

文章编号: 0253-2239(2007)03-0466-5

# 啁啾脉冲堆积用于光脉冲整形

林宏奂 隋 展 王建军 张 锐 李明中

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

**摘要:** 报道了一种利用 100 ps 啁啾脉冲堆积产生 2.2 ns 任意整形脉冲的脉冲整形系统。采用掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤锁模振荡器得到稳定的锁模光脉冲序列, 将该锁模脉冲通过啁啾光纤光栅展宽并通过 1 nm 带宽的高斯形光谱滤波器滤波, 得到标准的 100 ps 高斯形啁啾脉冲序列, 将此脉冲选单经过光纤延迟线组成的 32 路脉冲堆积器, 得到了精度为 32 bit 的重复频率为 1 Hz 的 2.2 ns 任意整形光脉冲。研究了堆积脉冲的特性, 分析了宽带啁啾堆积整形脉冲的光谱时间扫描特性对激光驱动惯性约束聚变打靶束匀滑的优化作用。实验测得了该系统输出的 2.2 ns 整形光脉冲具有小于 50 ps 的上升沿, 与 100 ps 啁啾脉冲的时间抖动小于 4 ps。

**关键词:** 激光光学; 惯性约束聚变; 脉冲整形; 脉冲堆积

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## Optical Pulse Shaping by Chirped Pulse Stacking

Lin Honghuan Sui Zhan Wang Jianjun Zhangrui Li Mingzhong

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

**Abstract:** We demonstrate an all-fiber pulse shaping system that can generate 2.2 ns pulses with arbitrary pulse shapes by stacking a set of 100 ps chirped pulses. To form the standard 100 ps chirped Gaussian pulses, stable pulses generated from an Yb<sup>3+</sup>-doped mode-locked fiber oscillator is stretched and filtered by a chirped fiber Bragg grating (CFBG) and a 1 nm Gaussian spectral filter. The standard pulse is selected and stacked in an all-fiber pulse stacker composed of 32 time delay lines, and a 2.2 ns arbitrarily shaped pulse with 32 bit shaping precision operating at 1 Hz rate is obtained. The characteristics of the stacked pulse are studied, and the analysis shows that the wide spectrum of shaped pulses which periodically sweeps from long wavelength to short wavelength may optimize the beam smoothing in inertial confined fusion (ICF). Experimental results shows the shaped 2.2 ns pulse has a rise time less than 50 ps, and it is precisely synchronized with the 100 ps pulse with time jitter less than 4 ps.

**Key words:** laser optics; inertial confined fusion; pulse shaping; pulse stacking

## 1 引 言

在激光驱动的惯性约束聚变(ICF)中,激光压缩脉冲的形状非常关键<sup>[1~3]</sup>,要求惯性约束聚变激光驱动器的前端系统能够输出任意整形的光脉冲以预补偿放大过程所造成的波形畸变。1994年 Max Tabak 等<sup>[4]</sup>提出了快点火的新概念。但快点火要求惯性约束聚变激光驱动器前端能同时输出两路时间上零同步的可整形压缩脉冲和超短脉冲<sup>[5]</sup>。

目前惯性约束聚变激光驱动器的前端系统多采用电脉冲整形的方法<sup>[6]</sup>,由于电子电路的限制,无法产生任意形状的具有快上升沿(小于 100 ps)的脉

冲,也无法提供时间上零同步的可整形压缩脉冲和超短脉冲。

美国罗彻斯特大学和日本大阪大学曾分别采用分光镜分束光脉冲堆积整形和多模光纤分束光脉冲堆积整形的方法,得到了较快上升沿的整形脉冲<sup>[7~9]</sup>。但前者采用大量分光镜,占用了很大空间,后者用多模光纤分束器串连使用,只能提供台阶状的光脉冲而无法产生任意整形的光脉冲。

本文提出了一种并联式全光纤可编程啁啾光脉冲堆积整形方法获得任意整形脉冲。该整形脉冲的光谱时间扫描特性为间接驱动的束匀滑提供了新方

作者简介: 林宏奂(1978—),男,四川成都人,助理研究员,主要从事光纤光学方面的研究工作。

E-mail: happylin2003@yeah.net

收稿日期: 2006-06-02; 收到修改稿日期: 2006-08-17

法,整形脉冲与光纤锁模激光器输出的超短脉冲具有零同步关系,系统输出光谱具有宽带扩展能力。

## 2 原 理

啁啾脉冲堆积整形就是将锁模脉冲序列线性啁啾展宽后通过光谱滤波至所需要的宽度,通过分束,各束脉冲延时,并按照不同比例衰减,最后将各束脉冲合束形成整形脉冲的方法。由于采用了线性啁啾脉冲,脉冲前沿和后沿的频率不同,克服了相邻脉冲间的相干效应,得到的整形脉冲稳定平滑。光脉冲堆积器如图 1 所示。100 ps 的基元脉冲经过  $1 \times 8$  分束器并通过精确延时进入 8 个 4 路堆积模块。在 4 路堆积模块中,各路脉冲经过可变延时器(延时 35 ps)和可变光衰减反射镜后被反射再次通过可变延时器和  $1 \times 4$  分束器合成 280 ps 的脉冲。反射的 8 路 280 ps 脉冲延时 140 ps 后经过  $1 \times 8$  分束器合成任意整形的脉冲。整形脉冲由 32 个 100 ps 的基元脉冲合成,其整形精度为 32 bit(100 ps),单路可调谐精度由可编程光衰减器决定,为 40 dB。因此,这种方法可提供时间上可编程控制的几乎任意整形的光脉冲,同时,由于基元脉冲为 100 ps,所以整形脉冲的上升沿也小于 80 ps。

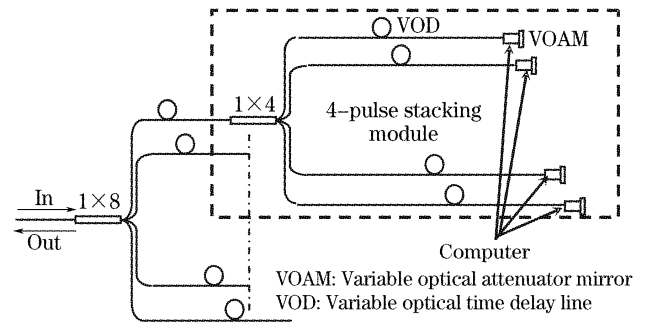


图 1 光纤光脉冲堆积器

Fig. 1 All fiber pulse stacker

### 2.1 啁啾脉冲堆积的原理

啁啾脉冲堆积的电场描述为

$$E(t) = \sum_{k=0}^n \alpha_k \exp \left[ - (1 + iC) \frac{(t - krT_{FWHM})^{2m}}{2\tau^{2m}} \right] \times \exp[-i\lambda_0(t - krT_{FWHM})], \quad (1)$$

$n+1$  为参与堆积的基准脉冲路数,  $C$  为脉冲的啁啾系数,  $\alpha_k$  代表第  $k$  个脉冲的强度调制因子(即衰减),  $m$  为脉冲波形的阶数,  $\lambda_0$  为基准脉冲中心波长,  $T_{FWHM}$  为基准脉冲的宽度。堆积后的脉冲宽度为  $\Delta T(n+1) \cdot r \cdot T_{FWHM}$ ,  $r$  为脉冲重叠的程度,  $r$  越大, 脉冲的重叠的程度越小。  $m=1$  时,  $T_{FWHM} = 2(\ln 2)^{1/2} \tau$ 。图 2 给出了  $r$  不同时, 光强随时间的变化图(图中小图为堆积脉冲顶部的放大图)。

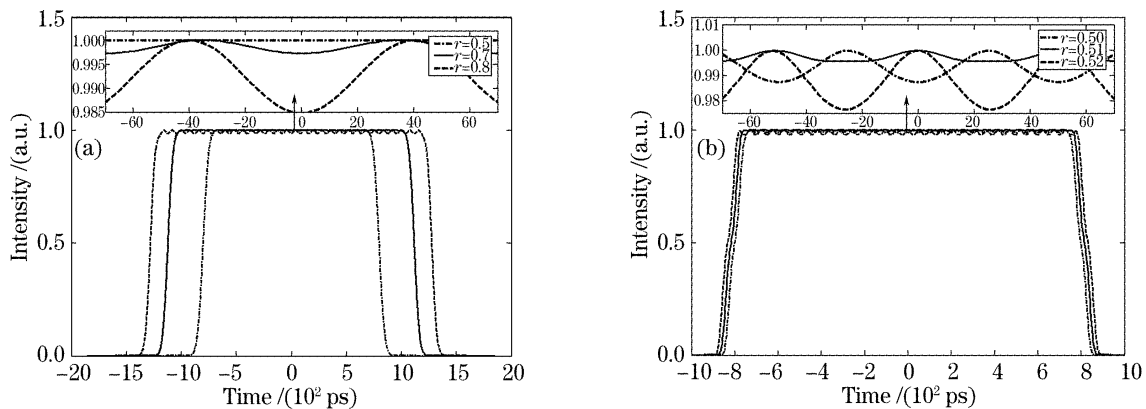


图 2 (a)  $r$  不同时 32 个高斯脉冲( $m=1$ )的组合脉冲, (b) 超高斯脉冲( $m=2$ )的组合脉冲

Fig. 2 (a) Composite pulsed formed by 32 Gaussian ( $m=1$ ) pulse with different  $r$  factor, (b) composite pulse formed by 32 supergaussian ( $m=2$ ) pulses with different  $r$  factor

对于高斯脉冲,  $r$  值越小, 顶部调制越小, 当  $r=0.7$  时, 脉冲顶部调制已小于 1%, 如图 2(a)。  $r$  变化时, 超高斯脉冲堆积比高斯脉冲堆积顶部变化大得多, 如图 2(b), 当  $r=0.51$  时, 脉冲顶部调制最小。由图 2 可知, 高斯脉冲在重叠度较小时易于调节到较小的顶部调制, 而超高斯脉冲堆积对重叠度精度要求高, 重叠因子变化 0.01 顶部的起伏就会增大许多, 且堆积出的脉冲相对较短, 这就意味着采用高斯脉冲且重叠因子 0.7 堆积较好。

### 2.2 啁啾脉冲堆积用于束匀滑的原理

由于基元脉冲是啁啾的, 脉冲前沿和后沿的频率不同, 因此整形脉冲的光谱在脉冲持续时间内以 100 ps 为周期 32 次由长波移向短波, 这种光谱扫描特性, 可用于束匀滑: 对堆积整形脉冲做光谱角色散, 利用焦斑不同时刻对应频谱成分不同形成的束平滑机制, 抑制焦斑内的高频起伏, 如图 3 所示。

通过计算我们得到<sup>[10]</sup>: 对比相同条件下一维光谱色散解匀滑的结果, 在光栅色散的方向上, 啁啾脉

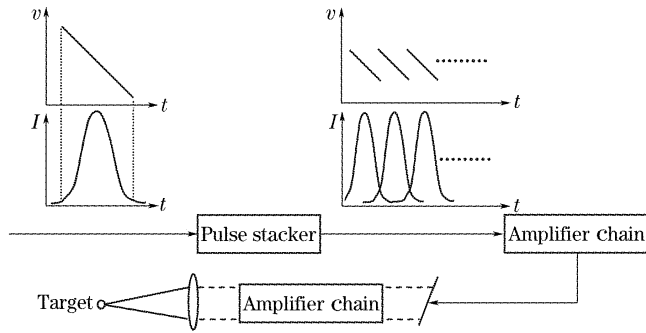


图 3 啁啾脉冲堆积束匀滑光路

Fig. 3 Configuration of chirped pulse stacking for beam smoothing

脉冲序列的匀滑效果要优于不加相位板一维光谱色散匀滑的匀滑效果,前者对靶面上  $10 \sim 100 \mu\text{m}$  尺度的通量起伏作了很大程度的抑制,而后者两端仍然存在尖峰调制。这种新的时间束平滑方法结构简单,且焦斑特性可调,这些优点使得它在提高靶面辐照均匀性方面具有重要的应用价值。

### 3 实验及结果

实验装置如图 4 所示。被动锁模的掺镱光纤超短脉冲激光器<sup>[12,13]</sup>输出脉冲宽度 7 ps,中心波长 1053.2 nm,带宽 8.4 nm 的脉冲序列经过偏振无关的脉冲单选器后产生重复频率为 1 Hz 的脉冲。该脉冲输入啁啾系数  $-125 \text{ ps/nm}$  的啁啾光纤光栅(超高斯型,带宽 5 nm,顶部光谱不平整度  $< 0.1 \text{ dB}$ ),展宽至约 0.6 ns,经过光纤放大器中 1.0 nm 带宽的滤波器(高斯型光谱带通滤波)后产生约 100 ps 的基准脉冲,如图 5 所示。为了验证整形脉冲与超短脉冲的零同步特性,基元脉冲在输入堆积器前用  $1 \times 2$  光纤分束器分束,一路输入堆积器堆积产生整形脉冲;另一路脉冲不经过堆积器与放大后的整形脉冲通过合束器合束。两路脉冲合束后由棒放大器组成的高增益系统放大(放大  $10^5$  倍)。采用 TDS6604 示波器(6 GHz, 20 Gs/s)和条纹相机同时检测光纤系统和高增益放大器的输出。

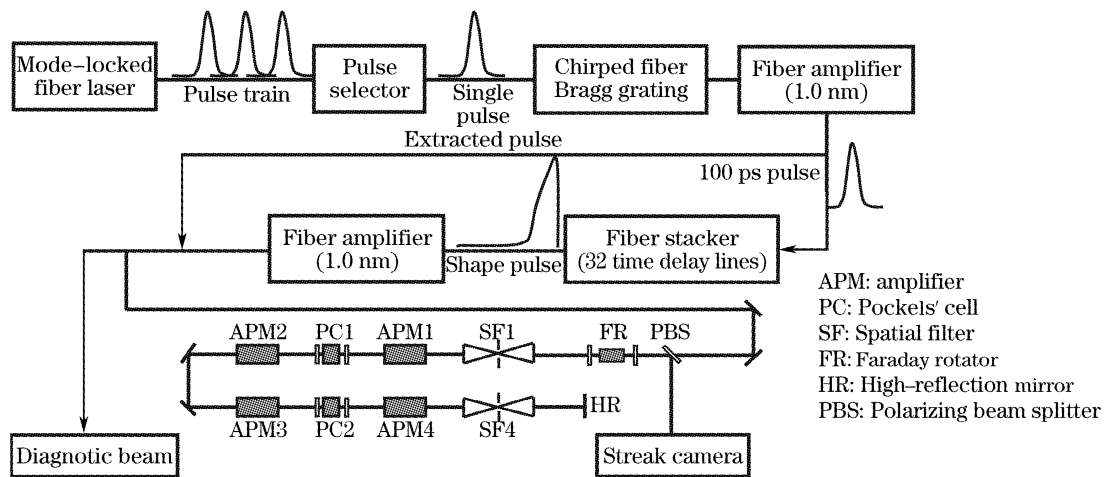


图 4 啁啾脉冲堆积实验系统

Fig. 4 Experimental setup for chirped pulses stacking

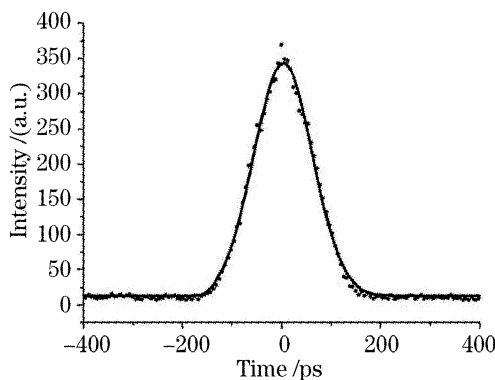


图 5 自相关仪测得的基元脉冲

Fig. 5 Autocorrelation of standard pulse

示波器测得的超高斯脉冲波形与条纹相机测得的脉冲波形对比如图 6 所示。可见,示波器与条纹相机测得的波形一致,且在条纹相机极限分辨力

(2 ps)下测的脉冲并没有干涉产生的脉冲时域调制。图 7 给出了系统输出的用于惯性约束聚变的几种典型整形光脉冲波形。

我们用条纹相机最高分辨力档测量了高增益放大器输出的 2.2 ns 方波的上升沿,即波形前沿 10%~90%的时间,如图 7(c)。测得使用 1 nm 高斯型滤波器产生 100 ps 高斯基元脉冲堆积脉冲的上升沿为 71.2 ps,这与理论上 100 ps 高斯脉冲的上升沿(约 70 ps)相符。为了得到更快的上升沿,将高斯滤波器换成超高斯滤波器(近 2 阶超高斯),测得上升沿为 41 ps,上升时间小于 50 ps。用条纹相机(最高分辨力 2 ps)测量了高增益放大器输出的整形脉冲与超短脉冲的间隔时间,2 小时内随机记录 10 次数据为: 285.5 ps、285.5 ps、281.6 ps、282.9 ps、281.5 ps、

281.5 ps、284.2 ps、281.6 ps、282.8 ps、281.6 ps。最大同步抖动为  $\Delta\tau=4$  ps, 均方差为 1.6 ps。这已

经接近系统的测量误差极限, 可见整形脉冲与超短脉冲是绝对的零同步关系。

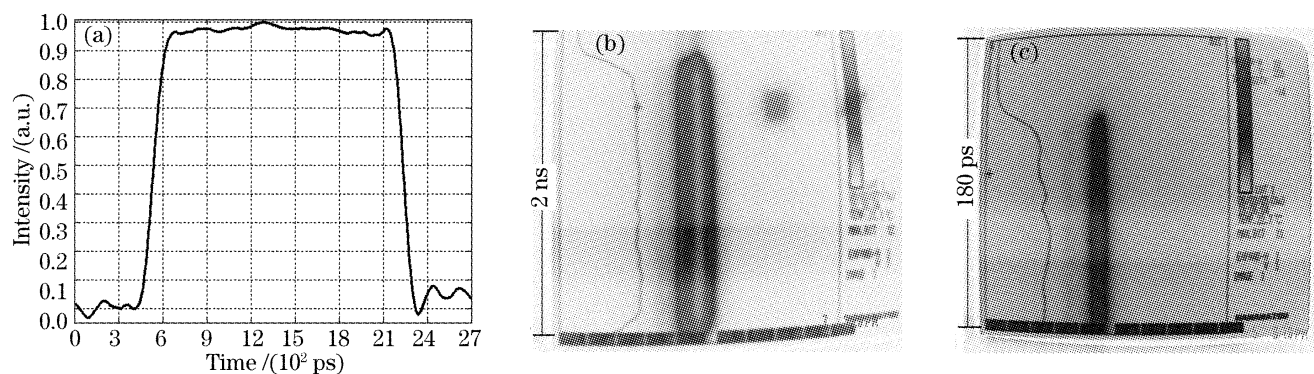


图 6 测得的超高斯平顶脉冲, 示波器测得的波形(a), 条纹相机 2 ns 档测得的波形(b), 条纹相机最快档测得的前沿波形(2 ps 分辨力)(c)

Fig. 6 Measured flat top pulse, waveform measured by oscilloscope (a) and streak camera (2 ns resolution) (b), rise edge measured by streak camera (2 ps resolution) (c)

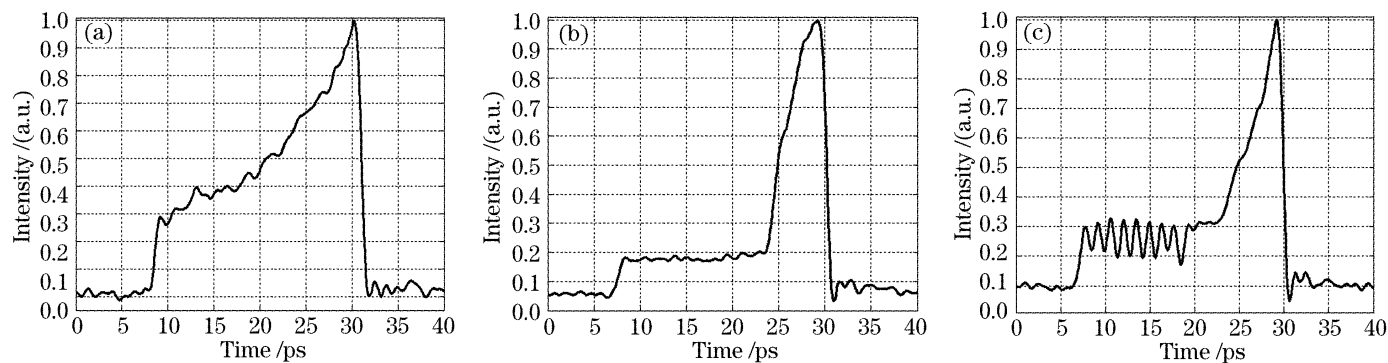


图 7 典型脉冲波形

Fig. 7 Typical pulse waveforms

## 4 结 论

提出了全光纤啁啾光脉冲可编程堆积整形的方法, 得到了精度为 32 bit(100 ps) 的 2.2 ns 任意整形光脉冲。研究了堆积脉冲的特性, 实验测得了该光纤系统输出的 2.2 ns 整形光脉冲具有小于 50 ps 的上升沿, 与 100 ps 啁啾可压缩脉冲的时间抖动小于 4 ps。由于后续系统的增益带宽限制, 目前该系统带宽仅 1 nm, 随着宽带高增益系统的发展, 系统的输出有望扩展至 10 nm, 该脉冲整形方法具有用于激光驱动惯性约束聚变快点火的潜力。分析了宽带啁啾堆积整形脉冲的光谱时间扫描特性对激光驱动惯性约束聚变打靶束匀滑的优化作用, 由于条件限制, 该部分的实验工作并未充分展开, 但有望在短期内通过与神光 III 原型装置联机进行实验验证。

## 参 考 文 献

1 Yung-Ho Chuang, Terrance J. Kessler, Stanley Skupsky. Laser-beam pulse shaping using dispersive filtering[C]. *Proc. SPIE*,

1993, **1870**: 34~46

- 2 J. K. Lawson, D. R. Speck, C. Bibeau *et al.*. Temporal shaping of third-harmonic pulses on the NOVA laser system[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(24): 5061~5068
- 3 J. D. Lindl, W. C. Mead. Two dimensional simulation of fluid instability in laser fusion pellets[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1975, **34**(20): 1273~1276
- 4 MaxTabak, James Hammer, Michael E. Glinsky *et al.*. Ignition and high gain with ultrapowerful lasers [J]. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**(5): 1626~1634
- 5 Zhang Jiatai, He Bin, He Xiantu *et al.*. Study on the mechanism of the fast ignition in laser fusion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(5): 921~925 (in Chinese)
- 6 张家泰, 何 斌, 贺贤士 等. 激光聚变快点火机理研究[J]. *物理学报*, 2001, **50**(5): 921~925
- 7 S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessler *et al.*. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(8): 3456~3462
- 8 Joshua E. Rothenberg. Two dimensional beam smoothing by spectral dispersion for direct drive inertial confinement fusion [C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2633**: 634~644
- 9 J. Soares, S. Kumpan, J. Hoose. High power Nd:glass laser for fusion applications[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(9): 2081~2094
- 10 C. E. Thomas, L. D. Siebert. Pulse shape generator for laser fusion[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(2): 462~465

- 10 M. Nakatsuka, N. Miyanaga, T. Kanabe *et al.*. Partially coherent light sources for ICF experiment [J]. *Proc. SPIE*, 1993, **1870**: 151~162
- 11 Zhang Rui, Zhang Xiaomin, Sui Zhan *et al.*. Research on temporal smoothing characteristics of frequency-modulated light [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33** ( Suppl. ): 256 ~ 259 ( in Chinese )  
张 锐, 张小民, 隋 展 等. 基于调频脉冲的时间束匀滑技术研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊): 256~259
- 12 H. Lim, F. Ö. Ilday, F. W. Wise. Generation of 2-nJ pulses from a femtosecond ytterbium fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(8): 660~662
- 13 V. Cauterets, D. J. Richardson, R. Paschotta *et al.*. Stretched pulse Yb<sup>3+</sup>: silica fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(5): 316~318

## LASER2007' Harbin

### 第十八届全国激光学术会议第一轮通知

中国光学学会与中国电子学会联合主办的系列会议——第十八届全国激光学术会议,定于2007年8月在黑龙江哈尔滨举行。本次会议将为我国激光与光电子新老学者提供探讨新思想、新概念、新技术的交流平台,促进学术领域的科技创新和科技成果转化。多名院士和著名专家到会作大会报告,各分会设立高水平的邀请报告。欢迎积极投稿,踊跃参加。同时欢迎各公司、企事业单位刊登广告、到会展示科技成果产品和发布信息。

会议时间:2007年8月,会期4天

会议地点:中国·黑龙江·哈尔滨

主办单位:中国光学学会、中国电子学会

承办单位:哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室

名誉主席:周炳琨院士

会议主席:范滇元院士、周寿桓院士

会议副主席:姚建铨、彭堃堃、朱健强、王 骐、王树国

秘书长:陈德应

会议主题/征稿范围:1) 激光物理(激光器动力学、激光等离子体物理、X光激光、激光光谱等);2) 非线性光学与量子光学;3) 全固态激光器及新型激光器;4) 激光信息及处理技术;5) 激光生物与激光医学;6) 工业激光及其应用;7) 激光材料、薄膜及元器件;8) 光束传输、控制及光束特性

征文要求:将500~800字摘要(用于审稿)和300字提要(用于出版)各一份,以电子邮件附件的形式发送至:Laser2007@hit.edu.cn,摘要应能准确反映研究成果的创新点,包括研究目的、方法结果、结论等内容。不引用参考文献、数学公式和化学式。不接受已在国内外正式出版刊物上发表过的论文,提交截稿日期为2007年5月31日。

来稿需注明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址(包括邮编、电话、E-mail等)、关键词3~6个。题目用小三号黑体,摘要用宋体小四号字按word格式编排,务必在左上角标明所属征稿范围的第几类。一般不接受书面邮寄件。经审稿录用的论文,将由《中国激光》以增刊形式出版。

会议秘书组联系人及联系电话:

陈德应 0451-86402837,何伟明 0451-86412710-214,

程元丽 0451-86402920,王春晖 0451-86402910,王瑞环 0451-86413164

传真:0451-86413164,E-mail:Laser2007@hit.edu.cn,网页:www.Laser2007.hit.edu.cn

地址:黑龙江哈尔滨南岗区一匡街2号哈工大科学园3031信箱(王瑞环收),邮编:150001

中国光学学会激光专业委员会

中国电子学会量子电子学与光电子学分会

哈尔滨工业大学

可调谐激光技术国家级重点实验室

哈尔滨工业大学光电子技术研究所(代章)

二〇〇七年一月二十二日