

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0142-03

PPLT 光学超晶格全固态蓝红双波长激光器的研制

罗国珍 祝世宁 何京良 朱永元 王慧田 李 锐 刘照伟 张 超 闵乃本

(南京大学固体微结构国家重点实验室, 南京 210093)

提要 用周期极化的 LiTaO₃ (PPLT), 对 LD 抽运、声光 Q 开关调制的 1342 nm Nd:YVO₄ 激光源进行倍频和三倍频, 可以获得 447 nm 蓝光和 671 nm 红光的有效输出。一阶和三阶倒格矢分别补偿倍频及和频过程中的相位失配。在入射基波平均功率为 500 mW 时, 获得的蓝光平均功率为 51 mW, 红光平均功率为 207 mW。此实验结果表明 PPLT 可以用于构建全固态蓝红双波长激光器。

关键词 周期极化钽酸锂光学超晶格, 三倍频, 全固态激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

All-solid-state Blue and Red Dual Wavelength Laser Based on PPLT Optical Superlattice

LUO Guo-zhen ZHU Shi-ning HE Jing-liang ZHU Yong-yuan WANG Hui-tian
LI Kun LIU Zhao-wei ZHANG Chao MING Nai-ben

(National Laboratory of Solid Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Generations of efficient blue light at 447 nm and red light at 671 nm were achieved by frequency doubling and tripling of a diode-pumped, Q-switched 1342 nm Nd:YVO₄ laser with a periodically-poled LiTaO₃ (PPLT). The first-order and third-order vector reciprocals of the PPLT compensated the phase mismatches of second-harmonic and sum-frequency processes, respectively. The resulting averaged blue light power of 51 mW and red light power of 207 mW under the averaged fundamental power of 500 mW indicate that the PPLT may be used to construct an all-solid-state blue and red dual wavelength laser.

Key words PPLT optical superlattice, frequency tripling, all-solid-state laser

近年来, 使用光学超晶格, 如周期极化的 LiNbO₃^[1-3]、LiTaO₃^[4,5]、KTiOPO₄^[6,7] 等, 通过准相位匹配来实现对近红外波段的倍频从而输出产生可见光越来越为人们所重视。有报道表明, 使用光学超晶格, 已经将二极管抽运 1064 nm^[1,7] 和 946 nm^[2,6,8] 的 Nd:YAG 激光倍频分别产生了绿光和蓝光。

Nd:YVO₄ 晶体中 Nd³⁺ 离子的 F_{3/2} - I_{13/2} 跃迁有很强的发射谱线, 其波长为 1342 nm, 偏振方向沿 Z 轴^[9]。利用诸如 KTP 和 LBO^[9-11] 等非线性光学晶体, 这一波长可以通过倍频产生 671 nm 红光。本文报道用 PPLT 晶体对 Nd:YVO₄ 该谱线进行三

倍频来产生 447 nm 蓝光的研究结果。

一般来说, 一个三倍频过程的实现是利用两块非线性晶体的两个步骤来实现的。分别来说, 第一步实现倍频(SHG), 第二步则实现和频(SFG)。在我们的早期工作中, 利用斐波那契准周期超晶格^[12] 已经在实验上实现了在一块非线性晶体来产生有效的三倍频。其基本原理是: 准周期结构的超晶格提供两个倒格矢分别通过补偿 SHG 和 SFG 所引起的波矢失配, 通过级联的 QPM 过程产生了从基波到倍频, 三倍频持续的能量转移。准周期结构中的基本单元和序列在设计上相当自由, 这就允许我们预先设计好任何的 QPM 三倍频过程中所需的两个倒格矢。通常在这种周期结构中不能同时提供这样的两个倒格矢, 主要是因为它所有的倒格矢都等于 $2\pi/\Lambda$ 整数倍。但是也存在一些例外, 在一些非线性

* 国家重点基础研究发展规划(973)、国家高技术项目(863)、国家自然科学基金(60078011、69938010)资助课题。

性晶体中,存在一些特殊波长的基波,它的和频过程的相位失配,恰好等于倍频过程的整数倍。在此情况下,周期超晶格也能提供两个恰当的倒格矢参与到 QPM 的三倍频过程。例如,参考文献[13]报道了一个在 $3.54 \mu\text{m} \sim 3.62 \mu\text{m}$ 的一氧化碳激光器中,使用 PPLN 实现 QPM 三倍频的过程。此周期结构的一阶倒格矢同时匹配 SHG 和 SFG 过程。在此文中,我们给出另一个例子:以 1342 nm 的 Nd:YVO₄ 激光器为基波光源,利用 PPLT 进行倍频和三倍频来同时产生蓝光和红光。周期结构一阶和三阶倒格矢分别补偿了 SHG 和 SFG 过程中的波矢失配。我们的试验结果为运用全固态技术,同时产生高平均功率的蓝光和红光提供了一条可能的途径,因此具有特别重要的意义。

我们首先考虑在 PPLT 中的 SHG 过程。为了获得最大的非线性转换效率,选择一阶倒格矢。共线作用下的准相位匹配条件为

$$k_s - 2k_f - \frac{2\pi}{\Lambda} = 0 \quad (1)$$

k_f, k_s 分别是基波波矢和二次谐波的波矢, Λ 是超晶格的周期。类似的, SFG 过程听 QPM 条件是:

$$k_t - k_s - k_f - m \frac{2\pi}{\Lambda} = 0 \quad (2)$$

k_t 是三次谐波的波矢, m 是倒格矢的级数。因为 SHG 过程已经使用了一阶倒格矢,为了获得最大的有效非线性系数, PPLT 的占空比取为 0.5, 所以我们不可能选择二阶倒格矢。出于这种考虑,在和频过程中,选择三阶倒格矢。联立(1)式和(2)式有:

$$3(k_s - 2k_f) = k_t - k_s - k_f \quad (3)$$

由于

$$k_{(f,s,t)} = \frac{2\pi n_{(f,s,t)}}{\lambda_{(f,s,t)}}$$

得到

$$3(2n_s - 2n_f) = 3n_t - 2n_s - n_f \quad (4)$$

n_t, n_s, n_f 分别是三次谐波、二次谐波和基波的折射率,它们与波长和温度的关系由 Sellmeier 色散方程决定^[14]。用数值方法解(4)式,当基波波长为 1342 nm 时,则温度为 $74.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 能同时满足 SFG 和 SHG 的 QPM 条件。将这些值代入(2)式和(1)式,得到周期 $\Lambda = 14.778 \mu\text{m}$ 。

以上的计算是基于基波长为 1342 nm , 也就是 Nd:YVO₄ 晶体中 Nd³⁺ 离子的 $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$ 的发射谱线来进行的。计算也表明 PPLT 中能够相位匹配的三次谐波波长并不仅限于某个特定的值,而是一段

狭窄的范围。事实上,相位匹配波长,温度和周期三个参数之间是密切相关的,在一个范围内调整工作温度和超晶格的周期可以改变匹配波长。图 1 表明工作温度与相位匹配基波波长和相位超晶格周期的关系。此图也表明还可以采用 Nd:YVO₄ 以外其他掺 Nd 的增益晶体,在 PPLT 中产生蓝光,例如 Nd:YAP, 它的 Nd³⁺ 离子 $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$ 发射谱线波长为 1341 nm 。

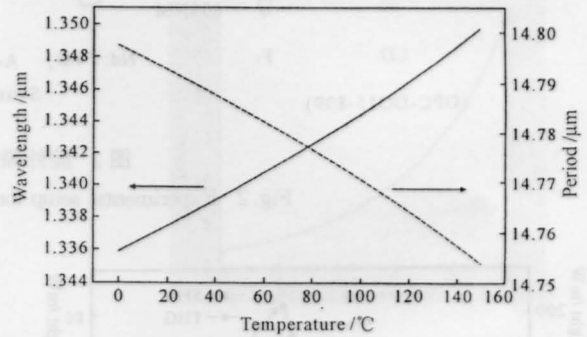


图 1 匹配波长和对应周期与温度的关系

Fig. 1 Matching wavelength and corresponding period versus temperature

PPLT 样品利用标准的外电场极化技术制备。样品厚 0.5 mm , 长 12 mm 。端面抛光,未镀膜。图 2 是实验装置图。实验用的基波光源是声光 Q 开关 1342 nm 的 Nd:YVO₄ 激光器,由连续的近红外 809 nm 二极管激光器进行抽运(型号 OPC-DO15-809)。抽运光用焦距为 35 mm 的透镜 F_1 会聚进入 Nd:YVO₄ 晶体中,晶体的尺寸是 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。激光腔一共由两面腔镜组成,一面腔镜直接镀在 Nd:YVO₄ 晶体输入端面,它对 1342 nm 高反而对 809 nm 高透;另外一面腔镜镀在输出耦合镜上,对 1342 nm 的反射率为 92% ,如图 2 所示。为了减少损失, Nd:YVO₄ 晶体的输出端面对 1342 nm 高透。激光腔里的声光调 Q 开关把连续输出激光变成准连续脉冲激光,每一脉冲持续时间为 90 ns , 重复频率为 10 kHz 。透镜 F_2 焦距为 25 mm , 估计样品内的束腰半径为 $50 \mu\text{m}$ 。入射在样品端面的基波平均功率为 500 mW , 相应的峰值功率为 0.56 kW 。考虑样品前表面 13% 的非涅尔反射,实际进入到 PPLT 样品中的平均基本功率和峰值功率分别为 430 mW 和 0.48 kW 。束腰处的峰值光强为 24.4 kW/cm^2 。样品在加热炉中(型号为 OTC-PPLN-20, Super Optonics 公司产品)加热到所需的相位匹配温度,精度为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。样品中产生的红光和蓝光在输出端用合适的滤波片滤波,用功率计来

测量(型号 EPM1000, Moletron 公司产品)功率。

图 3 表明 SHG 和 THG 的输出功率与温度关系的实验结果,测量到的 SHG 和 THG 的相位匹配温度分别为 92.5 °C 和 85.6 °C,与期望值 74.1 °C 不一

致。可能是 Sellmeier 色散方程^[14]在这一波长区域内的准确性以及光刻精度的限制造成结构周期上的微小偏差,从而使倍频与和频的相位匹配温度出现偏离。

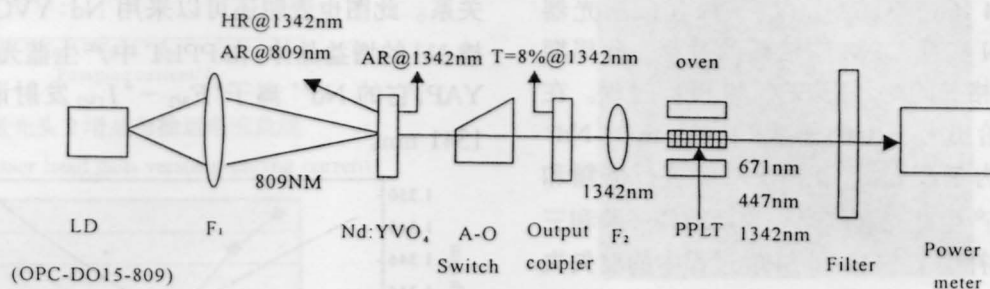


图 2 腔外频率转换的实验装置

Fig. 2 Experimental setup for the extracavity frequency conversion

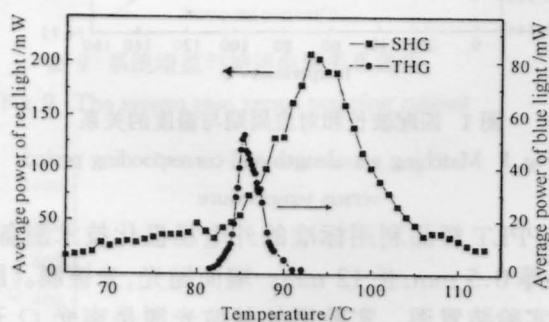


图 3 二次和三次谐波输出与温度的函数关系

Fig. 3 The SHG and THG output powers as a function of the temperature

转换效率用 $\eta = p_s/p_f$ 定义。 p_s 是蓝光或红光的平均功率, p_f 是入射在晶体表面的 1342 nm 基波平均功率。在图 3 中,测量到的最大平均功率如下,蓝光 51 mW,红光 207 mW,效率分别为 10.2% 和 41.4%。考虑晶体前后表面的反射,内部转化的最大效率要高于以上数值。在 THG 峰值所在的位置 85.6 °C,SHG 的输出功率为 48 mW。此时,红光和蓝光处于同样的功率水平。在整个测量过程中,蓝光功率在峰值处波动小于 2%,在实验中没有观察到输出功率或光束质量有明显的降低,表明在该实验条件下光折变效应是可以忽略的。

利用 LiTaO₃ 晶体 SFG 过程中相位失配是 SHG 过程中相位失配的三倍,可以设计周期为 14.778 μm 的 PPLT 来实现 Nd:YVO₄ 激光器在 1342 nm 线的倍频和三倍频。生成的 447 nm 的蓝光和 671 nm 的红光最高平均输出功率分别为 51 mW 和 207 mW,效率为 10.2% 和 41.4%,与准

期结构相比,周期结构有效非线性系数更大,样品的极化更方便。简明的结构和高转化率吸引人们想通过该设想来获得全固态红光、蓝光双波长激光器。

参 考 文 献

- 1 G. D. Miller, R. G. Batchko, W. M. Tulloch *et al.* *Opt. Lett.*, 1997, **22**(24):1834~1836
- 2 G. W. Ross, M. Pollnau, P. G. R. Smith *et al.* *Opt. Lett.*, 1998, **23**(3):171~173
- 3 R. G. Batchko, M. M. Fejer, R. L. Byer *et al.* *Opt. Lett.*, 1999, **24**(18):1293~1295
- 4 S. N. Zhu, Y. Y. Zhu, H. F. Wang *et al.* *J. Phys. D*, 1995, **28**:2389~2391
- 5 Y. Kitaoka, K. Mizuuchi, K. Yamamoto *et al.* *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24):1972~1974
- 6 M. Pierrou, F. Laurell, H. Karlsson *et al.* *Opt. Lett.*, 1999, **24**(4):205~207
- 7 A. Englander, R. Lavi, M. Katz *et al.* *Opt. Lett.*, 1997, **22**(21):1598~1600
- 8 A. Harada, Y. Nihei, Y. Okazaki *et al.* *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11):805~807
- 9 J. L. He, H. L. Zhang, W. Hou *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(5):343~344
- 10 A. Agnesi, G. C. Reali, P. G. Gobbi. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(7):1297~1300
- 11 H. L. Zhang, J. L. He, W. Hou *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(11):807~809
- 12 S. N. Zhu, Y. Y. ZHu, N. B. Ming. *Science*, 1997, **278**(5339):843~846
- 13 O. Pfister, J. S. Wells, L. Hollberg *et al.* *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16):1211~1213
- 14 J. P. Meyn, M. M. Fejer. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16):1214~1216