

# 4.5MW 小型化全固态腔倒空飞秒 掺钛蓝宝石激光器\*

杨 辉<sup>1)</sup> 邱 阳<sup>1)</sup> 腾 浩<sup>1)</sup> 张 军<sup>1)</sup> 苍 宇<sup>1)</sup>  
吕铁铮<sup>1)</sup> 王兆华<sup>1)</sup> 王鸿飞<sup>2)</sup> 魏志义<sup>1)†</sup> 张 杰<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 凝聚态物理研究中心, 北京 100080)

<sup>2)</sup> (中国科学院化学研究所分子反应动力学国家重点实验室, 北京 100080)

(2001 年 4 月 25 日收到)

研制了国内首台腔倒空克尔透镜自锁模掺钛蓝宝石激光器, 该激光采用二极管抽运的全固态连续波 532nm 激光抽运, 在 5.4W 的抽运功率下, 获得了峰值功率大于 4.5MW、脉宽小于 18fs 的稳定锁模脉冲, 其重复频率可低至 20kHz, 所占尺寸约 53.5cm × 20.5cm. 据知, 此结果是迄今重复率最低、结构最紧凑的声光腔倒空飞秒激光器件.

关键词: 掺钛蓝宝石, 腔倒空, 飞秒脉冲, 克尔透镜锁模

PACC: 4260, 4260B, 4260F

## 1 引 言

自从 1990 年在钛宝石晶体中发现自锁模现象以来<sup>[1]</sup>, 以克尔透镜锁模(KLM)技术为基础的飞秒(fs)掺钛蓝宝石激光便成为近十年来进展最为迅速的研究内容之一. 目前通过最新的色散补偿及放大技术<sup>[2-7]</sup>, 人们由振荡器直接产生的脉宽已突破了 5fs<sup>[8]</sup>、放大后脉冲的最高峰值功率超过了 100TW. 然而, 对于物理、生物、化学等领域中的大量超快应用研究而言, 通常振荡器直接输出的脉冲功率太低(小于 1MW), 不足以激发物质中超快过程的产生, 其极高的重复频率(通常 100MHz)引起的信号积累效应还会影响到结果的准确性. 而放大器不仅技术复杂, 成本昂贵, 并且重复频率又过低(通常 10Hz—1kHz), 制约着超快测量中所能得到的精度.

由于大量超快非线性效应的产生仅需要 MW 量级的峰值功率, 因此重复频率在几十 kHz—1MHz 之间可调、峰值功率为多 MW 的小型化飞秒激光器便成了具有广泛应用前景的飞秒激光器件. 自从 1993 年 Ramaswamy 等人首次实现腔倒空飞秒钛宝石激光以来<sup>[1]</sup>, 由于该激光不但具备了振荡器的稳定输出, 可调谐的优点, 并且还可以大大提高单脉冲

的输出能量和改变脉冲的重复频率等特点, 而被广泛应用于物理、化学和生物的超快研究中<sup>[9-11]</sup>. 1994 年, Pshenichnikov 等人进一步从钛宝石激光中产生了脉宽仅 13fs、峰值功率达 5MW 的腔倒空脉冲<sup>[12]</sup>, 1996 年, Slobodchikov 等人又将腔倒空技术应用到掺铈镁橄榄石激光中, 得到了 54fs, 30nJ, 波长为 1260nm 激光脉冲<sup>[13, 14]</sup>. 尽管目前飞秒腔倒空固体激光已开始广泛地应用于超快研究中, 但由于 KLM 维持性的问题, 通常重复频率的调节下限在 200kHz, 限制了单脉冲能量的进一步提高. 本文报道研制的一台全固化结构的腔倒空飞秒掺钛蓝宝石激光器, 通过优化光路结构, 其整体尺寸仅 53.5cm × 20.5cm, 重复频率在 20kHz—2MHz 之间可调. 在 5.4W 的固态 532nm 激光抽运下, 当重复频率为 60kHz, 得到了脉宽为 17.6fs, 单脉冲能量可达 85nJ, 对应峰值功率为 4.5MW 的腔倒空结果.

## 2 实验设计

我们采用的光路结构如图 1 所示. 是由典型的非对称结构的 KLM 钛宝石激光演化而成, 其中短臂放有用于腔倒空的声光布拉格晶体, 长臂放有一对用于色散差补偿的石英棱镜对, 抽运源是二极管激

\* 国家自然科学基金(批准号: 19825110, 69878032)和国家高技术激光核聚变主题资助的课题.

† Email: wzhy@aphy.iphy.ac.cn

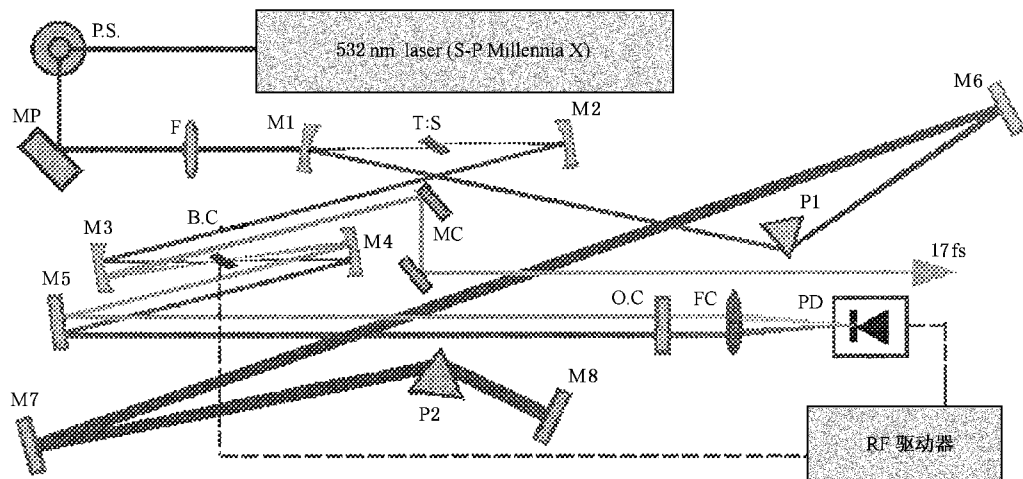


图1 激光器光路示意图

光抽运的全固化倍频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光(美国 S-P 公司 Millennia X),其输出的波长为 532nm 连续激光通过  $f = 10\text{cm}$  的透镜聚焦到掺钛蓝宝石晶体上.晶体的尺寸为  $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 4\text{mm}$ (上海光机所),布鲁斯特角切割.声光元件是 4mm 厚的熔石英材料(美国 CAMAC 公司),M1 到 M4 是曲率为 10cm 的凹面反射镜,其中钛宝石晶体和声光晶体分别置于 M1 和 M2 及 M3 和 M4 的共焦点附近.根据像散补偿的计算要求,各凹面镜均以 15 度折叠角放置.为了合理有效地减小激光所占的空间尺寸,我们分别在短臂及长臂中各引入平面折返镜 M5 和 M7, M8 并使其尽可能小角度放置以避免反射带宽的漂移. M6 是透过率约 4% 的平面输出镜, M9 是平面全反镜,除 M6 外,各镜均镀有 700—900nm 的宽带全反膜,整个腔长约为 180cm.考虑到钛宝石晶体及声光介质共同引起的色散,实验中设置石英棱镜对间的等效距离为 70cm.当启动 KLM 后,从输出镜 O.C 输出的锁模脉冲通过快速光电二极管 PD 后将产生约数百毫伏的快速电信号,用此信号作为声光腔倒空驱动器的时钟脉冲,分频后即可同步触发驱动器以产生 RF 功率并加到声光晶体上,从而实现腔内飞秒激光脉冲的倒空.图 2 为通过示波器观察到的 RF 信号波形,其典型宽度为 9ns.为了得到高的衍射效率及高的倒空脉冲能量,实验中我们进一步采用一放大器(PB1800, Camac 公司)用以放大加到声光晶体上的 RF 信号.在腔倒空的过程中,激光在腔内来回两次经过声光调制器而受到衍射,其总的衍射效率约

为 50% ~ 60%,在第二次衍射后,倒空的激光在垂直平面内沿腔内振荡光平行的方向入射到一对镀银拾取镜 MC 上并被反射出腔外.

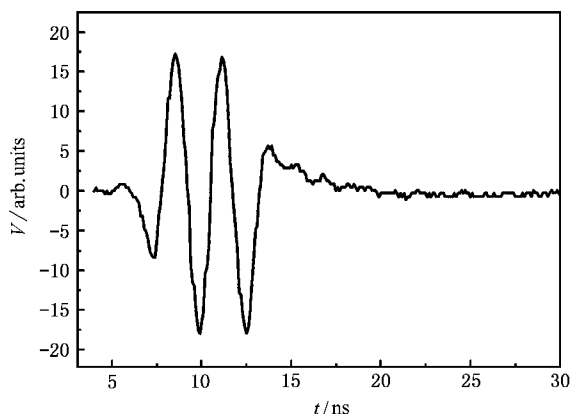


图2 在示波器上观察到的 RF 信号图

### 3 实验结果和讨论

与典型的四镜腔掺钛蓝宝石激光相比,由于本实验方案引入了一对准共焦的凹面反射镜 M3、M4 及平面折返镜 M5—M7,特别是折返镜的使用使激光器的尺寸非常小,其尺寸只有前面文献 8—10 提到的一半大小,因此这些因素相应地增大了腔内的损耗,并导致激光调节、特别是锁模调节难度的增加.另外我们改变了传统的输出耦合镜放在色散端的方法,而改为在非色散段(短臂端),这样可以获得

更稳定的输出.已有的腔型分析计算表明(具体可参见文献 [10,11])在 KLM 结构的激光腔中存在着两个稳定区域.稳定的锁模仅出现在第二稳定区中靠第一稳定区一端的内侧边沿附近,当引入第二对共焦凹面反射镜后,两稳定区则随该对凹面镜的距离而向内弯曲.遵循这一原则,通过精心调节凹面反射镜 M2 及 M4 的位置,并轻轻推动石英棱镜,可以得到非常稳定的锁模脉冲系列,其典型的平均功率为 200mW,重复频率为 82MHz,图 3 中的虚线为采用自建的相关仪所测得的强度相关曲线,内插图为其对应的光谱曲线,其半宽为 58nm,假设脉冲的形状为双曲正割函数,经拟合的脉冲宽度为 17.2fs,对应的  $\Delta\nu \cdot \Delta\tau = 0.462$ .由于在测量中通过较长的距离,没有进行额外的补偿,故实际脉冲宽度应该比此

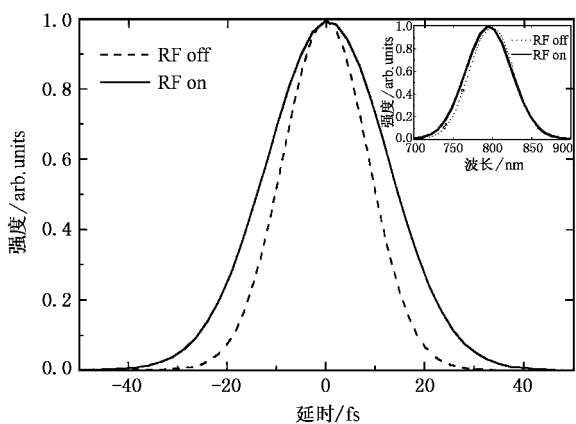


图 3 倒空前(虚线)后(实线)的强度自相关曲线及对应光谱(插图)脉冲宽度分别为 17.2fs 和 17.6fs,光谱宽度分别为 58nm 和 56nm)

更短.另外从图 3 中可以看出,启动腔倒空之前和之后,发现激光的脉冲稍有展宽,但基本不变.实验中一般可以得到脉冲宽度为 17—23fs 左右稳定的倒空输出.图 4 是在不同倒空频率下的脉冲宽度, A B 两条线分别在两次锁模情况下测得的不同频率下的脉冲宽度,它们稍有不同,可能是每次棱镜的插入量不一样引起的,由图中可以看出倒空的激光脉冲的脉宽基本不随倒空频率变化.

当抽运功率为 5.4W 时,通过仔细优化腔结构,测得在倒空频率为 60kHz 时最大的倒空激光脉冲能量为 85nJ,脉冲宽度为 17.6fs,对应的峰值功率 4.5MW.实验中发现,当腔内功率过高时,锁模时很容易形成双脉冲情况.为了避免这种情况,降低抽运功率到 5W.这时一般可以得到 50nJ 左右的稳定倒空激光脉冲输出,如图 5 所示.从图 5 中发现激光在

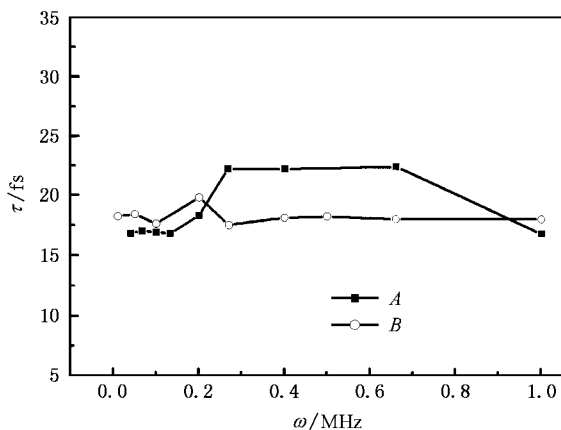


图 4 在不同倒空频率下对应的脉冲宽度

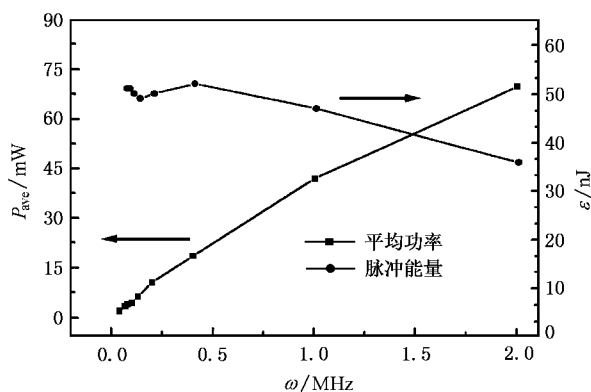


图 5 在抽运功率为 5W 时,腔倒空激光平均功率和脉冲能量与重复率的关系

高重复频率时(大于 400kHz),这时发现还有稳定的锁模倒空,但倒空效率开始降低,单脉冲能量开始减小.主要是因为倒空时,腔内的能量被大量衍射出去,这时粒子数消耗较大,而重新获得原来腔内稳定的粒子数反转需要一段时间延迟,这个时间大约为 3μs,其对应 400kHz 以上.另外,我们可以调节端镜改变激光的输出波长,其范围在 770—840nm 可调,其脉冲宽度基本与波长无关.

### 4 结 论

我们在 KLM 掺钛蓝宝石激光的基础上,通过在短臂引入一对共焦凹面反射镜及石英声光腔倒空器件,长臂引入一对石英棱镜及两个小角度反射的折返镜,实现了稳定的飞秒腔倒空激光运转,其重复频率可调谐范围为 20kHz—2MHz.据我们所知,这不仅国内首次研制的飞秒腔倒空激光器件,而且也是

目前所见报道中结构最紧凑、可调重复率最宽的研究结果.在 5W 的抽运功率下,其输出脉冲宽度均小于 20fs,最高的脉冲能量达 85nJ,峰值功率达 4.5 MW,中心波长可调谐范围为 770—840nm,这种重复频率、具有高峰值功率的飞秒激光器件是超快光谱研究中最理想的光源激光之一.

在本激光器的研究过程中得到了钱列加、朱鹤元教授,许祖彦研究员,张志刚教授的指导和光物理实验室冯宝华、张秀兰、张东香及本组赵理曾等人在实验中提供的配合和帮助.同时上海光机所邓佩珍提供了高质量的掺钛蓝宝石晶体,在此一并表示衷心地谢意.

- 
- [ 1 ] D. E. Spence, J. M. Evans, W. E. Sleat, W. Sibbt, *Opt. Lett.*, **16**( 1991 ), 1762.
- [ 2 ] U. Keller, G. W. Hooft, W. H. Knox, J. E. Cunningham, *Opt. Lett.*, **16**( 1991 ), 1022.
- [ 3 ] P. F. Moulton, *J. Opt. Soc. Am.*, **B3**( 1986 ), 125.
- [ 4 ] B. Lemoff, C. P. J. Barty, *Opt. Lett.*, **17**( 1992 ), 136.
- [ 5 ] A. Stingl, M. Lenzner, C. Spielmann, F. Krausz, R. Szípcos, *Opt. Lett.*, **20**( 1995 ), 602.
- [ 6 ] I. D. Jung, F. X. Kartner, N. Matuschek, D. H. Sutter, F. Morier-Genoud, G. Zhang, U. Keller, V. Scheuer, M. Tilsch, T. Tschudi, *Opt. Lett.*, **22**( 1997 ), 1009.
- [ 7 ] Zhi-gang Zhang, Hong Sun, *Acta Physica Sinica* **50**( 2001 ), 1080 ( in Chinese ] 张志刚、孙虹 物理学报 **50**( 2001 ), 1080 ].
- [ 8 ] A. Baltuska, Z. Wei, M. S. Pshenichnikov, D. Awiersma, R. Szípcos, *Appl. Phys.*, **B65**( 1997 ), 175.
- [ 9 ] Y. H. Liao, A. N. Unterreiner, D. C. Arnett, N. F. Scherer, *Appl. Opt.*, **38**( 1999 ), 7386.
- [ 10 ] M. A. Hom, D. C. Arnett, N. F. Scherte, *SPIE*, **3273**( 1998 ), 276.
- [ 11 ] M. Ramaswamy, M. Ulman, J. Paye, J. G. Fujimoto, *Opt. Lett.*, **18**( 1993 ), 1822.
- [ 12 ] M. S. Pshenichnikov, W. P. de Boeij, A. Wiersma, *Opt. Lett.*, **19**( 1994 ), 572.
- [ 13 ] E. Slobodchikov, J. Ma, V. Kamalov, K. Tominaga, K. Yoshihara, *Opt Lett.*, **21**( 1996 ), 354.
- [ 14 ] Y. Nagasawa, Y. Ando, A. Watanabe, T. Okada, *Appl. Phys.*, **B70**( 2000 ), S33.

# GENERATION OF 4.5MW FEMTOSECOND PULSE WITH A COMPACT ALL SOLID-STATE CAVITY-DUMPED Ti :SAPPHIRE LASER<sup>\*</sup>

YANG HUI<sup>1)</sup> QIU YANG<sup>1)</sup> TENG HAO<sup>1)</sup> ZHANG JUN<sup>1)</sup> CANG YU<sup>1)</sup> LU TIE-ZHENG<sup>1)</sup>

WANG ZHAO-HUA<sup>1)</sup> WANG HONG-FEI<sup>2)</sup> WEI ZHI-YI<sup>2)</sup> ZHANG JIE<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>*( Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing , 100080 ,China )*

<sup>2)</sup>*( State Key Laboratory of Molecular Reaction Kinetics , Institute of Chemistry , Chinese Academy of Sciences , Beijing , 100080 ,China )*

( Received 25 April 2001 )

## ABSTRACT

A cavity-dumped Kerr-lens Mode-Locked ( KLM ) Ti :S laser is demonstrated with an all solid-state continuous - wave 532nm laser as the pump resource. Stable mode-locked laser pulse with a peak power of 4.5MW was obtained under 5.4W pump power. The pulse duration width is shorter than 18fs and the repetition rates can be tuned as low as 20kHz. To our knowledge , this is the lowest repetition rate and the most compact size from the solid-state cavity-dumped femtosecond laser.

**Keywords :** Ti Sapphire , Cavity-dumped laser , Kerr-lens Mode Locked laser

**PACC :** 4260 , 4260B , 4260F

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 19825110 and 69878032 ) and the National Hi-Tech ICF Program

<sup>†</sup>E-mail : wzhy@aphy. iphy. ac. cn