 PM angle of LBO in type I

图 1 LBO I 类匹配的 $\theta\phi$ 曲线图

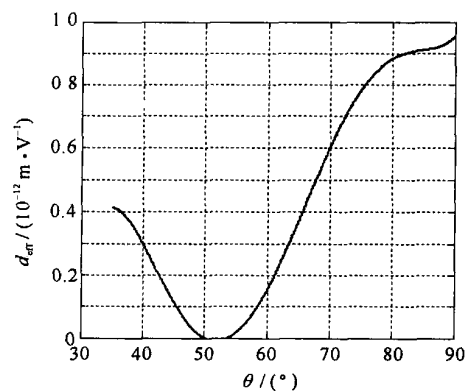


Fig. 2 Effective nonlinear coefficient vs angle θ

图 2 有效非线性系数与 θ 角关系图

在相位匹配条件下, 求解使有效非线性极化系数 d_{eff} 达到最大值的条件, 忽略光波离散效应, LBO 晶体在 I 类匹配时的有效非线性系数可表示为^[5]

$$d_{\text{eff}} = (a_i \cdot d_{ijk}) (a_j \cdot a_k) \quad (7)$$

式中: d_{ijk} 为晶体的非线性极化率张量矩阵; a_i 为和频光单位电位移矢量; $a_j \cdot a_k$ 为两束基频光并矢。

LBO 晶体的点群为 C_{2v} -mm2, 因此 d_{ijk} 有 5 个不为零的非线性光学系数 (d_{31} , d_{32} , d_{33} , d_{24} 和 d_{15})。由于 Kleinman 对称性的要求, $d_{31} = d_{15}$, $d_{32} = d_{24}$, 因此 LBO 晶体的非线性光学系数只有 3 个, 具体数值如下^[4]

$$d_{31} = \pm(1.09 \pm 0.09) \times 10^{-12} \text{ m/V}$$

$$d_{32} = \pm(1.17 \pm 0.17) \times 10^{-12} \text{ m/V}$$

$$d_{33} = \pm(6.5 \pm 0.6) \times 10^{-14} \text{ m/V}$$

代入公式(6), 数值模拟得到有效非线性系数随 θ 角变化曲线, 如图 2 所示。从图中可看出, $\theta = 90^\circ$ 时, 有效和频系数最大, 对应到图 1 上, 由 $\theta\phi$ 曲线可求出此时 $\phi = 3.39^\circ$, 将 θ, ϕ 值代入公式(7)可求出 $d_{\text{eff}} = 0.952 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 。

1.2 最佳晶体长度

在小信号情况下, 非线性效率 η 与晶体长度 l 的平方、 d_{eff}^2 及基频光功率 P_ω 成正比^[6], 表达式为

$$\eta = l^2 K \frac{P_\omega \sin^2(\Delta kl/2)}{A (\Delta kl/2)} \quad (8)$$

在高转换效率下, 上述小信号解不成立, 由和频波耦合方程(3), 采用克莱曼近似推导出两束基频光输入的光子数相等情况下量子效率^[3]

$$\eta = \text{th}^2[\mu(0)\zeta] \quad (9)$$

式中 $\mu(0)$ 表示基频光的相对功率密度。根据 $\text{th}(x)$ 函数特性, 并由 $\mu(0)\zeta = 1$ 可以定出特性作用长度 l , 即最佳晶体长度与总入射光功率密度 I_{in} 的关系

$$l = K / \sqrt{I_{\text{in}}} \quad (10)$$

其中系数 $K = \sqrt{n_1 n_2 n_3 \lambda_1 \lambda_2 \epsilon_0 (\omega_1 + \omega_2) / (16\pi^3 d_{\text{eff}}^2)}$, 关系曲线如图 3 所示, 根据实验数据中总入射功率密度可从关系曲线中找到对应的最佳晶体长度。

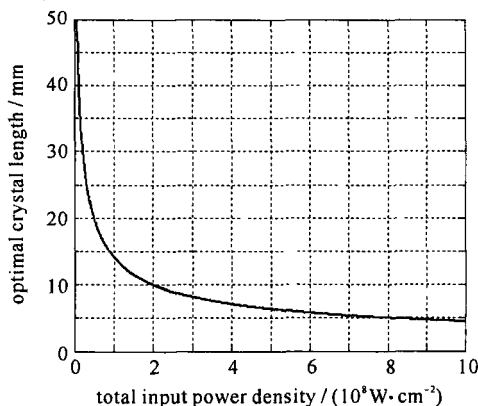


Fig. 3 Optimal crystal length vs total input power density

图 3 最佳晶体长度与总入射功率密度关系图

2 实验装置及结果

我们采用以 Nd:YAG 做介质的全固态激光器件, 装置如图 4 所示。

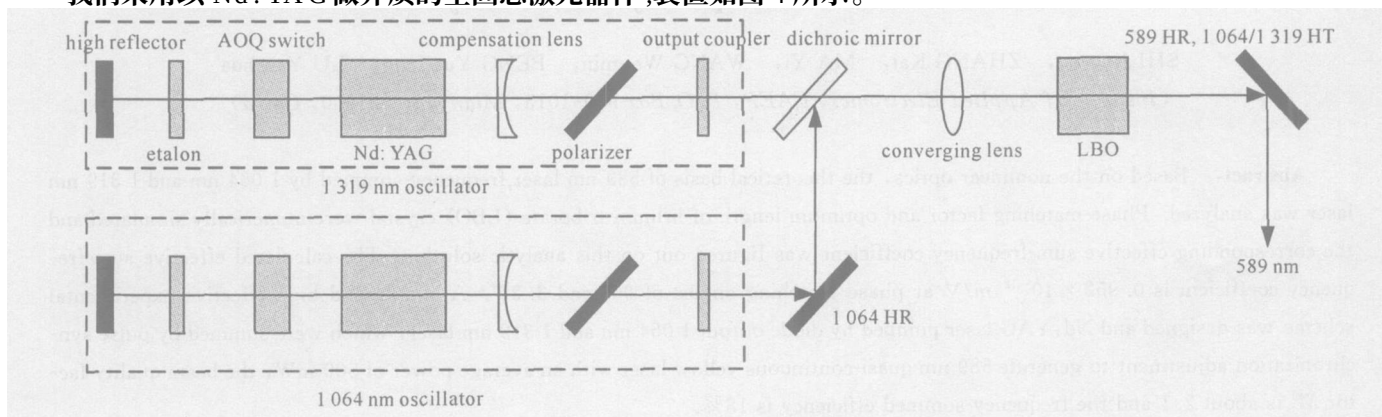


Fig. 4 Scheme of 589 nm laser with sum-frequency

图 4 和频产生 589 nm 激光源的装置图

在两束基频光的产生上, Nd:YAG 通过二极管阵列泵浦以及循环水冷却, 通过腔镜镀膜以及腔内可倾斜标准具精确调谐, 分别获得了期望的 1064 nm 波长和 1319 nm 波长的稳态激光输出, 重复频率 500 Hz, 脉宽 200 μs 。波长的精确选择主要靠调节基频光路中标准具(etalon)与光轴的倾斜角, 其中 1064 nm 光路中标准具厚度为 0.5 mm, 1319 nm 光路中标准具厚度为 0.2 mm。谐振腔内的准连续激光被声光调 Q 开关调制为高峰值功率的窄脉冲, 以保证较高的和频效率。腔内补偿透镜的作用在于抵消热透镜效应对光束质量带来的不利影响。

如图 4 所示, 1319 nm 基频光经直线入射和频晶体, 避免了走折线可能带来的功率损耗和光束畸变, 同时也简化了两束基频光的光束同轴调节。LBO 晶体前加会聚透镜, 使得基频光的入射峰值功率密度达到 200

MW/cm²。根据图 3,选取最佳晶体长度为 10 mm,并参照前一部分的理论计算结果,针对 LBO 晶体的角度进行了精确调谐,以实现 I 类相位匹配。

在 I 类匹配条件下选择最佳晶体长度,通过两束基频光的同步调节,我们获得了波长为 589 nm 的钠黄光输出,平均功率达到了 500 mW,光束质量因子 $M^2 \approx 2.1$,和频效率 $\eta \approx 18\%$ 。今后为进一步提高和频输出功率,除了提高基频光功率以外,关键在于消除或减弱激光脉冲的抖动,以改善两束基频光脉冲的同步性。

3 结 论

本文针对 LBO 晶体和频产生 589 nm 激光源进行了相关的理论分析及计算机数值模拟,探讨了 I 类相位匹配条件以及最佳和频晶体长度的选择,计算出了实验中有效和频系数的理论值,实现了平均功率为 500 mW 的 589 nm 激光的实验输出。今后的努力方向主要是进一步提高和频效率,以得到更高的和频光输出功率和更好的光束质量。

参考文献:

- [1] 贾富强,卜铁坤,郑权,等. LD 泵浦腔内和频连续 589 nm 黄光激光器[J]. 激光与红外, 2004, 34(6):439-441. (Jia F Q, Bu Y K, Zheng Q, et al. LD pumped intracavity sum-frequency mixing CW 589 nm yellow laser. *Laser and Infrared*, 2004, 34(6):439-441)
- [2] 吕彦飞,檀慧明,高兰兰,等. LBO I 类临界相位匹配腔内和频 593.5 nm 激光器[J]. 激光与红外, 2005, 35(1):45-47. (Lü Y F, Tan H M, Gao L L, et al. LBO type-I critical phase-matched intracavity sum-frequency mixing 593.5 nm laser. *Laser and Infrared*, 2005, 35(1):45-47)
- [3] 范琦康,吴存恺,毛少卿. 非线性光学[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1989. (Fan Q K, Wu C K, Mao S Q. Nonlinear optics. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing Company, 1989)
- [4] 张克从,王希敏. 非线性光学晶体材料科学[M]. 北京:科学出版社,1996. (Zhang K C, Wang X M. Nonlinear optical crystal material science. Beijing: Science Press, 1996)
- [5] Liu L Q, Kenji Nagashima. Optimum phase matching and effective nonlinear coefficients of LBO and KTP for continuously changing wavelength[J]. *Optics and Laser Technology*, 1999, (31):283-287.
- [6] 克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社,2002. (Koechner W. Solid-state laser engineering. Beijing: Science Press, 2002)

Numerical simulation and experimental research on 589 nm laser frequency-summed by LBO

SHI Jing-bo, ZHANG Kai, MA Yi, WANG Wei-min, PENG Yue-feng, LU Yan-hua
(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1013, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on the nonlinear optics, the theoretical basis of 589 nm laser frequency-summed by 1 064 nm and 1 319 nm laser was analyzed. Phase-matching factor and optimum length of lithium triborate (LBO) crystal were numerically simulated and the corresponding effective sum-frequency coefficient was figured out on this analytic solution. The calculated effective sum-frequency coefficient is 0.952×10^{-12} m/V at phase matching angles of 90° and 3.39° . A simple and high-effective experimental scheme was designed and Nd:YAG laser pumped by diode output 1 064 nm and 1 319 nm laser, which were summed by pulse synchronization adjustment to generate 589 nm quasi-continuous yellow laser with an average power of 500 mW, the beam quality factor M^2 is about 2.1 and the frequency-summed efficiency is 18%.

Key words: LBO crystal; Nonlinear optics; Sodium yellow laser; Phase-matching; Solid-state laser