量子光学学报 21(2)：171-176，2015
Journal of Quantum Optics

·特约稿·

文章编号：1007-6654(2015)02-0171-06

操控非线性损耗实现稳定的高功率单频激光及可调谐激光的输出

卢华东，　彭堃墀†

（山西大学光电研究所，量子光学与光量子器件国家重点实验室，山西 太原 030006）

摘要：通过操控线性和非线性损耗，使激光器满足单频运转的物理条件，获得了稳定高功率单频激光输出。利用非线性损耗取代了现有的标准具锁定技术，实现无调制锁定的宽带连续可调谐激光输出。

关键词：非线性损耗；　高功率；　单频；　可调谐

中图分类号：TN248.1；O431　　文献标识码：A　　DOI：10.3788/ASQO20152102.0171

0　引言

半导体泵浦的全固态连续单频激光器，因其具有强度噪声低、相干性好、光束质量高等优点而被广泛应用于相干通讯、激光雷达、引力波探测、冷原子物理、超精细光谱、非经典光场产生等领域。目前，中小功率的全固态连续单频激光器的研究相对成熟。通过采用扭转模谐振腔[1]、短谐振腔[2]、环形谐振腔[3]以及在谐振腔内插入标准具[4]或双折射滤波片[5]等方法即可使激光器单频运转。随着近几年量子信息，量子网络以及冷原子物理的发展，人们对激光器提出了更高的要求。例如，连续变量多组分纠缠态的产生[6]以及引力波的探测[7]等需要单频激光器不仅具有很好的光束质量，而且具有较高的输出功率和较低的强度噪声。在冷原子物理[8]的研究中，为了使激光器的输出频率与相应原子或离子的能级跃迁线相对应，单频激光器必须具有一定的频率连续可调谐能力。因此，提高激光器的输出功率，实现激光器频率的连续调谐以及降低激光器的强度噪声就成了发展现有单频激光器的主要研究内容之一。而在谐振腔中引入非线性损耗不仅能使激光器单频稳定地运转，而且能实现激光器的频率连续调谐以及部分降低激光器的强度噪声。本文结合本课题组的工作，对非线性损耗在高功率及可调谐单频激光器中的作用进行了简要介绍。

1　操控非线性损耗获得稳定单频激光输出

要想提高单频激光器的输出功率，首先要提高泵浦源的泵浦功率。然而，激光器的输出功率并不是简单地随着泵浦功率的增加而增大。由于激光晶体、倍频晶体等热效应的存在，以及不同纵模之间存在的增益竞争，高功率激光器的运转特性相对复杂。在高泵浦功率下，激光晶体的热效应导致的热透镜焦距随着泵浦功率的变化而变化，而激光谐振腔的工作状态则随着热透镜

收稿日期：2014-12-16；修回日期：2014-12-18

基金项目：国家自然科学基金(61405107；61227015；61227902)；山西省自然科学基金(2014021011－3)；山西省高校科技开发项目(2013104)；山西大学科研启动项目

作者简介：卢华东(1981－)，男，山西平定人，副教授，主要从事全固态高功率及可调谐激光器器件方面的研究。

†通信作者：彭堃墀，E-mail：kcpeng@sxu.edu.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

焦距的变化而变化。因此，人们更多关注激光晶体的热效应对激光器输出光束质量等的影响，并采用许多方法如优化泵浦光的模式尺寸[9]、采用复合[10]和低掺杂浓度的激光晶体[11]、双端泵浦[12]以及直接泵浦[13]等技术来减少激光晶体热效应对激光器的影响，相对较少关注激光器在高输出功率时纵模的稳定性问题。激光器在较高的泵浦功率下，由于泵浦速率的提高，在主模振荡的同时，次模也很容易起振，进而使激光器处于多纵模运转状态。虽然我们通过在谐振腔内插入选模元件可以迫使激光器单纵模运转，但由于插入元件的损耗较大，激光器的输出功率会降低。而且由于选模元件的存在，激光器很容易发生跳模现象。激光器的多模和跳模现象直接影响了激光器在实际使用中的效果。而在谐振腔内插入非线性晶体[14]，利用非线性晶体的二次谐波产生(SHG)过程可有效地抑制多模和跳模现象。这是因为在非线性晶体的作用下，振荡模的非线性损耗比非振荡模的非线性损耗要小很多。假如有两个模 λ_i，λ_j 起振，强度分别为 $I(\lambda_i)$和$I(\lambda_j)$。每个模由于倍频和和频而经受的非线性损耗可以表示为：$\mathrm{loss}(\lambda_i)=k\,I(\lambda_i)+2k\,I(\lambda_j)$和 $\mathrm{loss}(\lambda_j)=k\,I(\lambda_j)+2k\,I(\lambda_i)$，$k$ 为常数。当只有 λ_i 起振，即$I(\lambda_i)\gg I(\lambda_j)$，有：$2\,\mathrm{loss}(\lambda_i)=\mathrm{loss}(\lambda_j)$。也就是说，主振荡模所经受的非线性损耗是非振荡模的一半。由于二者的差距，使得主振荡模很容易起振，而非振荡模可以被有效地抑制。要想获得稳定运转的单纵模激光器，振荡模和非振荡模的净增益应该满足下面的关系[15]：

$$\frac{G_i}{2g_0(\lambda_i,1)}=\frac{1}{1+\dfrac{2S(\lambda_i)}{S_0(\lambda_i,1)}}-\alpha(\lambda_i)-2\varepsilon(\lambda_i,\lambda_j,\gamma)\frac{S(\lambda_i)}{S_0(\lambda_i,1)}=0 \tag{1a}$$

$$\frac{G_j}{2g_0(\lambda_j,1)}=\frac{1}{1+\dfrac{2S(\lambda_i)}{S_0(\lambda_i,1)}}-\alpha(\lambda_j)-4\varepsilon(\lambda_i,\lambda_j,\gamma)\frac{S(\lambda_i)}{S_0(\lambda_i,1)}<0 \tag{1b}$$

其中，$\Delta\lambda_g$ 为增益带宽；$\gamma=\Delta\lambda_{NL}/\Delta\lambda_g$；$\Delta\lambda_{NL}$ 为非线性光谱接受带宽；$G_{i,j}$为净增益；g_0 为小信号增益因子；l 为增益晶体的长度；$\alpha=(L+T)/(2g_0l)$；L 为激光器的腔内损耗；T 为输出耦合镜的透射率；$\varepsilon=(KS_0)/(4g_0l)$；$K$ 为非线性转化因子；S_0 为饱和功率；S 为基频光功率。

根据公式(1a)和(1b)，我们得到了激光器工作在单纵模(SLM)及多纵模(MLM)运转区间的临界条件，并表示为[16]：

$$\frac{1}{2}-2\mathrm{sinc}^2\left(\frac{1.39}{2\gamma}\right)<\frac{\alpha_0}{\sqrt{(\alpha_0-\varepsilon_0)^2+4\varepsilon_0}-(\alpha_0+\varepsilon_0)} \tag{2}$$

根据公式(2)，我们可以得到激光器的工作区间，如图 1 所示。曲线以上的区域表示激光器能稳定地单纵模运转，而曲线以下表示激光器工作在多纵模区间。从图中可以清楚地看到，当 γ 一定时，激光器的运转状态完全取决于归一化的线性损耗 α_0 和归一化的非线性转化 ε_0。

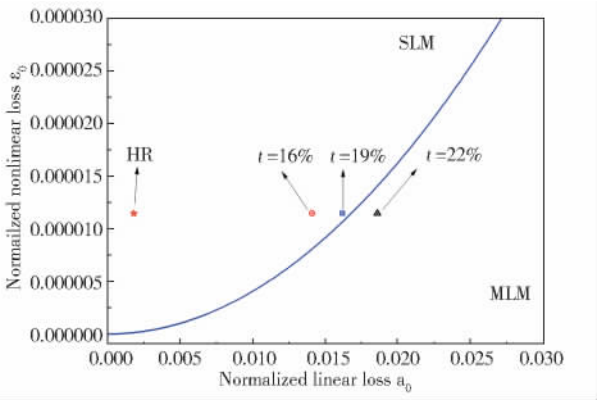


Fig. 1 Criterion condition of single-longitudinal-mode operation for the laser

图 1 激光器单纵模运转的临界条件

在此基础上，我们设计了如图 2 所示的高功率单频 1 064 nm 激光器。为了获得稳定运转的单频 1 064 nm 激光器，我们将一块 LBO 晶体插入谐振腔内。非线性损耗则是由插入谐振腔的倍频晶体 LBO 引入的，LBO 晶体尺寸为 $3\times3\times18\ \mathrm{mm}^3$，采用 I 类温度匹配，被放置在工作温度

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

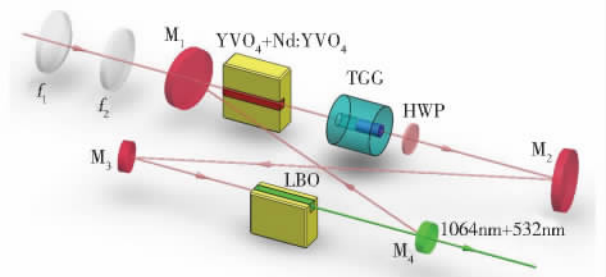


Fig. 2　Schematic of the single-frequency 1 064 nm laser

图 2　单频 1 064 nm 激光器腔型结构示意图

为 422 K，控制精度为 0.1 K 的自制控温炉中。当非线性晶体没有插入谐振腔时，通过扫描共焦 F－P 干涉仪，我们可以看到激光器同时有三个纵模起振，如图 3(a)所示。而当 LBO 插入谐振腔内并工作在最佳相位匹配温度后，输出耦合镜的透射率分别为 HR，16%、19%时，激光器都可以稳定地以单纵模方式运转，如图 3(b)所示。而当输出耦合镜的透射率为 22%时，激光器则不能以稳定的单纵模方式运转。将激光器的相关参数代入公式(2)中，可以很清楚地从图 1(实验点)中看到，当透射率低于 19%，激光器均运转在单纵模区域。而当输出耦合镜的透射率高于 19%后，激光器就工作在单纵模区域以外。最后，当输出耦合镜的透射率为 19%时，我们获得了输出功率为 33.7 W 的连续单频 1 064 nm 激光器，同时有 1.13 W 的连续单频 532 nm 激光输出。总的光光转化效率高达 46.5%。

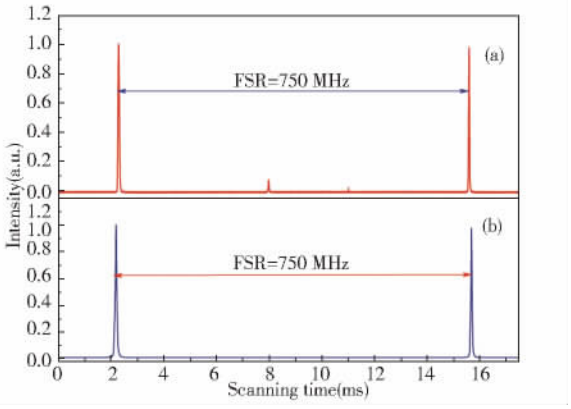


Fig. 3　Longitudinal-mode structure of the 1 064 nm laser (a) without LBO crystal; (b) with LBO crystal

图 3　1 064 nm 激光器的纵模结构

(a)没有 LBO 晶体；(b)有 LBO 晶体

2　操控非线性损耗实现单频可调谐激光输出

可调谐激光器在高分辨率激光光谱学、激光雷达、量子光学以及冷原子物理等领域有着重要的应用。而全固态连续单频可调谐钛宝石激光器的输出光谱覆盖了 700－1 000 nm 的红光和近红外波段[17]，是迄今为止调谐范围最宽，质量优良的固体激光器。作为原子冷却与原子俘获的优质光源，连续单频可调谐钛宝石激光器在冷原子物理以及量子光学的研究中发挥着重要作用。其中，795 nm 激光波段对应于铷原子跃迁 D_1 线，可以用来俘获铷原子并将之冷却[18]；同时，795 nm 激光还可以作为多色多组分纠缠态的泵浦源[19]，获得的纠缠态光场的波段分别对应于铷原子的吸收线和光纤通信的低衰减、低色散窗口，可用于量子保密通信的研究。尤其是在原子物理中的应用，为了和原子跃迁线很好地对应，钛宝石激光器要具备一定范围的频率连续调谐能力。到目前为止，市面上已经有几种钛宝石激光器供科研工作者选择。最具代表性的是美国相干公司推出的 MBR 系列钛宝石激光器[20]和光谱物理公司生产的 Matisse 系列钛宝石激光器[21]。其次，俄罗斯 Tekhoscan[22]以及英国的 M^2 公司[23]也可提供钛宝石激光器。这些激光器尽管在腔型设计上不尽相同，但它们有一个共同的特点，就是为了实现激光器的频率连续调谐，必须将谐振腔内标准具的透射峰锁定在激光器的输出频率上，当激光器的频率实现调谐时，标准具的透射峰始终与激光器的工作频率相对应而不发生跳模现象。因此激光器的稳定性直接决定于锁定环路的控制能力，而且由于锁定环路的存在，不仅增加了激光器的设计和使用难度，还增加了激光器的成本。此外，标准具的锁定通常是调制锁定，调制信号的存在提高了钛宝石激光器低频段的强度噪声，限制了钛宝石激光器在量子光学和冷原子物理中的应用。

而在谐振腔内插入非线性晶体，利用非线性晶体实现基频光的二次谐波产生，从而使基频光主振荡模所经受的非线性损耗是非振荡模的一半，进而有效抑制基频光中非振荡模的起振，这个结论适用于非线性晶体有效光谱接受带宽内的所

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

有模。因此，当激光器进行频率调谐时，只要振荡模的增益一直大于非振荡模，振荡模就一直处于起振状态。直到主振荡模的增益等于非线性转化时，主振荡模的净增益不再具有竞争性，而使得激光器发生跳模现象。

在非线性晶体存在的单频激光器中，激光器最大的频率连续调谐范围可以表示为[24]：

$$\Delta\nu_{\max}=\frac{\Delta\nu_{eff}}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon+L}} \tag{3}$$

其中，$\Delta\nu_{eff}$ 为有效的增益带宽，ε 为非线性转化率，L 为线性损耗，包括激光器的腔内损耗和输出耦合镜透射率。而激光器的有效增益带宽 $\Delta\nu_{eff}$ 又可表示为：

$$\frac{1}{\Delta\nu_{eff}}=\frac{1}{\Delta\nu_L}+\frac{f^2}{FSR^2(\varepsilon+L)} \tag{4}$$

其中，$\Delta\nu_L$ 为增益介质的增益带宽，FSR 和 f 为腔内线性选模元件的自由光谱区和精细度。

从公式(3)和(4)中可以看出，当激光器的有效增益带宽、线性损耗以及非线性损耗确定以后，激光器的最大频率连续调谐范围可以确定。在谐振腔内插入非线性晶体实现激光器的频率连续可调谐的方法，不需要对谐振腔内的标准具进行锁定，实现了无调制锁定的频率连续可调谐激光器。

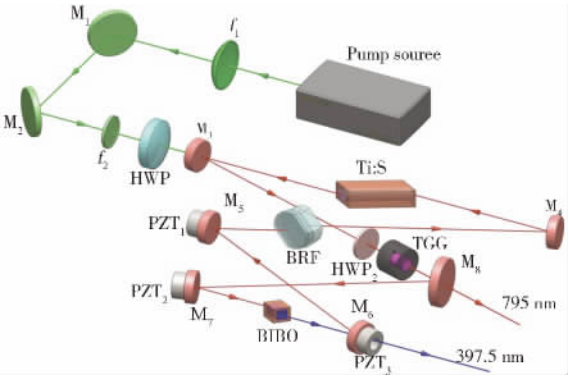


Fig. 4 Schematic of the single-frequency and frequency-tuning Ti:sapphire laser

图 4 单频可调谐钛宝石激光器腔型结构示意图

根据以上分析，我们设计了如图 4 所示的连续可调谐钛宝石激光器[25]。泵浦源采用我们自行研制的全固态连续单频绿光激光器[26]。激光谐振腔采用像散补偿[27]的六镜环形谐振腔，谐振腔内包含两个腰斑，增益介质钛宝石晶体置于其中一个腰斑处。然后在谐振腔内插入粗调谐元件双折射滤波片(BRF)，细调谐元件标准具(Etalon)以及由外加磁场的 TGG 晶体和石英晶片组成的光学单向器等，通过对谐振腔内的元件以及输出耦合镜的透射率进行优化，使钛宝石激光器的转化效率最高。激光器谐振腔的腔内损耗可以通过更换输出耦合镜的透射率进行测量[28]，也可以通过测量激光器的弛豫振荡频率和输出功率进行确定[29]。最后，将非线性晶体插入谐振腔内，激光器可以很好地以单纵模方式运转，在泵浦功率为 11.27 W 时，激光器的最大输出功率为 1.27 W。通过扫描腔镜上压电陶瓷的电压，实现了激光器的频率连续调谐，最大连续调谐范围达 48 GHz，如图 5 所示。

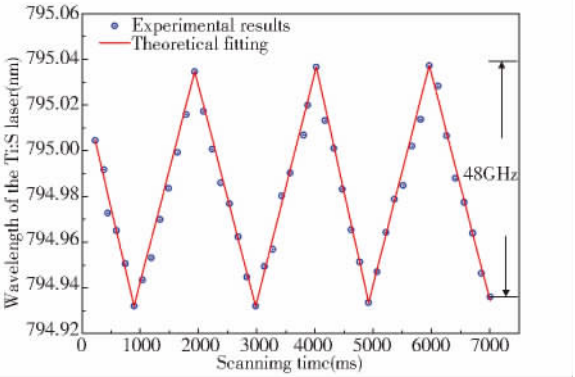


Fig. 5 Curve of the continuous frequency-tuning

图 5 频率连续调谐曲线

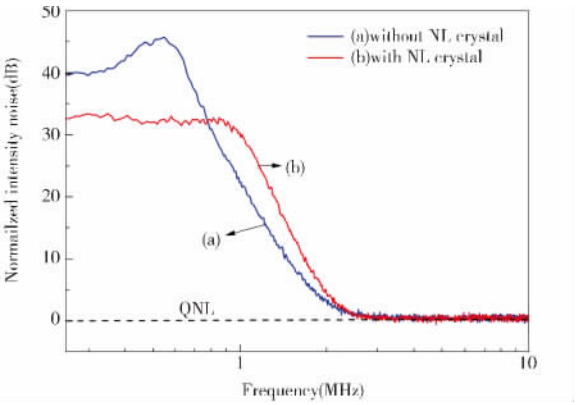


Fig. 6 Intensity noise of the Ti:sapphire laser without (a) and with (b) NL crystal

图 6 强度噪声谱. (a) 没有非线性晶体；(b)有非线性晶体

我们进一步研究了非线性损耗对激光器强度噪声的影响，如图 6 所示。在非线性晶体插入

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

谐振腔之前，激光器的输出强度噪声具有明显的弛豫振荡。而在非线性晶体插入激光器谐振腔后，非线性损耗的引入将会抑制激光器的弛豫振荡。从图 6 中可以看出，弛豫振荡频率处和低于弛豫振荡频率处的强度噪声被分别抑制了 13 dB 和 8 dB。

3　结论

全固态连续单频激光器长期以来一直是一个较为重要的研究领域。随着科学技术的发展，激光器的指标和性能不断提高和改善。在引力波的测量过程中，为了提高测量的信噪比，不仅需要降低激光器的强度噪声，而且需要提高激光器的输出功率。因此，获得低噪声的高功率连续单频激光器成为目前及将来一段时间大家较为关注的问题。而在冷原子物理以及量子光学等领域，为了实现激光器与原子的吸收跃迁线相匹配，激光器必须具有频率连续可调谐能力。因此，低强度噪声，高输出功率以及频率连续调谐是目前连续单频激光器主要的发展方向。而通过在谐振腔内插入非线性晶体进而引入非线性损耗一方面使激光器在高输出功率的同时能实现稳定地单纵模运转，另一方面可以使激光器实现频率连续可调谐而且还能降低激光器在弛豫振荡频率处以及低于弛豫振荡频率处的强度噪声。本文主要结合我们研究组的工作简要介绍了非线性损耗的引入对全固态连续单频激光器在提高功率输出，实现频率连续调谐，降低强度噪声等性能方面的改善的研究进展。

参考文献：

[1] Wallmeroth K, Peuser P. High Power, cw Single-frequency TEM_{00}, Diode-laser-pumped Nd: Yag Laser[J]. *Electron Lett*, 1988, **24**(17): 1086-1088.

[2] Zayhowski J J, Mooradian A. Frequency-modulated Nd: YAG Microchip Lasers[J]. *Opt Lett*, 1989, **14**(12): 618-620.

[3] Peng K C, Wu L A, Kimble H J. Frequency-stabilized Nd: YAG Laser with High Output Power[J]. *Appl Opt*, 1985, **24**(7): 938-940.

[4] Nachman P, Munch J, Yee R. Diode-pumped Frequency-stable, Tunable, Continuous-wave Nd: Glass Laser[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1990, **26**(2): 317-322.

[5] Hideo Nagai, Masahiro Kume, Lssey Ohta, *et al*. Low-noise Operation of a Ddiode-pumped Intracavity-doubled Nd: YAG Laser Using a Brewster Plate[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1992, **28**(4): 1164-1167.

[6] Wu L A, Xiao M, Kimble H J. Squeezed States of Light from an Optical Parametric Oscillator[J]. *J Opt Soc Am B*, 1987, **4**(10): 1465-1475.

[7] Willke B. GEO600: Status and Plans[J]. *Classical Quantum Gravity*, 2007, **24**, S389.

[8] 张靖，陶桦，卫栋等. Rb 原子饱和吸收稳频半导体激光器系统[J]. 光学学报，2003，**23**(2)：197-201.

[9] Fan T Y, Byer R L. Diode Laser-pumped Solid-state Lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1988, **24**(6): 895-912.

[10] Chen D Y, Li X D, Zhang Y, *et al*. Research on Diffusion-bonding Composite YVO_4/Nd: $GdVO_4$ Crystal[J]. *Laser Phys Lett*, 2011, **8**(1): 46-49.

[11] Cheng E, Dudley D R, Nighan W L, *et al*. Lasers with Low Doped Gain Mediun[P]. *US Patent Patent No*. US6185235. 2001.

[12] Liu J, Wang Z, Li H, *et al*. Stable, 12 W, Continuous-wave Single-frequency Nd: YVO_4 Green Laser Polarized and Dual-end Pumped at 880 nm[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(7): 6777-6782.

[13] Liu Qin, Liu Jianli, Jiao Yuechun, *et al*. A Stable 22-W Low-Noise ContInuous-wave Single-frequency Nd: YVO_4 Laser at 1. 06 μm Directly Pumped by a Laser Diode[J]. *Chin Phys Lett*, 2012, **29**(5): 054205.

[14] Murdoch K M, Clubley D A, Snadden M J. A Mode-hop-free Tunable Single-longitudinal-mode Nd: YVO_4 Laser with 25 W of Power at 1064 nm[C]. *Proc SPIE*, 2009, **7193**: 71930P.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[15] Greenstein S, Rosenbluh M. The Influence of Nonlinear Spectral Bandwidth on Single Longitudinal Mode Intra-cavity Second Harmonic Generation[J]. *Opt Commun*, 2005, **248**(1-3): 241-248.

[16] Lu Huadong, Su Jing, Zheng Yaohui, *et al*. Physical Conditions of Single-longitudinal-mode Operation for High-power all-solid-state Lasers[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(5): 1117-1120.

[17] Moulton P F. Spectroscopic and Laser Characteristics of Ti: Al_2O_3[J]. *J Opt Soc Am B*, 1986, **3**(1): 125-133.

[18] Xu Z X, Wu Y L, Tian L, *et al*. Long Lifetime and High-fidelity Quantum Memory of Photonics Polarization Qubit by Lifting Zeeman Degeneracy[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, **111**(5): 240-503.

[19] Jia X J, Yan Z H, Duan Z Y, *et al*. Experimental Realization of Three-color Entanglement at Optical Fiber Communication and Atomic Storage Wavelength[J]. *Phys Rev Lett*, 2012, **109**: 253604.

[20] http: // www. coherent. com/Products/index. cfm ? 846/MBR-Ring-Series.

[21] http: // www. spectra-physics. com/Products/tunable-lasers/matisse/

[22] http: //www. tekhnoscan. com/english/TIS-SF-777. htm.

[23] http: //www. m2lasers. com/products-services/laser-systems/solstis. aspx.

[24] Martin K I, Clarkson W A, Hanna D C. Self-suppression of Axial Mode Hopping by Intracavity Second-harmonic Generation[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(6): 375-377.

[25] Huadong Lu, Xuejun Sun, Meihong Wang, *et al*. Single Frequency Ti: Sapphire Laser with Continuous Frequency-tuning and Low Intensity Noise by Means of the Additional Intracavity Nonlinear Loss[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(20): 24551-24558.

[26] **王雅君, 杨文海, 郑耀辉, 等. 抽运波长及 Nd^{3+} 掺杂浓度对内腔倍频单频激光器性能的影响**[J]. **中国激光**, 2013, **40**(16): 0602005.

[27] **孙燕, 卢华东, 苏静. 全固态单频钛宝石激光器**[J]. **量子光学学报**, 2008, **14**(3): 344-347.

[28] **卢华东, 苏静, 彭堃墀. 全固态连续单频可调谐钛宝石激光器腔内损耗及最佳透射率的研究**[J]. **中国激光**, 2010, **37**(9): 2328-2333.

[29] **卢华东. 利用弛豫振荡频率和输出功率测量单频钛宝石激光器的腔内损耗**[J]. **中国激光**, 2013, **40**(4): 0402002.

Realization of the Single-Frequency and High Power as well as Frequency-Tuning of the Laser by Manipulating the Nonlinear Loss

LU Hua-dong, PENG Kun-chi

(*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*)

Abstract: There was an optimal physical condition for a single frequency laser with high stability and output power. By modulating the linear and nonlinear losses, we found the laser could stably oscillate with single frequency operation. Nonlinear loss could also replace the intracavity etalon-locking, and a continuously tunable laser was obtained by introducing the nonlinear loss.

Key words: Nonlinear loss; high power; single frequency; tunable

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net