

文章编号: 1001-3806(2003)05-0428-03

类非临界相位匹配 LBO 腔外倍频 660nm 效率的研究

李朝阳¹ 王勇刚² 黄 骝¹⁽¹⁾北京工业大学应用数理学院,北京,100022) ⁽²⁾中国科学院半导体所,北京,100083)

摘要: 报道了利用 LBO 晶体对 Nd:YAG 纳秒激光器进行腔外倍频实验的研究结果,实验中 LBO 晶体采用类非临界相位匹配(NCPM),温度调谐。实验证明,采用 LBO 温度调谐方式具有倍频效率高、稳定性好、易于调节等优点,当匹配温度为 8.4℃、基频光功率为 1.3J 时,获得了 855mJ 的 660nm 倍频光输出,最高转换效率达到 66%,倍频光能量稳定度小于 ±3%。

关键词: 腔外倍频;非临界相位匹配;LBO 晶体;温度调谐

中图分类号: TN242 **文献标识码:** A

Extra cavity 660nm SHG study of type- noncritical phase-matched LBO crystal

Li Chaoyang¹, Wang Yonggang², Huang Liu¹⁽¹⁾ School of Applied Mathematics and Physics, Beijing Polytechnic University, Beijing, 100022)⁽²⁾ Institute of Semiconductors, the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100083)

Abstract: A research detail of Nd:YAG 1.319μm extracavity-doubling using LBO crystal is reported. LBO crystal is adopted by type- noncritical phase-matched(NCPM) and temperature tuned. The experiment shows that using LBO type- noncritical phase-match is effective to get a higher SHG efficiency. With a 1300mJ incident pump laser while temperature is 8.4℃, 855mJ 660nm TEM₀₀ mode red laser is obtained, the conversion efficiency is up to 66% and the power instability of output laser is less than ±3%.

Key words: extracavity-doubling; noncritical phase-matched; LBO crystal; temperature tuning

引 言

高功率红光激光器在激光医疗、高密度全息存储、彩色显示等方面有巨大的应用前景,通常用作红光光源的氪离子激光器存在价格昂贵、效率低和设备复杂等缺点,而通过激光频率调谐技术和光参量过程得到的红光光束质量较差,并且难以获得大功率的激光。倍频 Nd 离子的 1.319μm 谱线是获得高质量红光的一种有效途径,目前对于连续激光器主要采用腔内倍频的方式来获得^[1,2],由于脉冲运转的激光器已经具有很高的功率密度,所以一般采取腔外倍频的方法^[3]。

笔者报道了对 Nd:YAG 脉冲激光器输出的 1.319μm 激光进行腔外倍频的实验结果,利用 LBO 晶体类非临界相位匹配方式实现 660nm 的红光输出,当吸收泵浦光功率为 1300mJ 时,获得了 855mJ 的单横模激光输出,其最高转换效率达到

66%。

1 理论分析

1.1 温度调谐 LBO 非临界相位匹配方式的理论计算

LBO 晶体是一种优良的非线性倍频晶体,属负双轴晶体,它的非线性系数虽然比 KTP 小一些,但光谱透明区和匹配范围更宽,并且具有很高的破坏阈值,在做 OPO 及 OPG 应用时, LBO 还具有宽的允许角和小的光束走离角。LBO 的一个很显著的特点就是它的折射率与色散量对温度很敏感,因此,它很容易实现非临界相位匹配(NCPM),这时由于不存在光束走离效应,如果将之用于倍频过程中,就可以保证有很高的二次谐波转换效率,同时输出倍频光的光束质量和输出稳定性均优于角度匹配的 LBO 倍频结果。

根据类非临界相位匹配条件,可推出 LBO 晶体的倍频效率与温度的关系。由 Kato 修改后的 Sellemier 方程^[4,5]为(以 μm 为单位):

作者简介:李朝阳,男,1973 年 12 月出生。博士研究生。现从事非线性光学和激光超短脉冲领域的研究工作。

收稿日期:2002-09-19;收到修改稿日期:2002-11-21

$$\begin{cases} n_x(T) = n_x(T_0) + (-3.76 + 2.30) \times 10^{-6} \times [T + 29.13 \times 10^{-3} T^2] \\ n_y(T) = n_y(T_0) + (6.01 - 19.40) \times 10^{-6} \times [T - 32.89 \times 10^{-4} T^2] \\ n_z(T) = n_z(T_0) + (1.50 - 9.70) \times 10^{-6} \times [T - 74.49 \times 10^{-4} T^2] \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} n_x^2(T_0) = 2.4452 + \begin{matrix} 0.01125 \\ 2 \\ -0.01135 \end{matrix} - 0.01388 T^2 \\ n_y^2(T_0) = 2.5390 + \begin{matrix} 0.01277 \\ 2 \\ -0.01189 \end{matrix} - 0.01849 T^2 + \\ 4.3025 \times 10^{-5} T^4 - 2.9131 \times 10^{-6} T^6 \\ n_z^2(T_0) = 2.5865 + \begin{matrix} 0.01310 \\ 2 \\ -0.01223 \end{matrix} - 0.01862 T^2 - \\ 4.5778 \times 10^{-5} T^4 - 3.2526 \times 10^{-6} T^6 \\ T = T - T_0 \quad (T_0 \text{ 取室温 } 20) \end{cases} \quad (2)$$

在 I 类非临界相位匹配, $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0$ 时, 可得到:

$$\begin{cases} n_1(\omega) = n_z(2\omega, T) \\ n_2(2\omega) = n_y(2\omega, T) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $n_1(\omega)$, $n_2(2\omega)$ 分别为慢光和快光的折射率。对于长度为 L 的 LBO 晶体, 在小信号近似条件下, 倍频效率 η 正比于 $\sin^2 \left[\frac{kL}{2} \right]$, 即:

$$\sin^2 \left[\frac{kL}{2} \right] \quad (4)$$

式中, $k = 4 [n_2(2\omega) - 2n_1(\omega)]$ 为失谐量。根据以上色散方程, 通过计算就可以得到在 $1.319\mu\text{m}$ 处 LBO 晶体 I 类非临界相位匹配的倍频效率与温度关系的理论曲线。

1.2 $1.319\mu\text{m}$ 红外激光的获得

从室温下 Nd^{3+} YAG 晶体的荧光谱线可以看出, Nd YAG 晶体在近红外区域有 3 条明显的荧光谱线: $0.946\mu\text{m}$, $1.064\mu\text{m}$ 和 $1.319\mu\text{m}$ 。其中, $1.064\mu\text{m}$ 处的荧光谱线最强, $1.319\mu\text{m}$ 次之, 这意味着在激光器中 $1.064\mu\text{m}$ 的谱线最可能优先获得增益而起振, 所以 Nd YAG 激光器一般只输出 $1.064\mu\text{m}$ 的红外激光, 只有采取选频措施才能实现 $1.319\mu\text{m}$ 波长的激光振荡。在本实验中采取谐振腔输出镜对 $1.064\mu\text{m}$ 高透而对 $1.319\mu\text{m}$ 高反的镀膜方法来增大谐振腔对 $1.064\mu\text{m}$ 波长的透射损耗, 抑制 $1.064\mu\text{m}$ 激光起振, 这样可确保即使在较大泵浦功率下也只有 $1.319\mu\text{m}$ 的激光形成激光振荡。实验中采用的 Nd YAG 棒的两个端面均镀以 $1.319\mu\text{m}$ 的增透膜, Nd 离子掺杂浓度为 1.2at%, 采用灯泵的激励方法, 输出镜选择 $2a = 3.8, 2b = 0.5$ 的高斯镜以改善激

光输出模式, 在重复频率 10Hz, 经一级行波放大器后得到 $1.319\mu\text{m}$ 的基横模 (TEM_{00}) 输出, 其最大输出功率为单脉冲 1800mJ, 脉宽 8ns。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。图中 M_1 是 $1.319\mu\text{m}$ 的全反镜, 在需要测量泵浦光功率的时候将它插入到光路中, 在激光器倍频工作时撤去。 M_2 和 M_3 是 660nm 的全反镜, 起分离倍频光的作用。实验所用激光器是 Labest 公司生产的 $1.319\mu\text{m}$ 红外脉冲激光器, 重复频率在 (1~20) Hz 可调, 输出激光模式为 TEM_{00} 准基横模, 在选择腔型 10Hz 下, 其单脉冲能量可达 1800mJ/pulse, 脉宽小于 8ns。

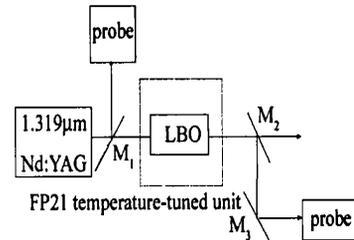


Fig. 1 Schematic of the type-I LBO crystal NCPM 660nm red laser

LBO 晶体购自中科院福建物构所, 尺寸为 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 12\text{mm}$, 沿 $\theta = 90^\circ$ 方向切割。LBO 晶体采用一台精确控温的 FP21 温控仪进行严格的温控, 控温精度优于 ± 0.1 。激光功率的测量是在美国 Molelectron 公司生产的 EPM1000 型激光功率计上完成的, 测量误差小于 3%, 用像纸感光的方法对输出倍频光的模式进行分析。

3 结果与讨论

图 2 所示是当泵浦光注入功率一定时倍频光输出功率随 LBO 温度变化之间的曲线图, 基波注入功

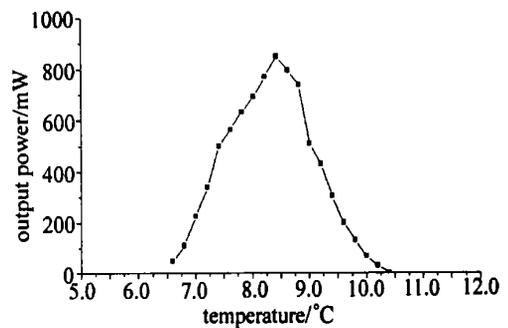


Fig. 2 LBO crystal type-I NCPM SHG temperature-tuned curve while incident pump power is 1300mJ

率为 1300mJ。由图 2 可以看出, 当温度为 8.4 时, 倍频光的效率达到最大值, 温度低于或高于此温度, 倍频效率均显著下降, 这时的温度即是 LBO 晶

体的最佳匹配温度。当温度小于 6.4 或高于 10.5 时,倍频光基本无输出,说明 LBO 晶体的温度匹配半宽大约为 2 $^{\circ}$ 。将实验结果与文献[4]中的理论计算结果进行对比,实验得到的温度调谐曲线与理论所述曲线基本相符。

控制 FP21 温控仪使 LBO 温度始终保持在最佳匹配状态,改变基波入射功率,得到图 3 所示的红外光输出功率与基频波注入功率之间的关系曲线。由

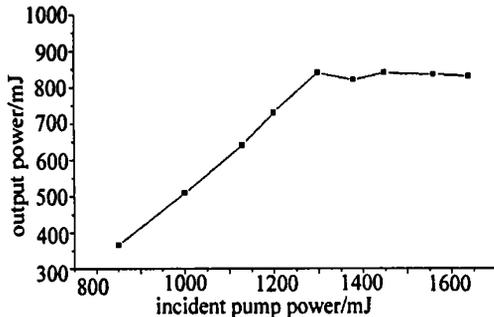


Fig. 3 660nm laser power curve under various pump incidence power while temperature is 8.4

图 3 可以看出,在泵光功率小于 1300mJ 时,倍频光的输出功率随入射泵光注入功率线性增加,说明这时 LBO 的转换效率基本保持一个常数,此常数大约是 66%。但随后再增大泵光功率,倍频效率并没有如预期的那样持续增加,而是保持在一个恒定数值 840mJ 左右,并稍微有些下降,这说明对于特定的倍频晶体存在一个饱和入射功率,当入射功率超过这个极限值时,倍频效应就达到了饱和。导致这种现象的原因取决于所用倍频晶体的长度,对特定的倍频晶体来讲,基频光功率和倍频光功率将随光在晶体中的传播距离的变化而变化,当晶体长度增加到一定程度时,倍频光波就出现了饱和现象,2 个泵光子经过倍频晶体每生成 1 个倍频光子,这个倍频光子又很快复合成为泵光,这时泵光和倍频光之间就达到了动态平衡,此后再增大泵光能量对于倍频光的输出功率已没有作用,反而由于晶体中光波的相互作用使得输出倍频光功率有所下降。在入射泵光功率 1100mJ 时,0.5h 内每隔 5min 对所得倍频光功率进行了测量,测得倍频光能量不稳定性小于 3%。

激光输出模式是衡量激光光束质量的 1 个很重要的指标,现在普遍采用使像纸感光的方法来对激光输出模式做粗略估计。图 4 是实验得到的 10Hz 下 660nm 倍频光近场时的光斑照片,图 5 是在倍频光输出约 1.5m 处的远场光斑照片,图中两个光斑完全相同。由图 4 可知,1319 μ m 泵光经倍频后,倍频光仍为基横模输出,光斑直径约为 8mm(图 4 为

放大 2 倍的结果)。由图 5 可以看出,倍频光的远场光斑仍为圆形,其中出现了明显的衍射环,这是由于在 1319 μ m 激光器的输出镜采用了高斯镜做空间相位补偿的结果,图 5 并没有出现像角度调谐时由于走离效应导致的倍频光输出呈椭圆形的现象,这说明采用非临界相位匹配方式可以完全克服光束走离效应对倍频效率的影响,从而大大提高输出倍频光的光功率密度和光束质量。

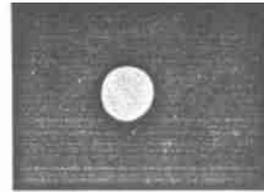


Fig. 4 Near-field image of 660nm red laser (2 \times)

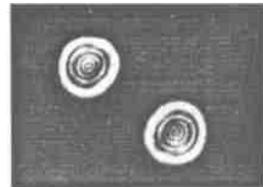


Fig. 5 Far-field image of 660nm red laser (1.5m)

4 结论

利用温度调谐 类非临界相位匹配(NCPM)的 LBO 晶体,对 Nd YAG 激光器 1.319 μ m 波长进行腔外倍频实验的研究结果进行了报道。实验证明,采用 LBO 温度调谐方式具有倍频效率高、稳定性好、易于调节等优点,当基频光为 1300mJ 时,获得了 855mJ 的 660nm 倍频激光输出,最高能量转换率达到 66%,倍频光能量稳定度小于 $\pm 3\%$ 。从 LBO 晶体倍频效率与温度之间的关系、基频波入射功率随输出功率的关系、倍频光输出模式等方面进行了研究,发现倍频光输出效率对 LBO 晶体温度变化很敏感,同时对泵浦光存在一定的要求,当泵浦光注入功率超过一定值时,倍频光即达到了饱和。

感谢 Labest 公司的裴搏博士和王涛工程师与作者进行的有益探讨,对于颖璞工程师提供的多组腔镜表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Quan Zh, Ling Zh. Opt & Technol, 2002, 34(3): 239 ~ 241.
- [2] Lin X Ch, Li R N, Cui D F *et al.* Chinese Phys Lett, 2002, 19(8): 1106 ~ 1107.
- [3] Morrison G R, Ebrahimzadeh M, Rae C F *et al.* Opt Commun, 1995, 118: 55 ~ 66.
- [4] Kato K. IEEE J Q E, 1990, QE26(7): 1173 ~ 1175.
- [5] Kato K. IEEE J Q E, 1994, QE30(2): 2950 ~ 2952.