

文章编号: 0258-7025(2004)10-1165-04

# 连续钛宝石激光器光折变位相共轭外腔 的实验研究

张 明, 洪 治, 陈 军

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 利用 Ce:BaTiO<sub>3</sub> 晶体构成的自抽运位相共轭(SPPC)外腔,改善了连续钛宝石激光器的工作特性,使得激光输出阈值由未加位相共轭腔时的 4.7 W 下降到加位相共轭腔时的 3.6 W,斜率效率由 26% 上升为 30%。利用外腔激光理论对该实验结果进行了合理的分析。此外,由于位相共轭自扫描效应,导致了输出光中心频率在反馈后 3 min 时蓝移了 142 MHz,在 6 min 时红移了 243 MHz。通过直接测量暗条件下自抽运位相共轭反射率的衰减,得到了自抽运位相共轭光栅的暗存储特性。在暗条件下,位相共轭反射率在开始的 1.5 h 内由 80.5% 下降到 75%,随后缓慢下降,到 17 h 位相共轭反射率仍保持在 74%。

**关键词** 激光技术;钛宝石激光器;位相共轭外腔;Ce:BaTiO<sub>3</sub> 晶体

**中图分类号** TN 248. 1 **文献标识码** A

## Experimental Investigations of External Cavity Using Photorefractive Phase Conjugator for CW Ti:Sapphire Laser

ZHANG Ming, HONG Zhi, CHEN Jun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** With self-pumped phase conjugator (SPPC) of Ce:BaTiO<sub>3</sub>, the performance of CW Ti:sapphire laser has been improved. The output threshold decreases from 4.7 W (without phase conjugator cavity) to 3.6 W (with phase conjugator cavity) and the slope efficiency increases from 26% to 30%. Theoretic analyses with external-cavity laser theory are in accordance with the above experimental results. In addition, the frequency of the laser appears a blue shift of 142 MHz at 3rd minute after SPPC feedback and a red shift of 243 MHz at 6th minute after SPPC feedback, which are due to phase-conjugate self-scanning effect. Moreover, the dark storage characteristic of the SPPC grating is obtained by measuring the dark decay of SPPC reflectivities. In dark, the SPPC reflectivity declines from 80.5% to 75% in the initial 1.5 hours, subsequently decays slowly, and remains almost at the former value for about 15 hours.

**Key words** laser technique; Ti:sapphire laser; phase-conjugate external cavity; Ce:BaTiO<sub>3</sub> crystal

## 1 引 言

利用外腔的方法可以有效地改善激光器的输出特性,外腔镜可以是位相共轭镜和普通反射镜。普通镜外腔对外腔长度、与激光晶体的夹角角度等条件非常敏感,而位相共轭镜具有自适应的优点,反馈

回的位相共轭光与原腔在波前曲率和束腰上都是精确匹配的。在各种结构的位相共轭镜中,自抽运位相共轭镜(self-pumped phase-conjugate mirror, SPPCM)由于结构简单、使用方便而得到广泛的关注。纯 BaTiO<sub>3</sub> 和不同掺杂 BaTiO<sub>3</sub> 所具有的高自抽运位相共轭反射率为位相共轭镜外腔的使用提供

收稿日期:2003-05-15;收到修改稿日期:2003-10-10

基金项目:国家自然科学基金(编号:60078002)资助项目。

作者简介:张 明(1975—),男,浙江大学现代光学仪器国家重点实验室博士研究生,主要从事非线性光学和激光技术方面的研究。E-mail:hongzhi@zju.edu.cn

了条件<sup>[1~4]</sup>。

Hong 等<sup>[5]</sup>利用 Rh:BaTiO<sub>3</sub> 位相共轭镜将半导体激光器的输出功率最大增加超过 35%。L'bel 等<sup>[6,7]</sup>利用 Rh:BaTiO<sub>3</sub> 构成的自抽运位相共轭镜对大功率半导体激光器实现了单模输出。Gay 等利用 BaTiO<sub>3</sub> 构成的自抽运位相共轭镜对锁模<sup>[8]</sup>和连续<sup>[9]</sup>的氩离子激光器进行了降低输出光噪声、减少纵模和脉冲整形等方面的工作。另外,有很多研究者发现了位相共轭光的反馈会引起染料激光<sup>[10]</sup>和半导体激光<sup>[11]</sup>输出的频率扫描现象。此外,自抽运位相共轭镜还被应用于 Nd:YAG 主振荡功率放大器(MOPA)系统的消除位相畸变、改善光束质量上<sup>[12]</sup>。

由于位相共轭光栅的建立需要相当长的时间,因此位相共轭光栅的暗存储时间成了位相共轭外腔使用中的一个重要参数。暗衰减时间也是光折变材料应用于光存储时的一个重要参数,它通常通过光折变光栅的衍射实验来测量<sup>[13,14]</sup>(先在晶体中写入光栅,在暗条件下,每隔一段时间,测量该光栅的衍射效率,从而确定暗衰减时间)。

本文介绍了 Ce:BaTiO<sub>3</sub> 构成的连续钛宝石激光器光折变位相共轭外腔。应用该外腔,提高了连续钛宝石激光器的输出功率,降低了激光器的输出阈值,在实验中观察到了输出激光的频移现象。并用直接测量自抽运位相共轭反射率的方法来确定自抽运位相共轭光栅的暗存储特性。

## 2 实验装置

连续钛宝石激光器光折变位相共轭外腔实验装置如图 1 所示。极化过的 Ce:BaTiO<sub>3</sub> 晶体 0°切割,尺寸为 7.09 mm × 6.42 mm × 4.14 mm, c 轴沿 7.09 mm 长的一边(该晶体由中国科学院物理所提供)。

实验所用激光器为 532 nm 激光(Spectra-Physics Millennia X)抽运的可调谐钛宝石激光器(Spectra-Physics Tsunami 3960-x3s),激光器工作在连续状态,实验中激光输出波长调谐至 790 nm。

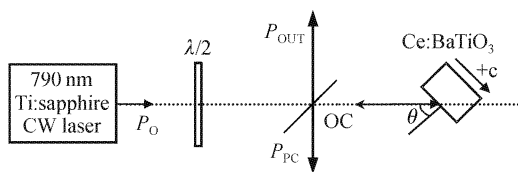


图 1 实验装置

$\lambda/2$ : 半波片; OC: 输出镜

Fig. 1 Experimental arrangement

$\lambda/2$ : half-wave plate; OC: output coupler

垂直偏振的输出光经半波片  $\lambda/2$  旋转成水平偏振光,经过输出耦合镜 OC 后 e 偏振入射到晶体上,光斑直径  $\phi 2$  mm。连接在功率计 Molelectron EPM 2000 上的功率探头 PowerMax PM3 用于测量位相共轭光  $P_{PC}$  和外腔系统输出光  $P_{OUT}$  的功率。其中 OC 镜反射率  $R_{OC} = 63.2\%$ ,半波片透过率  $T_{\lambda/2} = 86.9\%$ 。

实验中定义:在一定的 532 nm 抽运功率下,没有位相共轭光反馈时(即没有外腔作用时),钛宝石激光器的输出功率为  $P_{OB}$ ;而在外腔稳定工作时,钛宝石激光器的输出功率为  $P_{OA}$ 。

## 3 位相共轭外腔实验

与不掺杂的 BaTiO<sub>3</sub> 相比,Ce:BaTiO<sub>3</sub> 对可见光波段的长波长段<sup>[15]</sup>和近红外波段的短波长段<sup>[16]</sup>更敏感。在实验中,当用于产生自抽运位相共轭的激光波长为 532 nm 时,最大位相共轭反射率为 53.8%;当入射波长为 790 nm,入射角  $\theta = 50^\circ$ ,入射光斑直径  $\phi 1$  mm 时,位相共轭反射率最大,达 80.5%,可见该晶体更适合于 790 nm 波长产生自抽运位相共轭。

在  $\theta = 50^\circ$  时进行了连续钛宝石激光器光折变位相共轭外腔实验。用两个增益  $G_1 = P_{OUT}/P_{OB}$  和  $G_2 = P_{OA}/P_{OB}$  来分别说明激光输出功率的变化情况。 $G_1, G_2$  和  $P_{OB}$  关系的实验结果如图 2 所示。当  $P_{OB} = 33.1$  mW 时,  $P_{OUT}$  及  $P_{OA}$  分别为 254.5 mW 和 463.4 mW,即  $G_1 = 7.7, G_2 = 14$ ,随着  $P_{OB}$  的增加,  $G_1, G_2$  都逐渐减小;当  $P_{OB} = 313$  mW 时,  $G_1 = 1.3, G_2 = 2.3$ ,即此时的外腔输出比激光器没加位相共轭腔时的输出大;而当  $P_{OB}$  继续增加到 625 mW 时,  $G_1$  下降为 0.9,但此时  $G_2 = 1.6$ ,说明如果

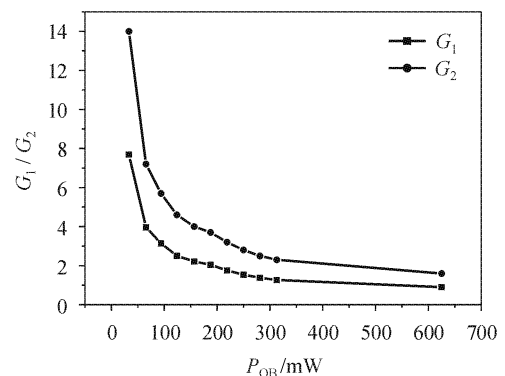


图 2 增益  $G_1, G_2$  与  $P_{OB}$  的关系

Fig. 2 Gain  $G_1, G_2$  versus  $P_{OB}$

减小 OC 透过率同样可以提高外腔输出。

另外, 实验中当入射到晶体上的光功率在 0~328 mW 时, 位相共轭反射率始终为~60%, 没有发现文献[5]中提到的位相共轭反射率随着入射功率增加而降低的现象(即位相共轭光功率饱和现象)。我们相信是由于光束束宽变大, 使得位相共轭反射率比小尺寸( $\phi 1$  mm)时降低。

位相共轭光的反馈使得钛宝石激光的输出阈值降低、斜率效率增加。加位相共轭外腔及未加位相共轭外腔时的斜率效率曲线如图 3 所示, 阈值从没有外腔时的 4.7 W 下降到加外腔后的 3.6 W, 同时斜率效率也由 26% 上升为 30%。由图 3 可知, 相同抽运功率(即相同  $P_{OB}$ ) 下激光输出功率的增加, 正是由于激光输出阈值降低和斜率效率增加的缘故。

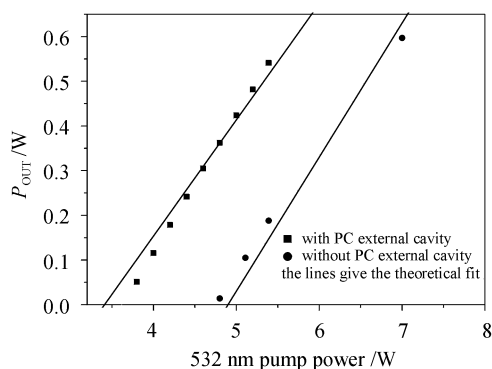


图 3 有位相共轭外腔及无位相共轭外腔时激光器输出功率  $P_{OUT}$  与抽运功率的关系

Fig. 3 Output power  $P_{OUT}$  versus pump power with and without phase conjugation (PC) external cavity

对于连续输出的激光器, 其输出斜率效率  $\sigma_s$  和输出阈值  $P_{th}$  可表示为<sup>[17]</sup>

$$\sigma_s = \frac{AI_s}{P_{th}} \frac{1 - R_f}{1 + R_f} \quad (1)$$

$$P_{th} = \frac{(L - \ln R_f) AI_s}{2\eta} \quad (2)$$

式中  $A$  为激活介质中振荡模的平均有效横截面积 ( $A = \pi\omega_0^2$ ,  $\omega_0$  为激活介质中振荡模的平均有效半径),  $I_s$  为激活介质的饱和光强,  $R_f$  为激光器输出镜的反射率,  $\eta$  为总的抽运效率,  $L$  为腔内除输出损耗外的其他损耗。对于外腔激光器, 上式依然适用, 只需将外腔镜的反馈耦合到激光输出镜的反射率中, 即用有效输出镜反射率  $R_{eff}$ <sup>[18]</sup> 替代  $R_f$

$$R_{eff} = \frac{R_f + R_{ext} + 2\sqrt{R_f R_{ext}}}{1 + R_f R_{ext} + 2\sqrt{R_f R_{ext}}} \quad (3)$$

式中  $R_{ext}$  为等效的外腔镜反射率,  $R_{ext} = T^2 R_{pc}$ ,  $T$  为

半波片和 OC 镜透过率之积,  $R_{pc}$  为位相共轭反射率 60%。对我们的激光器, 取  $L = 2\%$ ,  $R_f = 93\%$ ,  $\omega_0 = 80 \times 10^{-6}$  m,  $I_s = 2.02 \times 10^9$  W/m<sup>2</sup>,  $\eta = 0.38$ , 由 (3) 式可得  $R_{eff} = 95.7\%$ 。图 3 中实线分别为反馈前和反馈后的理论计算结果, 可以看出实验结果与理论计算结果基本相符。

由于位相共轭外腔的作用, 激光器阈值降低, 使得同样抽运功率下输出功率增加, 这就可以使钛宝石激光器工作在相对较低的抽运功率下, 从而提高激光器的使用寿命。

用厚度为 50 mm 的 F-P 标准具监测外腔输出激光线宽, 观察到位相共轭光注入反馈后引起了输出波长的频移。在初始入射到晶体上的功率为 200 mW 时, 用 CCD 连续记录了位相共轭光反馈前以及稳定反馈后 6 min 的标准具干涉图样。图 4(a) 为位相共轭光反馈前、稳定反馈后第 3 min 及稳定反馈后第 6 min 的干涉条纹图像, 图 4(b) 为从图 4(a) 中得出的条纹的光强分布曲线。从中可以看出, 在 3 min 时, 输出光频率相对于没有外腔反馈时蓝移了 142 MHz, 而在 6 min 时, 输出光频率相对于没有外腔反馈时红移了 243 MHz。这是由于 Ce:BaTiO<sub>3</sub> 晶体的频率自扫描效应引起的<sup>[10,11]</sup>。

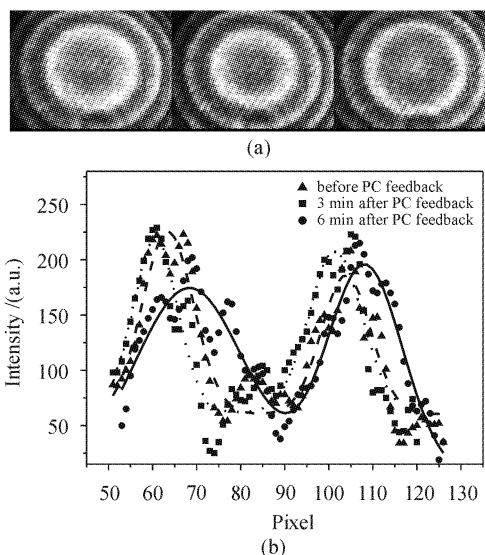


图 4 由于 Ce:BaTiO<sub>3</sub> 的自扫描引起的输出光频移  
(a) 从左到右依次是, 反馈前、反馈后第 3 min 和反馈后第 6 min 的条纹图;  
(b) 条纹的光强分布曲线

Fig. 4 Frequency shift of output laser due to self-scanning of Ce:BaTiO<sub>3</sub>

(a) they are respectively fringe profiles of before PC feedback, 3 min after PC feedback and 6 min after PC feedback from left to right; (b) fringe pattern

## 4 自抽运位相共轭光栅衰减特性

实验中发现,位相共轭光往往要经过大于 20 min 才能达到最大值,形成稳定的反馈,这显然不利于外腔的实际应用,所以自抽运位相共轭光栅(或自抽运位相共轭反射率)的暗衰减特性对实际应用尤其重要。我们提出了一种通过直接测量自抽运位相共轭反射率来确定位相共轭光栅在暗条件下存储特性的方法,测量方法如下:

在  $\theta = 50^\circ$ ,入射到 Ce: BaTiO<sub>3</sub> 晶体上的激光功率 32 mW 时,经过 30 min,位相共轭反射率达到最大值 80.5%,这时,关闭一切光源;在一定时间后,让同样功率激光入射到晶体上,测量并记录此时的位相共轭反射率。实验结果如图 5 所示。暗条件下,在开始的 1.5 h 位相共轭反射率下降很快,由最初的 80.5% 下降到 75%;而 1.5 h 后下降变得十分缓慢,到 17 h 位相共轭反射率仍保持在 74%,这说明自抽运位相共轭光栅有较长的暗存储时间,有利于该位相共轭外腔的实际应用。

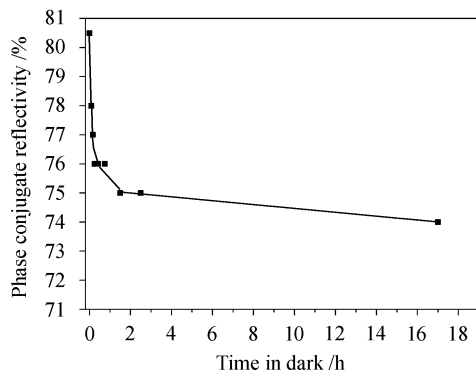


图 5 暗条件下自抽运位相共轭反射率的时间关系  
位相共轭反射率达到最大时 ( $t = 0$ ) 关闭所有光源

Fig. 5 Time dependence of the SPPC reflectivity in dark  
All light sources are tuned off as soon as the  
PC reflectivity reaches its highest value at  $t = 0$

## 5 结 论

对利用 Ce: BaTiO<sub>3</sub> 构成的连续钛宝石激光器光折变位相共轭外腔进行了实验研究。激光器的阈值由未加位相共轭腔时的 4.7 W 下降到加位相共轭腔时的 3.6 W,斜率效率由 26% 上升为 30%。激光器阈值的降低和输出功率的增加可以使钛宝石激光器工作在相对较低的抽运功率下,从而提高激光器的使用寿命。实验中还观察到由于位相共轭晶体的频率自扫描现象导致的输出光频移。并通过直接测量暗条件下自抽运位相共轭反射率的衰减,得到了

位相共轭光栅在暗条件下的存储特性。

## 参 考 文 献

- G. W. Ross, R. W. Eason. Highly efficient self-pumped phase conjugation at near-infrared wavelengths by using nominally undoped BaTiO<sub>3</sub>[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(16):1104~1106
- D. Rytz, R. R. Stephens, B. A. Wechsler *et al.*. Efficient self-pumped phase conjugation at near-infrared wavelengths using cobalt-doped BaTiO<sub>3</sub>[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(22):1279~1281
- A. Brignon, D. Geffroy, J.-P. Huignard *et al.*. Experimental investigations of the photorefractive properties of rhodium-doped BaTiO<sub>3</sub> at 1.06  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **137**:311~316
- Y. Zhu, C. Yang, M. Hui *et al.*. Phase conjugation of BaTiO<sub>3</sub>:Ce by backward stimulated photorefractive scattering [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(18):2341~2343
- Z. Hong, J. Chen, H. J. Eichler *et al.*. Beam profile improvement of a LD array by an external cavity with photorefractive phase conjugate mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **B9**(4):297~302
- M. Lφbel, P. M. Petersen, P. M. Johansen. Tunable single-mode operation of a high-power laser-diode array by use of an external cavity with a grating and a photorefractive phase-conjugate mirror [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(7):2000~2005
- M. Lφbel, P. M. Petersen, P. M. Johansen. Single-mode operation of a laser-diode array with frequency-selective phase-conjugate feedback [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(11):825~827
- D. Gay, N. McCarthy. Improvement of the pulse and spectrum characteristics of a mode-locked argon laser with a phase-conjugating external cavity [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **137**:83~88
- D. Gay, N. McCarthy. Effects of phase-conjugate feedback on the modal content and noise characteristics of a cw argon ion laser; experimental results [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **193**:197~205
- W. B. Whitten, J. M. Ramsey. Self-scanning of a dye laser due to feedback from a BaTiO<sub>3</sub> phase-conjugate reflector [J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(2):44~46
- S. Hatano, T. Omatsu, A. Hasegawa *et al.*. Suppression of self-frequency-scanning and brightness improvement of a broad-stripe laser diode using phase conjugate feedback [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(Part 1, 6A):3522~3525
- A. Brignon, S. Senac, J.-L. Ayrat *et al.*. Rhodium-doped barium titanate phase-conjugate mirror for an all-solid-state, high-repetition-rate, diode-pumped Nd:YAG master-oscillator power amplifier laser [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(18):3990~3995
- R. Ryf, G. Montemezzani, P. Günter. Long dark decay in highly sensitive Ce doped photorefractive KNbO<sub>3</sub> crystals [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2001, **3**(1):16~19
- G. D. Bacher, M. P. Chiao, G. J. Dunning *et al.*. Ultralong dark decay measurements in BaTiO<sub>3</sub>[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(1):18~20
- C. Yang, Y. Zhu, M. Hui *et al.*. High efficiency self-pumped phase conjugation at 633 nm in cerium-doped barium titanate crystals [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **109**:318~323
- Y. W. Lian, S. X. Dou, H. Gao *et al.*. Mechanism transformation with wavelength of self-pumped phase conjugation in BaTiO<sub>3</sub>:Ce [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(9):610~612
- W. Koehner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002  
W. 克希耐尔 著, 孙 文, 江泽文, 程 祥 译. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002
- D. M. Kane, A. P. Willis. External-cavity diode lasers with different devices and collimating optics [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(21):4316~4325