

文章编号 : 0253-2239( 2001 )07-0804-04

# 变反射率镜非稳腔可调谐 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器\*

裴 博\*\*1)2) 周寿桓<sup>2)</sup> 沈 柯<sup>1)</sup>

( 1 ), 长春光学精密机械学院理学院, 长春 130022)  
( 2 ), 华北光电技术研究所, 北京 100015

摘要: 将变反射率镜(VRM)非稳腔成功地应用于可调谐 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器,有效地提高了 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光的光束质量,并利用 LBO 晶体作为倍频器获得了 396 nm~440 nm 的蓝色可调谐激光输出,最大输出能量为 26 mJ,最高倍频效率为 27.2%。

关键词: 变反射率镜非稳腔;可调谐 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器;倍频

中图分类号: TN242 文献标识码: A

## 1 引 言

激光模式、线宽和发散角等光束质量参数直接影响着非线性频率变换的效率。非线性频率变换技术一般都要求基频光或抽运光有较高的光束质量,这对于象以 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为增益介质的宽带可调谐激光器而言则意味着要解决更多的问题。

在激光抽运的增益开关型 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器中,以前我们都采用稳定腔<sup>[1,2]</sup>,但是稳定腔只能提供最多几十毫焦耳的 TEM<sub>00</sub> 模激光输出,此外,稳定腔还容易在腔内造成激光热点,导致腔内光学元件的损伤。因此,若对稳定腔输出的可调谐 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光实施非线性频率变换,将很难在大能量情况下获得高的转换效率。以变反射率镜(VRM)为输出镜的卡塞格林型非稳腔是近十几年来用于获得大能量近衍射极限的高光束质量激光输出的有效手段,这已在其他种类的激光增益介质上获得了极佳的结果<sup>[3,4]</sup>,同时也推动了非线性频率变换技术的进步。将非稳腔技术应用于增益开关型 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器将是提高 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光光束质量的有效手段,但是由于 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体的某些特性,必须着重解决以下两个问题:1)输出光束稳定性问题。因为 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体是单轴晶体,其吸收截面和辐射截面在  $\pi$  偏振方向均大于  $\sigma$  偏振方向,因此激光抽运的 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体多采用沿  $c$  轴的布儒斯特角切割。这样,由于

色散的原因,在调谐过程中激光束的方向就会改变,这是不利于非稳腔激光器的准直和调谐工作的。2)激光线宽问题。由于 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体的宽带增益特性,若不采用其他色散手段而只靠 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体本身的布儒斯特角的色散能力,则这种激光抽运的非稳腔 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器的线宽约为 20 nm~30 nm (FWHM)。这是完全不能满足绝大多数非线性晶体的谱线适配宽度的。目前,压窄可调谐激光线宽的手段有很多种,例如利用外注入或自注入种子的方法<sup>[5]</sup>,利用光栅或棱镜增加谐振腔色散能力的方法,亦有将多种方法联合使用的成功例子<sup>[6]</sup>,其中采用色散棱镜是一种较简单的手段,本实验即是采用两个棱镜组成的棱镜组作为色散元件。

## 2 变反射率镜非稳腔设计

本谐振腔输出镜采用的是高斯型变反射率镜,其反射率的数学表达式是:

$$R_r = R_0 \exp[-\alpha (r/\omega_m)^n], \quad (1)$$

式中  $R_r$  为距镜中心点  $r$  处的反射率,  $R_0$  为中心最大反射率,  $r$  为径向距离,  $\omega_m$  为反射率降为最大反射率的  $1/e^2$  时的半径,  $n$  为高斯函数的阶数。

变反射率镜非稳腔除了普通非稳腔的几何偏折损耗和衍射损耗外,还有输出镜不完全反射的输出损耗,其往返损耗率为:

$$\zeta = 1 - \bar{R}/M^2, \quad (2)$$

$$\bar{R} = \left( \int_0^a R_r dr \right) / a, \quad (3)$$

其中  $\bar{R}$  为变反射率镜平均反射率,  $a$  为变反射率镜

\* 原电子工业部电科院基金项目。

\*\* 通讯地址:北京 8511 信箱 36 分箱,北京 100015。

收稿日期:2000-03-20;收到修改稿日期:2000-05-17

的底半径,  $M$  为变反射率镜非稳腔的横向放大率, 在同等条件下,  $M$  与硬边输出镜非稳腔最佳放大率  $M'$  的关系为  $M^2 = M'^2 R^{[4]}$ , 而  $M'$  可根据 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体在不同波长处的增益和损耗以及非稳腔等效菲涅耳数与衍射损耗的关系确定<sup>[7]</sup>。

腔内光腰半径为<sup>[3,4]</sup>:

$$w_b = (M^n - 1)^{1/n} w_m, \quad (4)$$

光强近场分布为:

$$I(r) = I(0) \exp(-r^2/w_b) (1 - R_r). \quad (5)$$

对(5)式求导可得近场光强平顶分布条件为  $R_0 = 1/M^n$ , 再结合(2)式和(4)式可得变反射率镜参数和谐振腔参数, 使激光输出具有最大的 TEM<sub>00</sub> 模体积、较高的光束质量和激光效率。

### 3 倍频器设计

选用 LBO 晶体为倍频器。LBO 是单色透明的双光轴晶体, 空间点群为 mm2, 属斜方晶系, 透光范围为 0.16 μm ~ 2.6 μm, 光损伤阈值为 18.9 GW/cm<sup>2</sup>, 在迄今被应用的非线性光学材料中是最高的光损伤阈值。它的群速度色散特性也是最小的, 可以有很大的非线性光学效应作用距离。它还具有非常大的适配角度(10 mrad·cm ~ 60 mrad·cm), 比在紫外光-蓝光范围内同样具有很好透过率的 BBO (0.6 mrad·cm ~ 2 mrad·cm) 大很多, 用它作为发散角较难控制的可调谐 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器的倍频晶体是具有一定优势的<sup>[8]</sup>。

常温下, LBO 晶体在  $xz$  平面内没有倍频 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光(650 nm ~ 1050 nm)的有效匹配角。在  $xy$  平面内的 II 类相位匹配的有效非线性系数为 0, 在  $yz$  平面内的 I 类相位匹配的有效非线性系数亦为 0。  $xy$  平面内二次谐波 I 类匹配的有效非线性系数为<sup>[8]</sup>:

$$d_{\text{eff}(I)} = d_{32} \cos \varphi, \quad d_{32} = 5.0 \text{ pmV}^{-1}. \quad (6)$$

其中  $\varphi$  为波矢在  $xy$  平面的投影与  $x$  轴的夹角,  $d_{ij}$  为第  $i$  行第  $j$  列的非线性系数张量。在  $yz$  平面内二次

谐波 II 类匹配的有效非线性系数为<sup>[8]</sup>:

$$d_{\text{eff}(II)} = d_{15} \cos \theta, \quad d_{15} = 6.1 \text{ pmV}^{-1}. \quad (7)$$

其中  $\theta$  为波矢和  $z$  轴的夹角。比较(6)式和(7)式可确定倍频 800 nm ~ 900 nm 的 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可调谐激光(项目要求获得蓝色激光输出)采用  $xy$  平面内的 I 类相位匹配的有效非线性系数较大。考虑到有效非线性系数在靠近 900 nm 方向较大, 而钛宝石晶体在靠近 800 nm 方向激光增益较大<sup>[9]</sup>, 综合两方面因素, 为了获得较平稳的倍频 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光调谐曲线, 确定 LBO 晶体倍频器的切角为  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 26^\circ$ , 匹配波长为 860 nm。

### 4 实验装置

图 1 为实验装置光路图。C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 为两块对称放置的布儒斯特角切割的 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体; M<sub>1</sub> 为 860 nm 变反射率镜凹凸球面膜片, 两面的曲率半径均为 1.5 m, 凸面朝向谐振腔内, 中心反射率为 50%,  $2w_m = 5.5 \text{ mm}$ ,  $n = 2$ , 凹面朝向腔外, 镀以 860 nm 为中心的宽带减反膜; M<sub>2</sub> 为 800 nm ~ 900 nm 凹面宽带全反射膜片, 曲率半径为 3 m; P 为两块 ZF<sub>6</sub> 棱镜组成的棱镜组; F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub> 为压束望远镜, 其中 F<sub>3</sub> 的压缩倍率为 2; M<sub>3</sub> ~ M<sub>7</sub> 为双色介质膜片, 45°入射时, 1.06 μm 波长的透过率约为 90%, 0.532 μm 波长的反射率大于 99.5%; M<sub>8</sub> 为滤光片, 45°入射时, 800 nm ~ 900 nm 范围内为全反射, 430 nm 处透过率约为 85%; SP<sub>1</sub> 为 0.532 μm 波长分光镜, 45°入射时, SP<sub>1</sub> 的透射率和反射率均为 50%; SP<sub>2</sub> 为平板玻璃; LBO 晶体(福建 CASTECH-PHOENIX 公司提供)尺寸为 7 mm × 7 mm × 12 mm, 7 mm × 7 mm 面为通光面; DUMP 为残余光吸收片; WP 为 WDG30 型光栅单色仪; D 为硅 PIN 管; OSA 为 TDS380 型示波器; EM 为 EPM1000 型能量计。Nd:YAG 激光器的工作重复频率为 10 Hz, 0.532 μm 激光单脉冲能量约为 380 mJ, 脉宽为 12 ns。M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 构成

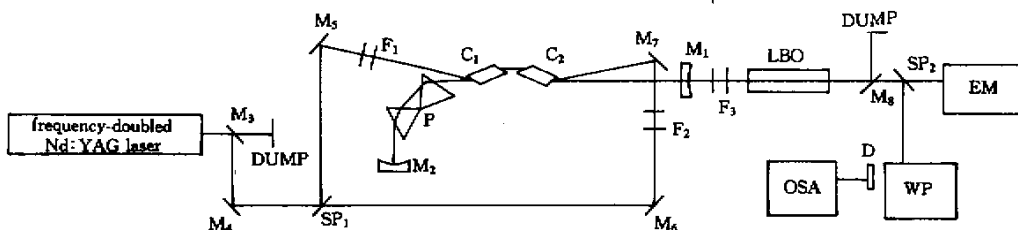


Fig.1 Experimental setup

Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可调谐激光器谐振腔,腔内采用两根布氏角切割的 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体,这样不但减轻了 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体在高功率抽运下的压力,增加了激光增益长度,而且对整个调谐波段的色散问题作了有效的补偿,保证了振荡器在整个调谐范围内激光指向的稳定性,同时也保证了谐振腔在整个调谐范围内都处于较好的光学谐振状态,从而保证激光运转的高效率<sup>[6]</sup>。

### 5 结果与讨论

可调谐 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器输出的基频光光斑直径为 5.5 mm~6 mm,光束发散角约为 1.5 mrad(谐振腔参数未调整到最佳状态),860 nm 附近脉冲宽度(FWHM)为 25 ns。

图 2 为激光器调谐输出曲线。由于谐振腔前镜变反射率镜的平均反射率是按 860 nm 波长的理想值设计的,其值在 860 nm 两端随着波长的减小或增大都逐渐减小;而钛宝石晶体的受激辐射截面在小于 860 nm 的方向迅速增大,直到 790 nm 附近达到最大值,而在大于 860 nm 方向逐渐减小<sup>[9]</sup>,因此,该调谐曲线在小于 860 nm 的方向有上升的趋势,在 810 nm 附近达到最大值,为 118 mJ,但到 800 nm 后迅速下降,其主要原因是谐振腔后镜反射率在小于 800 nm 后迅速减小。调谐曲线在大于 860 nm 时则呈现明显下降趋势,原因有两个,一是谐振腔前镜变反射率镜的平均反射率下降,二是 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体的受激辐射截面下降。

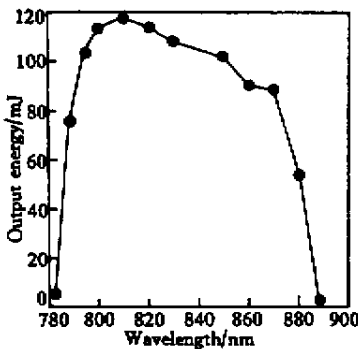


Fig. 2 Energy tuning curve for the Ti:sapphire laser

图3是倍频 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可调谐激光器的调谐曲线。最大输出在 427.2 nm 处,为 26 mJ。在小于 427.2 nm 的方向,尽管基频波功率密度增加,但是由于 LBO 晶体倍频匹配点的有效非线性系数减小和基频波斜入射 LBO 晶体造成较高的反射损耗,导

致倍频效率反而呈下降趋势。图 4 是倍频效率与基频波的关系曲线。倍频效率最高点出现在 860 nm 附近,但随着波长的增加,倍频效率也开始出现明显的下降,这主要是由于基频波功率密度下降和基频波斜入射倍频晶体造成的。结合图 4 和图 2 可见,在基频波光功率密度相同的情况下,在 860 nm 右侧波长的倍频效率高于 860 nm 左侧波长的倍频效率,这主要是因为随着波长的增加 LBO 晶体的有效非线性系数增加的缘故。

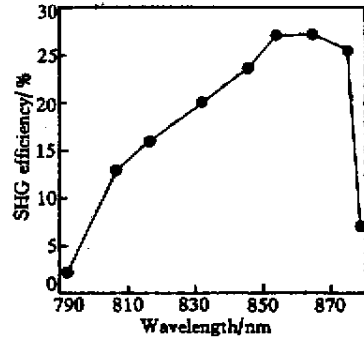


Fig. 3 Energy tuning curve for the frequency-doubled Ti:sapphire laser

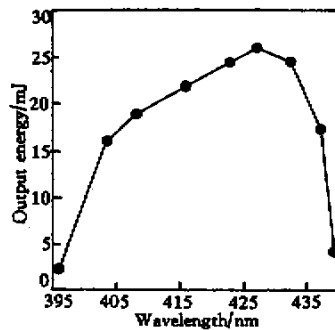


Fig. 4 SHG efficiency vs wavelength

我们也曾用稳定腔输出的 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光做过倍频实验,在抽运功率密度较低时,能获得较好的基频光束质量,但是由于功率密度较低,倍频效率只有 10% 左右,获得的蓝光能量只有约 5 mJ。增加抽运水平,虽然基频激光能量增加,但是倍频后获得的蓝光的能量却没有明显的增加,倍频效率明显下降,这是由于抽运功率密度增加后基波光束质量明显下降所造成的。

### 参 考 文 献

[1] 方香云,周寿桓. Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可调谐激光器模式研究. 中国激光,1995, A2X(2):103~107  
 [2] 裴博,周寿桓,沈柯. 采用新型谐振腔镜的高效可调谐激光器. 光学学报,1999, 19(10):1332~1336  
 [3] Zhang Fang, Zhou Shouhuan. Nd:YAG Q-switched laser

- with VRM resonator. *Proc. SPIE*, 1992, **1979**:269 ~ 271
- [ 4 ] Lavigne P, Parent A. Mode control in unstable cassegranian resonators. *Proc. SPIE*, 1987, **783**:69 ~ 76
- [ 5 ] Raymond T D, Smith A V. Injection-speeded titanium-dropped-sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(1):33 ~ 35
- [ 6 ] Rines G A, Moulton P F. Performance of gain-switched Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> unstable-resonator laser. *Advanced Solid-State Laser OSA*, 1990, **6**:88 ~ 93
- [ 7 ] Herbst R L, Komine H, Pyer R L. A 200 mJ unstable resonator Nd:YAG oscillator. *Opt. Comm.*, 1977, **21**(1):5 ~ 7
- [ 8 ] Chen C, Wu Y *et al.*. New nonlinear optical crystal: LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>. *J. Opt. Soc. Am.*, 1989, **6**(4):616 ~ 621
- [ 9 ] Aggarwal R L, Sanchez A, Stuppi M M *et al.*. Residual infrared absorption in as-grown and annealed crystals of Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(6):1003 ~ 1008

## Tunable VRM Unstable Resonator Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Laser

Pei Bo<sup>1)2)</sup> Zhou Shouhuan<sup>2)</sup> Shen Ke<sup>1)</sup>

(1), Department of Optical Physics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022

(2), North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015

( Received 20 March 2000 ; revised 17 May 2000 )

**Abstract :** The beam quality has been improved efficiently by means of a varied reflectivity mirror (VRM) unstable resonator used in a tunable Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser, and a tunable blue laser from 396 nm ~ 440 nm through second harmonic generation (SHG) by LBO crystal is generated. The highest SHG efficiency of 27.2% and the maximum output energy of 26 mJ have been obtained.

**Key words :** varied reflectivity mirror unstable resonator ; tunable Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser ; second harmonic generation