

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0099-03

## 二极管抽运全固态 Nd:YVO<sub>4</sub>/PPLT 红光激光器

何京良<sup>2</sup> 罗国珍<sup>1</sup> 王慧田<sup>1</sup> 祝世宁<sup>1</sup> 朱永元<sup>1</sup> 陆宏<sup>1</sup> 闵乃本<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>南京大学固体微结构国家重点实验室, 南京 210093)  
(<sup>2</sup>山东大学物理系, 济南 250014)

**摘要** 报告了使用周期极化的钽酸锂超晶格(PPLT)对二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 1342 nm 谱线进行腔外直接单通倍频获得有效 671 nm 红光输出的研究结果。实验所用样品长为 20 mm, 周期为 14.77 μm。获得的最高红光输出平均功率为 840 mW, 此时 808 nm 抽运光的功率为 12.3 W, 总的光-光转换效率达到 6.8%。在 1342 nm 的基波光功率为 647 mW 时, 得到从 1342 nm 到 671 nm 的转换效率为 63%。另外, 在连续波模式下测得样品的有效非线性系数为 3.8 pm/V。

**关键词** 周期极化钽酸锂超晶格, 倍频, 全固态激光器  
**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

### Diode-pumped All-solid-state Red Laser of Nd:YVO<sub>4</sub>/PPLT

HE Jin-liang<sup>2</sup> LUO Guo-zhen<sup>1</sup> WANG Hui-tian<sup>1</sup> ZHU Si-ning<sup>1</sup>  
ZHU Yong-yuan<sup>1</sup> LU Hong<sup>1</sup> MING Nai-ben<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093)  
(<sup>2</sup> Physics Department, Shandong Normal University, Jinan 250014)

**Abstract** An efficient red light generation in a periodically poled LiTaO<sub>3</sub> (PPLT) by extracavity single-pass frequency doubling of a diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 1342 nm is reported. The sample used in the experiment is 20 mm in length and 14.77 μm in period. The maximum output power of the 671 nm red laser is 840 mW, when the pump power of 808 nm is 12.3 W. The overall optical-to-optical efficiency is 6.8%. An internal conversion efficiency of 63% is obtained when fundamental power of 1342 nm is 647 mW. The measured effective nonlinear coefficient under the CW mode of the sample is ~4.6 pm/V.

**Key words** PPLT, frequency doubling, all-solid-state laser

## 1 引言

红色、绿色和蓝色是我们视觉世纪的三原色。对于高清晰激光打印、激光彩色全息显示等高科技领域, 小巧、可靠的红绿蓝光源是必不可少的。尽管目前二极管红光激光器已经有了广泛应用<sup>[1-3]</sup>, 蓝光二极管激光器也已出现<sup>[4]</sup>。但是由于二极管激光器光束质量差, 本身的发散大, 并不适合激光显示等应用领域。而二极管抽运全固态激光器由于其光束质量好、线宽窄、发散小等优点, 正越来越多地应用

于当代光电技术中。

对近红外半导体激光器抽运激光介质产生红外激光作为基波光源进行二次谐波产生(SHG), 是目前产生全固态可见激光的最常见的方法。激光介质可以是诸如 Nd:YAG 或 Nd:YVO<sub>4</sub> 等。传统的二次谐波产生方法是在非线性光学晶体中利用晶体的双折射实现相位匹配, 从而获得高效倍频输出。近十年来, 准相位匹配(QPM)技术已经引起了人们的广泛关注。QPM 技术利用了 PPLN、PPLT、PPKTP 等光学超晶格材料, 不仅使得人们可以利用晶体非线性系数中最大的一项  $d_{33}$ , 而且可以将匹配的范围覆盖材料的整个透明波段。

Nd:YVO<sub>4</sub> 是一种优秀的增益介质, 它在红外

\* 南京大学重点实验室访问学者基金、国家自然科学基金(60078011)资助课题。

1342 nm 处有很高的发射强度,对应于  $\text{Nd}^{3+}$  离子  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$  跃迁,其偏振方向沿  $z$  轴。已有文献报道<sup>[5-7]</sup>使用 KTP 和 LBO 两种非线性光学晶体通过相位匹配对其进行倍频获得了 671 nm 红光,但目前为止使用光学超晶格通过准相位匹配来实现有效的红光倍频仍未见报道。本文报道了在周期极化的钽酸锂晶格(PPLT)中,利用一级准相位匹配对 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体 1342 nm 谱线进行腔外倍频的实验结果。我们得到平均功率为 840 mW 的红光输出,此时从 808 nm 的抽运光输出到 671 nm 红光输出的光-光转换功率为 6.8%;在 647 mW 的基波光功率下,得到从 1342 nm 到 671 nm 63% 系统内转换功率。实验结果表明,这是获得大功率全固态红光激光的一条切实可行的途径。

## 2 SHG 样品的设计和制备

根据 QPM 理论,周期超晶格的有效非线性系数为

$$d_{\text{eff}} = \frac{2d_{33}}{\pi m} \sin(\pi m D)$$

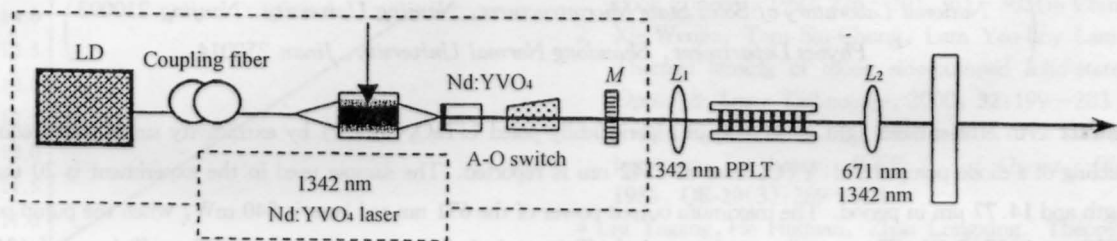


图1 实验装置。Nd:YVO<sub>4</sub>晶体:前端面镀膜为 HR@1342 nm 和 AR@809 nm 作为腔内反射镜,输出端镀有 AR@1342 nm 以减小损失;声光 Q 开关,规格 NEOSN33080-4.5-1-I;M:输出耦合镜,镀膜为  $T=8\%$ @1342 nm;凸透镜  $L_1$  和  $L_2$ ,焦距分别为 25 mm 和 50 mm;F:红外滤波片;PPLT 光学超晶格,周期为 14.77  $\mu\text{m}$

Fig.1 Experimental arrangement for the extracavity frequency doubling. Nd:YVO<sub>4</sub> crystal (the front end-face with films HR@1342 nm and AR@809 nm is a reflective mirror of the cavity, the output end-face is coated with film AR@1342 nm to suppress the loss); The A-O switch (NEOS N33080-4.5-1-I); M: the output coupler of the cavity with the film  $T=8\%$ @1342 nm; convex  $L_1, L_2$ , with focal length 25 mm and 50 mm; F: the filter; the PPLT optical superlattice with period of 14.77  $\mu\text{m}$

## 3 实验结果和讨论

图1是实验的装置图,其基波光源为二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器,波长为 1342 nm。增益晶体的尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm。激光腔由两面腔镜组成,其中之一是增益晶体的镀膜输入端面,另外一面是输出镜,图1中列出了各面上膜的性质。腔内放有声光调 Q 开关,经过其作用后,产生的激光脉冲频率为 10 kHz,宽度为 90 ns(波形如图2所示)。

$m$  为 QPM 级数。当占空比  $D = 0.5, m = 1$  时,  $d_{\text{eff}}$  达到最大值。此时晶格周期为

$$\Lambda = \lambda_{\omega} / [2(n_{2\omega} - n_{\omega})] \quad (1)$$

其中  $\lambda_{\omega}$  是基波波长,  $n_{\omega}$  和  $n_{2\omega}$  分别是基波和二次谐波的折射率。利用参考文献[8]中的 Sellmeier 公式,将超晶格的周期设定为 14.77  $\mu\text{m}$ ,此时对应的相位匹配温度较高,可以消除光折变效应。

实验所用 PPLT 样品长 20 mm,厚度为 0.5 mm。利用室温外电场极化技术获得所需的畴结构。极化前,在 LiTaO<sub>3</sub> 晶片的 +C 面上镀上周期结构的铝电极,并在 -C 面上镀上平电极。+C 面上电极宽度为 3.5  $\mu\text{m}$ 。通过控制极化时传输给样品的电量,可以使畴扩展到大约半个周期的宽度。通过自发极化强度  $P = 0.5 \text{ C/cm}^2$  可以估算所需电量。样品先在绝缘油中极化,然后在室温下用氢氟酸腐蚀约 1 h,来观察畴的结构。极化成功后样品的畴结构相当均匀,缺陷很少。占空比接近但不是严格的 50%,这一点会影响有效非线性系数,我们将在下文中讨论。为了便于测量,将样品的两个端面加以抛光,但并未镀膜。

透镜  $F_2$  的焦距为 25 mm,样品内的束腰半径约为 50  $\mu\text{m}$ 。在中等的基波功率下测量系统的 SHG 特性。入射的 1342 nm 基波平均功率为 744 mW,其相应的峰值功率为 827 W。由于样品的端面没有镀膜,考虑入射面上菲涅耳反射损失约为 13%。有鉴于此,实际参与二次谐波产生的基波平均功率为 647 mW,相应峰值功率为 719 W,束腰处的峰值能量密度约为 36.6  $\text{MW/cm}^2$ 。用加热炉(规格 OTC-PPLN-20, Super Optronics Lt.)将样品加热到相位匹

配所需温度,精度为 0.1 °C。得到的红光用适当的滤光片加以滤光,用功率计(规格 EPM1000, Moletron 公司)测量红光功率。

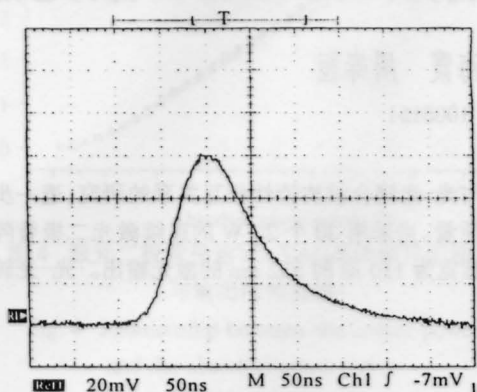


图2 利用 IR 纳秒光探测器测得激光器腔内产生的 1342 nm 红光脉冲

Fig.2 The infrared 1342 nm pulses generated from the laser cavity measured with a fast photodiode

输出的二次谐波的平均功率和温度之间的关系如图 3 所示,可见相位匹配温度为 94.2 °C,温度的带宽为 4.5 °C,比理论计算的 3.5 °C 为高。曲线的延展可能主要是由基波的强聚焦造成的,同时样品的少量缺陷也有可能引起曲线展宽。

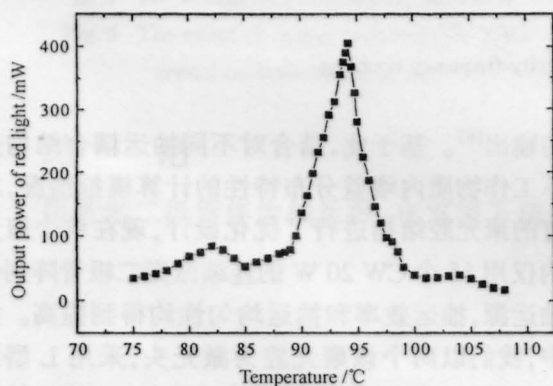


图3 PPLT 晶体输出红光平均功率与温度的关系 (温度带宽,  $\Delta T_{FWHM} = 4.5$  °C)

Fig.3 The average power of red light versus temperature

我们测试了红光能量输出的稳定性,在 380 mW 输出功率下测试 30 min,每 30 s 记录一次输出功率。结果表明其相对标准偏差为 3.2%,可见系统相当稳定,且在此光功率和作用温度下,光折变效应可以忽略不计。

为了测量有效非线性系数,将 PPLT 样品在 Nd:YVO<sub>4</sub> 1342 nm 激光器的连续光模式下进行测量。当晶体内基波功率为 1.8 W 时,得到连续红光

功率为 10 mW。根据文献[9],有效非线性系数可按式计算

$$d_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{out}}}{(P_{\text{in}})^2} \frac{\lambda_{\omega}^3 n_{\omega} n_{2\omega} \epsilon_0 c}{16\pi^2 l} \frac{1}{h\rho} \quad (2)$$

其中  $P_{\text{in}}$  是晶体内的基波功率,  $P_{\text{out}}$  是相应的二次谐波功率,  $\lambda_{\omega}$  为基波波长,  $n_{\omega}$  和  $n_{2\omega}$  分别为基波和二次谐波的折射率,  $l$  为样品长度,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $c$  为光速。标量因子  $h$  为无量纲量,用来量化聚焦和双折射的影响。在非严格的相位匹配相互作用下,作近最佳聚焦近似,  $h$  为单位量级。考虑到基波存在多种模式,需要引入因子  $\rho$ , 当多轴向模式  $N \geq 10$  存在时,  $\rho$  接近  $2^{10}$ 。在计算中取定  $h$  和  $\rho$  分别为 1 和 2。很显然由于在实际的实验条件下  $h$  和  $\rho$  要比 1 和 2 小,这样计算得到的  $d_{\text{eff}}$  将会有一定程度的偏小。将测得的数据代入(2)式,算得  $d_{\text{eff}}$  等于 3.8 pm/V。据文献报道, LiTaO<sub>3</sub> 的非线性系数  $d_{33}$  项对 1313 nm 和 1064 nm 的红外光分别为 10.7 pm/V 和 13.8 pm/V, 由此作线性近似推算可以得到对 1342 nm 红外光,  $d_{33}$  项等于 10.3 pm/V, 相应的  $d_{\text{eff}}$  为 6.6 pm/V, 测量值约为理论值的 60%。有效非线性系数的减小主要是由于占空比对于 50% 的偏差,同时样品畴结构中的少量缺陷对实验结果有一定影响。

### 参 考 文 献

- 1 M. Dumitrescu, M. Toivonen, P. Savolainen *et al.*. *Opt. & Quant. Electron.*, 1999, **31**:1009
- 2 M. Toivonen, P. Savolainen, S. Orsila *et al.*. *J. Crystal Growth*, 1999, **202**:877
- 3 F. Balembois, F. Falcoz, F. Kerboull *et al.*. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**:269
- 4 S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama *et al.*. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**:22
- 5 J. L. He, H. L. Zhang, W. Hou *et al.*. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**:343
- 6 A. Agnesi, G. C. Reali, P. G. Gobbi. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**:1297
- 7 H. L. Zhang, J. L. He, W. Hou *et al.*. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**:807
- 8 J. P. Meyn, M. M. Fejer. *Opt. Lett.*, 1997, **22**:1214
- 9 G. D. Boyd, D. A. Kleinman. *J. Appl. Phys.*, 1968, **39**:3597
- 10 S. Helmfrid, G. Arvidsson. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**:2326
- 11 I. Shoji, T. Kondo, A. Ktamoto *et al.*. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**:2268