

文章编号: 0258-7025(2007)12-1634-05

基于正交频率变换的高功率蓝绿全固态激光器

戎善奎^{1,2}, 余 婷^{1,2}, 周 军^{1,2}, 陈卫标¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 对多横模全固态激光器使用正交频率变换进行了分析, 计算了频率转换效率与激光发散角的关系。使用双 KTP 晶体正交倍频的方法, 对 Nd:YAG 激光器输出的含有高阶横模的激光进行倍频实验研究。在 1064 nm Nd:YAG 激光基波功率密度为 121 MW/cm² 时, 其谐波转换效率达到 75.5%。研究表明, 对于光束质量较差的基波激光, 采用正交频率变换的方式, 适当选择晶体参数, 同样可以获得较高效率的二次谐波输出。

关键词 激光器; 多模激光; 正交频率变换; 光束发散角; 倍频效率

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

High Power All-Solid-State Blue-Green Laser Based on Quadrature Frequency Conversion

RONG Shan-kui^{1,2}, YU Ting^{1,2}, ZHOU Jun^{1,2}, CHEN Wei-biao¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The effect of multi transversal mode on quadrature frequency conversion in a solid-state laser was analyzed, and the relation between the conversion efficiency and the divergent angle was conducted. A quadrature frequency conversion scheme using two KTP crystals was implemented in an all-solid-state Nd:YAG laser with high-order transverse mode. An energy-conversion efficiency of 75.5% is obtained when the fundamental laser intensity is 121 MW/cm². This experiment indicates that when the parameters of nonlinear crystals are properly optimized, high-efficiency frequency doubling can be achieved using quadrature frequency-conversion scheme even in a multimode solid-state laser.

Key words lasers; multi-mode laser; quadrature frequency conversion; beam divergence angle; frequency-doubling efficiency

1 引 言

高功率、小型化的全固态蓝绿激光器在海洋探测、水下通信等军事领域或者医学方面都具有重要的地位, 这些应用一般都需要高功率蓝绿激光。目前, 常用的 1064 nm Nd:YAG 激光器的倍频效率一般只有 50% 左右^[1~4], 因此通过提高倍频效率来提高整机的电光效率显得非常重要。如何提高非线性光学频率变换的效率一直是激光技术界的研究热点。David Eimerl^[5] 提出了正交频率变换的概念受到关注, 他们按照正交频率变换的方式使用两块

KD*P 晶体, 对于基波是 Nd:YLF 激光输出经掺 Nd 磷酸盐玻璃放大器放大后的 1053 nm 激光脉冲, 在基波功率密度为 200 MW/cm² 时, 倍频效率为 70%; 基波功率密度为 1~3 GW/cm² 时, 倍频效率达到 80%。Hiromitsu Kiriyama 等^[6,7] 采用使基波多次通过正交放置的 CLBO 晶体, 在基波功率密度较低的情况下, 同样获得了超过 80% 的二次谐波输出, 他们还使用 KTP 晶体进行过类似的实验工作。高效正交频率变换是基于基横模提出的理论, 但是实际的小型全固态激光器一般不采用复杂的高阶模抑制技术, 更加关注的是整机的效率和体积。因此,

收稿日期: 2006-10-24; 收到修改稿日期: 2007-06-28

作者简介: 戎善奎(1978—), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事全固态激光技术研究。E-mail: yasonky@163.com

导师简介: 陈卫标(1969—), 男, 上海人, 研究员, 博士生导师, 主要从事全固态激光技术、星载激光多普勒雷达技术、机载激光雷达技术以及地基大气污染检测激光雷达技术等方面的研究。E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

本文在正交频率变换的理论下,分析和模拟计算多种横模混合或者高阶横模的全固态激光器,运用正交频率变换所能得到的倍频效率,并报道了实验验证结果。

2 激光的正交频率变换理论与模拟

2.1 正交频率变换的基本原理

基波通过非线性光学晶体时的转换效率受限于其在晶体中的相位失配,而相位失配源于光束发散、光束退偏、晶体缺陷等因素。正交频率变换方法可以补偿这些因素的影响。根据 David Eimerl^[5]对正交频率变换方法的分析,其基本原理是:在非线性光学频率变换过程中,每一步变换使用两块非线性光学晶体,而不是通常的一块。这两块晶体的放置方式是使得第一块晶体中产生的谐波和在第二块晶体中产生的谐波是正交偏振的。前一块晶体中产生的谐波在后一块晶体中不符合相位匹配的条件,因此不会发生从谐波向基波的转换。这样,在前一块晶体中产生的谐波经过后一块晶体时只是因为必要的反射和吸收有所损失,不会发生反转换。这种方式对于光束的不均匀性和角度走离的敏感程度较单晶体低,对强度变化范围较大的基波可以实现有效的转换。

David Eimerl^[8]和 J. A. Armstrong 等^[9]对二次谐波转换方程进行了求解

$$\frac{\partial E_2}{\partial z} = CE_1^2 \exp(i\Delta kz),$$

$$\frac{\partial E_1}{\partial z} = -CE_2 E_1^* \exp(-i\Delta kz),$$

$$C = 5.46d_{\text{eff}}/\lambda_1(n_1 n_2 n_3), \quad (1)$$

式中 C 为正比于晶体有效非线性系数的非线性耦合常数,单位 $\text{GW}^{-1/2}$; Δk 为入射基波光束和输出二次谐波光束之间的相位失配; d_{eff} 为晶体的有效非线性系数,单位 pm/V ; λ_1 为入射基波,单位 μm ; $n_1 = n_2$, 表示入射基波在非线性晶体中的折射率, n_3 表示二次谐波在非线性晶体中的折射率; $|E_n|^2 = I_n$ ($n = 1, 2$), E_1 和 E_2 分别表示基波和倍频光电场强度; I_n 表示对应的光强度。谐波转换效率为

$$\begin{aligned} \eta &= \tanh^2 \{1/2 \tanh^{-1} [\text{sn}(2\eta_0^{1/2}, 1 + \delta^2/4\eta_0)]\}, \\ \eta_0 &= C^2 I L^2, \\ \delta &= 1/2 \Delta k L, \end{aligned} \quad (2)$$

sn 为椭圆雅可比函数, I 为入射基波光强, L 为晶体长度。一般情况下,光束发散的影响是其中最主要的

因素, Δk 主要源于光束的发散^[8],其表达式为

$$\Delta k = \beta_0 \Delta \theta, \quad (3)$$

式中 β_0 为角灵敏度, $\Delta \theta$ 为入射基波的光束发散角。

计算时可以把基波脉冲按时序分成一系列的阶段,每一阶段经第一块非线性晶体后产生的谐波加在一起便是第一块晶体产生的总的谐波功率;未经转换的基波经第二块晶体转换,总的谐波功率是两步骤非线性变换产生的谐波总和。

2.2 二次谐波转换效率的模拟计算

在倍频晶体中,虽然 KTP 晶体的破坏阈值相对于 CLBO, DKDP 等晶体偏低,但 KTP 晶体具有大的有效非线性系数,大的允许角、允许温度和小的走离角,因此在实验中采用 KTP 晶体。采用两块 II 类匹配的 KTP 晶体对基波进行倍频。按照入射基波功率密度 100 MW/cm^2 , 经计算选用两块晶体的尺寸分别为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 和 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 晶体两面镀 1064 nm 和 532 nm 增透膜,减少反射和吸收等损失。

如果采用的基波光束为基模高斯光束,且光束横截面内水平和垂直方向光束发散角均为 1 mrad , 通过计算可以得到如图 1 所示的不同基波功率密度情况下采用正交倍频结构的二次谐波转换效率。可见在基波功率密度大于 60 MW/cm^2 后即可得到超过 80% 的二次谐波转换效率。这个结果和文献^[5~7]中的结果吻合。高光束质量的基模高斯光束在正交频率变换时,即使入射基波功率密度低,也可获得较高功率的二次谐波输出。

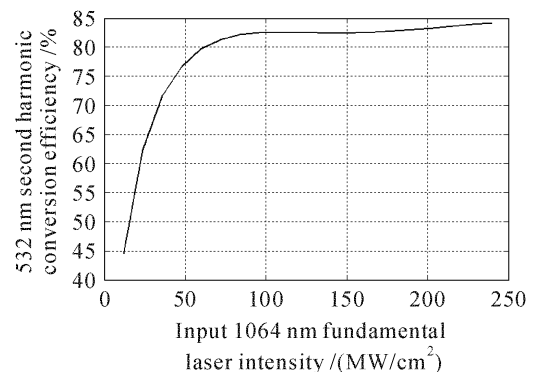


图 1 计算得到的不同 1064 nm 功率密度基波入射时经过 KTP 晶体正交频率变换后的 532 nm 二次谐波转换效率

Fig. 1 Calculated 532 nm second-harmonic conversion efficiency in KTP crystals as a function of 1064 nm input fundamental laser intensity in a quadrature frequency conversion scheme

实验中使用的基波光束重复频率仅为10 Hz或者30 Hz,热致退偏效应很小。这种情况下,在各种引起非线性光学频率变换效率的因素中,光束发散是其中最主要的因素^[8]。因此,主要考虑光束发散角的变化对频率变换效率的影响。如果基波重复频率高,热效应严重的话,应该考虑热致退偏的影响。

多模激光较大的光束发散角使得其倍频效率的提高受到了限制。如果采用的基波光束功率密度为100 MW/cm²,通过计算可以得到如图2所示的不同光束发散角时采用正交频率变换方式的二次谐波转换效率。可见,在基波功率密度不变的条件下,随着光束发散角的增大,二次谐波转换效率越来越低。在基波光束发散角接近于0时,谐波转换效率超过90%;而在基波光束发散角为6 mrad时,谐波转换效率低于45%。可见,基波激光的光束发散角对二次谐波转换效率的影响很大。

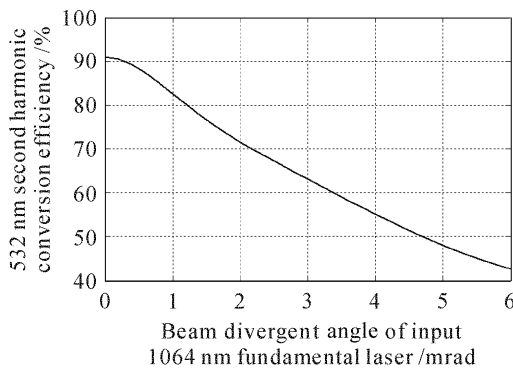


图2 计算得到不同1064 nm基波光束发散角经过KTP晶体正交频率变换后532 nm的二次谐波转换效率

Fig. 2 Calculated 532 nm second-harmonic conversion efficiency in KTP crystals as a function of the beam divergent angle of 1064 nm input fundamental laser in a quadrature frequency conversion scheme

3 实验研究

利用一套电光调Q的全固态Nd:YAG多模激光器进行正交频率变换的实验研究,该激光器的重复频率为10 Hz。由于基波中包含高阶模,光束发散角较大。在激光能量密度120 MW/cm²的情况下,使用激光光束质量分析仪对其输出的1064 nm基波进行分析,其光束中包含高阶横模,光束横截面内水平和垂直方向的发散角分别为1.621 mrad和1.445 mrad,其M²因子分别为3.01和2.76。当输入电流较小、输出功率较低时,光束发散角稍小。

倍频晶体放在铜质支架上,晶体和支架之间具

有高效的热传导,整个支架通水冷却,水温控制在29 ℃。两块晶体主平面正交放置,1064 nm基波首先通过λ/2波片旋转到合适的偏振方向,然后通过两块晶体,倍频后经双色镜滤去剩余基波,测量二次谐波的功率。实验装置如图3所示。

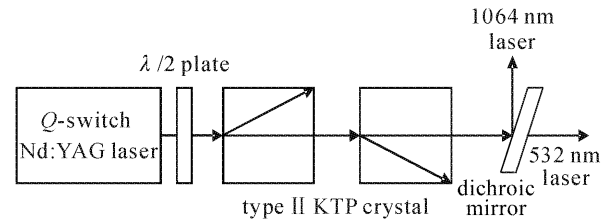


图3 使用KTP晶体正交倍频实验的装置示意图

Fig. 3 Experimental setup for second harmonic generation in a quadrature frequency conversion scheme using KTP crystals

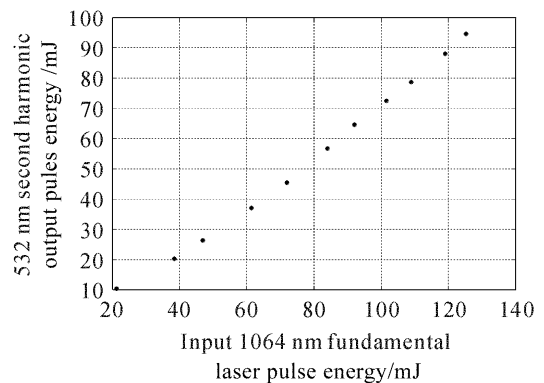


图4 不同1064 nm能量基波入射时经过正交频率变换后得到的532 nm二次谐波能量

Fig. 4 532 nm second harmonic output energy as a function of the input 1064 nm fundamental laser in the quadrature frequency conversion scheme

图4为实验中在不同的基波(1064 nm)输入能量时,所获得的532 nm二次谐波的脉冲能量,结果中并没有考虑由于晶体吸收、表面反射、散射等造成的损失。由图4可见在基波输入能量125.3 mJ时,对应的二次谐波输出能量为94.6 mJ。

图5是根据实验结果计算得到的在不同的1064 nm基波功率密度条件下的532 nm二次谐波转换效率。由图5可见,在基波功率密度为121 MW/cm²时获得的二次谐波转换效率达到了75.5%。

如果把激光器的重复频率增加到30 Hz,由于激光晶体的热效应等原因,光束质量变得更差,光束发散角增加。在基波激光功率密度为121 MW/cm²时,仅可以获得约62.7%的532 nm二次谐波转换效率。此时的基波光束中也包含高阶横模,光束横截

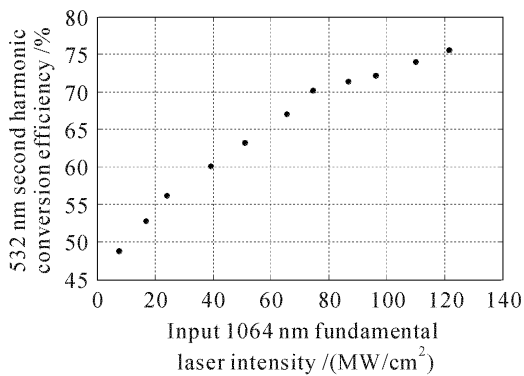


图 5 不同 1064 nm 功率密度基波入射时经过 KTP 晶体正交频率变换后得到的 532 nm 二次谐波转换效率 (基波重复频率 10 Hz)

Fig. 5 Second-harmonic conversion efficiency in KTP crystals as a function of 1064 nm input fundamental laser intensity in the quadrature frequency conversion scheme (the laser operates at 10 Hz)

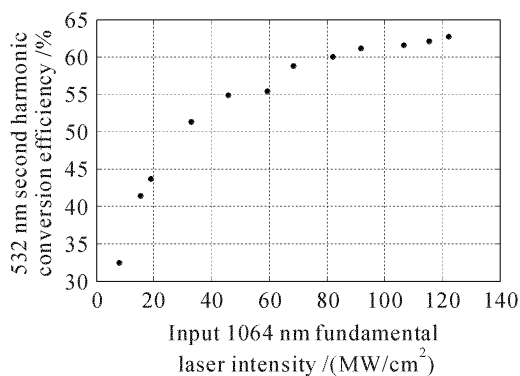


图 6 不同 1064 nm 功率密度基波入射时经过 KTP 晶体正交频率变换后得到的 532 nm 二次谐波转换效率 (基波重复频率 30 Hz)

Fig. 6 Second-harmonic conversion efficiency in KTP crystals as a function of 1064 nm input fundamental laser intensity in the quadrature frequency conversion scheme (the laser operates at 30 Hz)

面内水平和垂直方向的发散角分别为 2.451 mrad 和 2.416 mrad, 其 M^2 因子分别为 6.11 和 6.19。实验结果如图 6 所示。

比较图 5 和图 6 可以看到, 含有高阶模的基波光束在倍频过程中其二次谐波转换效率在很大程度上受到发散角的影响。发散角越大, 转换效率越低。实验中获得的结果相对于同样使用正交倍频方法的文献^[5~7,10,11]所获得的二次谐波转换效率来说不高。其主要原因是虽然基波热致退偏效应很小, 但是由于其质量较差(含有高阶横模, 光束发散角大),

且采用了简单的基波单次通过倍频晶体的结构。例如, 在文献[5,10]中, 基波在空间分布为接近衍射极限的高斯光束。文献[6]中的基波光束为单纵模且其空间分布为近乎平顶的光束, 同时基波两次通过晶体。文献[7]中的基波光束质量较高且四次通过晶体, 而且他们的倍频装置结构都比较复杂。

4 结 论

对于多种横模混合的光束质量较差的 Nd:YAG 1064 nm 激光, 采用正交倍频的方法, 在基波单次通过 KTP 晶体时获得了较高的二次谐波转换效率, 达到 75.5%。脉冲能量 125 mJ, 重复频率 10 Hz 的基波倍频后可得 94.6 mJ 的 532 nm 绿光输出。当入射的基波功率密度为 121 MW/cm² 时谐波转换效率达到了 75.5%, 同时讨论了基波光束质量对于倍频效率的影响, 并进行了实验对比。这种倍频方法对于较差的基波光束质量条件下的二次谐波转换也可获得较高的效率, 同时倍频装置结构简单, 不会对激光系统的结构紧凑性有太大影响。这对于获得高效率、高功率的全固态蓝绿激光器具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Xubao, Chen Jimin, Li Gang *et al.*. Study of frequency doubling in a KTP crystal on Q-switch Nd:YAG laser by the resonator external ring cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):477~480
王旭葆, 陈继民, 李 港 等. 调 Q Nd:YAG 环形腔外腔倍频技术研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4):477~480
- 2 Y. K. Yap, S. Haramura, A. Taguchi *et al.*. CsLiB₆O₁₀ crystal for frequency doubling the Nd:YAG laser [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **145**:101~104
- 3 Tang Chun, Gao Qingsong, Tong Lixin *et al.*. 160 W diode-pumped E-O Q-switched master oscillator power amplifier green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1455~1458
唐 淳, 高青松, 童立新 等. 160 W 激光二极管抽运电光调 Q 主振荡功率放大器绿光激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1455~1458
- 4 Degang Xu, Jianquan Yao, Baigang Zhang *et al.*. Influence of the KTP crystal boundary temperature on conversion efficiency in high power green laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(2):85~88
- 5 David Eimerl. Quadrature frequency conversion [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(8):1361~1371
- 6 Hiromitsu Kiriya, Fumihiko Nakano, Koichi Yamakawa. High-efficiency frequency doubling of a Nd:YAG laser in a two-pass quadrature frequency-conversion scheme using CsLiB₆O₁₀ crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(8):1857~1864
- 7 Hiromitsu Kiriya, Shinichi Matsuoka, Yoichiro Maruyama *et al.*. High efficiency second-harmonic generation in four-pass quadrature frequency conversion scheme [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **174**(5-6):499~502
- 8 David Eimerl. High average power harmonic generation [J].

- IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(5):575~592
- 9 J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing *et al.*. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric [J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(6):1918~1939
- 10 Kang Jun, Chen Shaohe, Zhu Jianqiang *et al.*. Highly stable second-harmonic pumping source with high conversion efficiency for optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):611~615
- 康俊,陈绍和,朱健强等. 高稳定高转换效率光参变放大器倍频抽运光源研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):611~615
- 11 Ji Lailin, Zhu Jian, Ma Weixin *et al.*. The dual-tripler scheme for increased-bandwidth of third harmonic generation in high power laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):120~123
- 季来林,朱俭,马伟新等. 利用晶体串接实现高效宽带三倍频[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊):120~123

《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

具体要求:综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

引言,要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

正文,是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

结论,是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

参考文献,是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

《中国激光》编辑部