

PPLT 倍频宽线宽掺镱双包层光纤放大激光*

杜建新^{1,2} 楼祺洪¹ 薛冬^{1,2} 周军¹ 孔令峰¹ 董景星¹
魏运荣¹ 任铁未³ 朱永元³

(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)

(3 南京大学微结构实验室 物理系 南京大学, 南京 210093)

摘 要 分别通过理论和实验研究了周期性极化的钽酸锂(PPLT)倍频宽线宽准连续掺镱双包层光纤放大激光. PPLT 样品长为 40 mm, 极化周期为 7.67 μm . 基频光的中心波长为 1064 nm, 线宽约为 6 nm. 从基频光的光谱特性出发, 利用超晶格倍频理论, 解释了实验中获得的倍频温度与二次谐波功率之间的关系. 在基频光的功率为 2.2 W 时, 获得的宽线宽光纤激光倍频效率为 1.8%.

关键词 周期性极化的钽酸锂超晶格; 宽线宽; 双包层光纤放大; 倍频

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

近年来, 绿光激光器在彩色显示、激光分色、医疗及娱乐中的作用越来越突出, 特别是全固态绿光激光器, 在科研、军事中的需求量越来越大, 虽然二极管泵浦的固体激光器比灯泵的固体激光器在体积方面有所改善, 但在散热效率方面还不很理想. 一种小型化、散热特性好的绿光激光器产生已成为发展的要求. 20 世纪 80 年代后期发展起来的双包层光纤技术, 使光纤激光器的转换效率和输出功率得以大大提高, 并且有着接近衍射极限的光束质量和小巧、散热面积大、全固化的优点^[1~4], 采用对 1.064 μm 双包层光纤激光倍频来获得绿光日益受到人们的关注. 在所有的倍频晶体中, 基于准位相匹配理论而设计、制备的介电体超晶格扮演了非常活跃的角色. 与利用双折射位相匹配的倍频技术相比, 准位相匹配技术对光的偏振方向没有特殊要求, 所以可以利用晶体的最大非线性光学系数, 而且准位相匹配是非临界位相匹配, 走离角较小. 因此, 晶体的通光长度不存在限制. 这些因素决定了即使在连续或准连续光的领域, 光学超晶格也有比较高的转换效率. 2000 年, S. V. Popov 等人采用种子注入的双包层光纤放大器输出的 1.064 μm 激光作为基频光, 周期性极化的 KTP 超晶格作为倍频晶体获得了平均功率 6 W 的绿光输出^[1], 周期性极化的钽酸锂超晶格用于种子注入的双包层光纤放大激光的倍频也有报道^[5]. 相对于前两者, 钽酸锂超晶格的非线性系数虽然低一些, 但抗光损伤能力较强, 日益

受到人们的重视^[6,7], 但到目前为止, 未见利用 PPLT 对双包层光纤放大激光进行倍频的报道. 本文采用南京大学固体微结构实验室通过高压脉冲极化法制备的 PPLT 实现了宽线宽准连续掺镱双包层光纤放大激光倍频.

1 倍频实验

基波光源为种子注入的准连续掺镱双包层光纤放大激光, 中心波长为 1064 nm, 输出的光束直径约为 1 cm, 光纤激光的带宽约为 6 nm, 重复频率为 20 kHz~100 kHz, 输出功率为 0~10 W 可调. 倍频晶体 PPLT 由南京大学固体微结构实验室采用室温外电场极化法制备, 长度为 40 mm, 宽度为 3 mm, 厚度为 0.5 mm, 端面没有镀膜. PPLT 极化周期为 7.67 μm , 对 1064 nm 倍频的理论上的最佳温度 120 $^{\circ}\text{C}$.

实验装置如图 1: 透镜 L_1 和透镜 L_2 的焦距分别为 12 mm、1.1 mm, 将输出光束整形为直径 1 mm 左右的光束; 用偏振棱镜 PBS 进行起偏, 使其成为水平偏振; 透镜 L_3 的焦距取 100 mm、30 mm 两种情况; PPLT 晶体放置在一个精密温度控制盒里, 温度控制范围为 30~230 $^{\circ}\text{C}$, 控制准确度为 0.1 $^{\circ}\text{C}$; 倍频光通过透镜 L_4 准直后, 由滤波片过滤后收集; 滤波片对 1064 nm 光的反射率为 99.9%, 对 532 nm 的透过率为 83.3%. 基频光脉冲的重复频率取 20 kHz. 透镜 L_3 的焦距取 100 mm、30 mm 取两种情况. 实

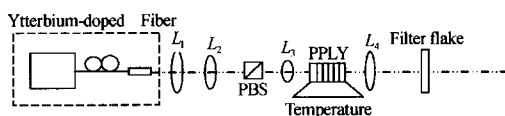


图 1 实验装置
Fig. 1 Schematic diagram of experimental configuration

* 南京大学固体微结构实验室开放课题重点项目(Z031001)
Tel: 021-69918629 Email: jianxindu888@163.com
收稿日期: 2004-11-03

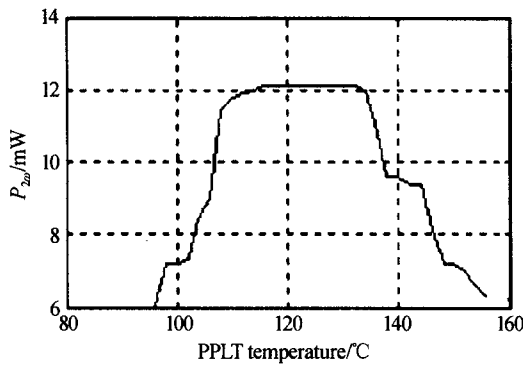


图2 $f_3=100$ mm, $P_\omega=3.8$ W 时, $P_{2\omega}$ 与倍频温度之间的关系

Fig. 2 $P_{2\omega}$ versus temperature with $f_3=100$ mm, $P_\omega=3.8$ W

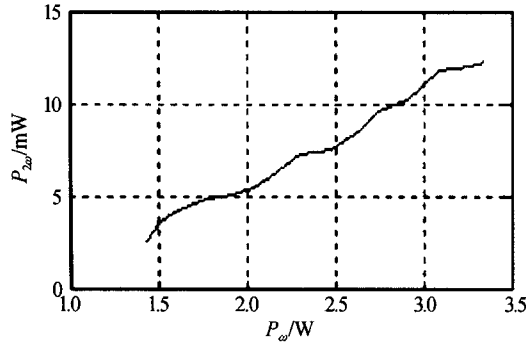


图3 $f_3=100$ mm, 倍频温度为 125°C 时, $P_{2\omega}$ 与 P_ω 之间的关系

Fig. 3 $P_{2\omega}$ versus P_ω with $f_3=100$ mm, temperature=125°C

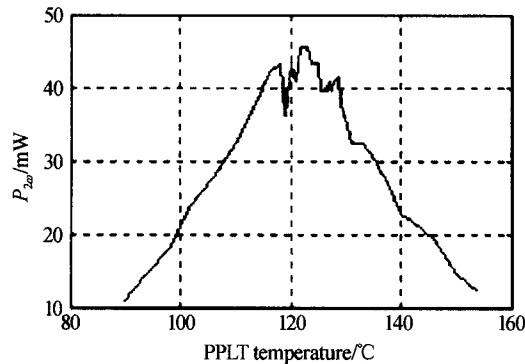


图4 $f_3=30$ mm, $P_\omega=3.8$ W 时, $P_{2\omega}$ 与倍频温度之间的关系

Fig. 4 $P_{2\omega}$ versus temperature with $f_3=30$ mm, $P_\omega=3.8$ W

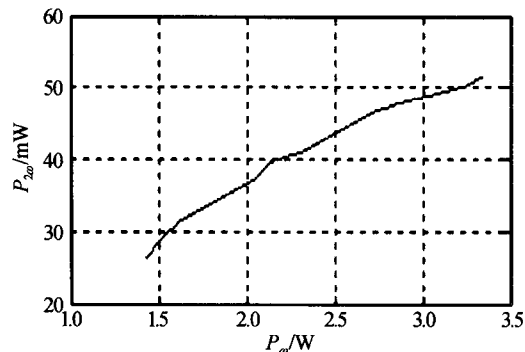


图5 $f_3=30$ mm, 温度为 125°C 时, $P_{2\omega}$ 与 P_ω 之间的关系

Fig. 5 $P_{2\omega}$ versus P_ω with $f_3=30$ mm, temperature=125°C

验中先用功率计测出透镜 L_3 后的基频光的功率,并考虑到 PPLT 样品入射面上约 13% 的非涅耳反射损耗,求出实际参与倍频的基频光的平均功率 P_ω . 根据测出的由滤波片过滤后的倍频光的功率值,在考虑到滤波片的透过率的情况下,求出实际产生的倍频光的平均功率 $P_{2\omega}$. 实验结果如图 2~图 5.

2 实验结果的讨论

根据超晶格倍频的准位相匹配理论

$$I_{2\omega} = \frac{32L^2 d_{33}^2}{n_\omega^2 n_{2\omega} \lambda_{2\omega} C \epsilon_0} |I_\omega|^2 \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta K L}{2}\right) \quad (1)$$

式中 L 为晶体长度, d_{33} 非线性系数, $\lambda_{2\omega}$ 为倍频光波长, C 为光速, ϵ_0 为真空中的介电常量, I_ω 为基频光功率密度, $I_{2\omega}$ 为倍频光的功率密度, ΔK 是波矢失配量

$$\Delta K = K_{2\omega} - 2K_\omega - \frac{2\pi}{\Lambda} = 2\pi\left(\frac{n_{2\omega}}{\lambda_{2\omega}} - \frac{2n_\omega}{\lambda_\omega} - \frac{1}{\Lambda}\right) \quad (2)$$

式中 Λ 为超晶格的周期, n_ω 和 $n_{2\omega}$ 分别对应钽酸锂中基波和倍频波的偏振方向沿晶体 Z 轴的折射率^[5]

$$n_i^2(\lambda, T) = A + \frac{B + b(T)}{\lambda^2 - [C + c(T)]^2} + \frac{E}{\lambda^2 - F^2} + D\lambda^2 \quad (3)$$

$$A = 4.5284; B = 7.2449 \times 10^{-3}; C = 0.2453;$$

$$D = -2.3670 \times 10^{-2}; E = 7.7690 \times 10^{-2}; F = 0.1838$$

$$b(T) = 2.6794 \times 10^{-8} (T + 273.15)^2$$

$$c(T) = 1.6234 \times 10^{-8} (T + 273.15)^2$$

T 是晶体的温度, 单位是 °C. λ 是光波波长, 单位是 μm .

由于基频光的光谱结构会对超晶格的倍频情况产生较大影响, 采用光栅摄谱仪获得了基频光的光谱结构如图 6. 可以看出其光谱结构对应 9 个峰值相对较高的纵模, 它们的中心波长分别对应: 1062.5 nm、1063.1 nm、1064.1 nm、1064.6 nm、1065.2 nm、1065.7 nm、1066.3 nm、1066.8 nm、1067.4 nm. 由式(2)和(3)可求出它们倍频时的最佳匹配温度为: 102.1°C, 109.2°C, 120.8°C, 126.5°C, 133.2°C, 145.3°C, 150.7°C, 157.0°C. 这样理论上整体上的温度带宽估计为 55°C, 这与实验值大致相符. 由式(1)、(2)和(3)还可求出每个中心波长对应约 0.2°C 的温度带宽. 以波长 1064.1 nm 为例, 给出了其归一化的倍频效率随温度的变化曲线, 如图 7. 虽然每个中心波长对应的温度带宽比较小, 但从基频光的光谱中可以看到每个纵模有不小于 0.1 nm 的带宽, 从而使每个纵模对应的温度带宽变得较大. 正是由于上述原因, 在倍频功率随温度的变化的实验

曲线中,几乎不出现多峰结构. 图 4 的温度曲线相对于图 2 有较为明显的差别,可能是强聚焦情况下的热效应和光折变效应引起.

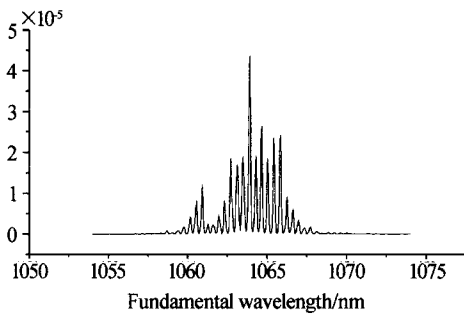


图 6 基频光的频谱结构
Fig. 6 Spectra of fundamental laser

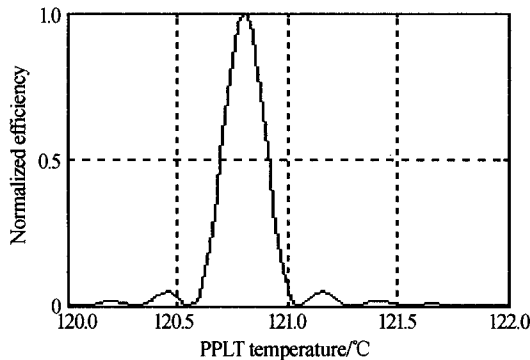


图 7 归一化的倍频效率与温度之间的关系
Fig. 7 Dependence of the second harmonic normalized efficiency on temperature

比较图 3 和图 5, 焦距 $f_3 = 30$ mm 有较高的倍频效率, 但 $P_{2\omega}$ 相对于 P_{ω} 的线性关系相对差些. 对于焦距 $f_3 = 30$ mm 的情况, 当基频光的功率为 2.2 W 时, 获得的宽线宽光纤激光倍频效率为 1.8%. 选用窄线宽种子源振荡的双包层掺镱光纤放大激光作为基频光将会较大程度上提高倍频效率. 下一步, 将在研制这种窄线宽基频光的基础上, 利用 PPLT 获得高转换效率的模式较好的倍频绿光.

参考文献

- 1 Popov S V, Chernikov S V, Taylor J R. 6-W average power green light generation using seeded high power Ytterbium fiber amplifier and periodically poled KTP. *Optics Communications*, 2000, **174**(1): 231~234
- 2 Guskov S A, Popov S V, Chernikov S V. Second harmonic generation around 0.53 μm of seeded Yb fibre system in periodically poled lithium niobate. *Electronics Letters*, 1998, **34**(14): 1419~1420
- 3 Zhu S N, Zhu Y Y, Ming N B, et al. Quasi-phase-matched third-harmonic generation in a quasi-periodic optical superlattice. *Science*, 1997, **278**(9): 843~845
- 4 梁晓燕, 侯玮, 汪家升, 等. 周期性极化 LiTaO₃ 的准连续倍频. *中国激光*, 2001, **28**(4): 307~309
Liang X Y, Hou W, Wang J S, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **28**(4): 307~309
- 5 冯鸣, 阮双琛, 杜晨林, 等. 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器中频率上转换产生可见光的实验研究. *光子学报*, 2004, **33**(6): 648~650
Feng M, Ruan S C, Du C L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 648~650
- 6 杨玲珍, 陈国夫, 王屹山, 等. 双包层掺 Yb³⁺ 光纤环形脉冲激光形成研究. *光子学报*, 2004, **33**(4): 648~650
Yang L Z, Chen G F, Wang Y S, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 648~650
- 7 陈柏, 陈兰荣, 范薇, 等. 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器波长调谐输出. *光子学报*, 1999, **128**(19): 835~838
Chen B, Chen L R, Fan W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **128**(19): 835~838
- 8 Meyn J P, Fejer M M. Tunable ultraviolet radiation by second-harmonic generation in periodically poled lithium tantalate. *Optics Letters*, 1997, **22**(16): 1214~1216

Second Harmonic Generation in PPLT Using a Broad-band Seeded Ytterbium-doped Double-clad Fiber Amplifier

Du Jianxin^{1,2}, Lou Qihong¹, Xue Dong^{1,2}, Zhou Jun¹, Kong Lingfeng^{1,2},
Dong Jingxing¹, Wei Yunrong¹, Ren Tiewei³, Zhu Yongyuan³

¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800

² Graduate of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039

³ Laboratory of Solid State Microstructures, Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093

Received date: 2004-11-03

Abstract The periodically poled LiTaO₃ frequency-doubling the broad-band and quasi-cw laser of seeded Ytterbium-doped double-clad fiber amplifier have been investigated experimentally and theoretically. PPLT is 40 mm long and 7.67 μm in period. The central wavelength of fundamental laser is 1.064 μm and 6 nm in bandwidth. Applying the quasi-phase matching theory and the character of fundamental laser spectrum, the relation of second harmonic power with the temperation was explained. The frequency-doubling efficiency of 1.8% is obtained when the broad band laser power is 2.2 W.

Keywords Periodically poled LiTaO₃; Broad band; Double-clad fiber amplifier; Frequency-doubling



Du Jianxin was born in 1972, Shandong Province, China. He got his M. S. degree in optics from Shandong Teacher Normal University in 2000. He is currently working as a Ph. D. candidate at Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His interests are in the fields of high-speed optical communication systems, nonlinear optics and fiber laser and frequency-doubling.