

文章编号: 0253-2239(2006)10-1512-5

采用啁啾脉冲堆积的时间束平滑技术*

张 锐^{1,2} 张小民¹ 栗敬钦¹ 隋 展¹ 林宏奂¹ 景 峰¹ 王文义¹

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)
(² 中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088)

摘要: 成丝不稳定性是间接驱动靶丸均匀压缩面临的重要问题, 10 μm 到 100 μm 的靶面光强起伏对其影响尤为严重, 须采用合理的束平滑措施加以抑制。提出用光纤系统对啁啾脉冲堆积, 然后对组合脉冲做光谱角色散, 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。利用傅里叶变换方法推导出了光栅色散后的组合脉冲表达式。模拟结果表明, 焦斑尺寸随色循环数和光栅色散方向上基准脉冲带宽的增加而增大。通过计算包含焦斑能量 95% 范围内的通量衬比度随时间变化的曲线, 得出一个色循环、基准脉冲带宽 0.3~0.5 nm 下可以获得最佳的焦斑平滑效果。这种新型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。

关键词: 激光技术; 时间束平滑; 脉冲堆积; 焦斑; 惯性约束聚变

中图分类号: TN241 文献标识码: A

Temporal Beam Smoothing Technique Using Chirped Pulse Stacking

Zhang Rui^{1,2} Zhang Xiaomin¹ Su Jingqin¹ Sui Zhan¹ Lin Honghuan¹
Jing Feng¹ Wang Wenyi¹

(¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)
(² Beijing Postgraduate Department, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088)

Abstract: In the indirect-drive target compression process, filamentation instability should be considered seriously, especially light intensity fluctuation of size 10~100 μm on the surface of target, and a proper beam smoothing method must be adopted. A new method, using fiber system to stack chirped pulses, treating the composite pulses with angular spectral dispersing, depressing the high frequency fluctuation in the focal spot with the beam smoothing mechanism of focal spot at different time determining different spectral components, is proposed. Using Fourier transform method, the expression for the composite pulses dispersed by a grating is deduced. Simulation results show that the size of the focal spot increases with the number of color cycles and the basic pulse bandwidth in the dispersing direction. Through calculating the flux contrast including 95% focal spot energy with time, it is found that the optimal smoothing effect is achieved with one color cycle and 0.3~0.5 nm basic pulse bandwidth. This new kind of temporal beam smoothing technique has the advantages of simple configuration and adjustable focal spot performance, and is of important application value in improving irradiation uniformity on target surface.

Key words: laser technique; temporal beam smoothing; pulse stacking; focal spot; inertial confinement fusion

1 引 言

当激光在等离子体中传播时, 常常会自行分成许多子光束, 各子光束自行聚焦, 最后形成一根根细丝, 这就是成丝现象 (Filamentation)。成丝会产生有害的非线性效应, 降低靶丸吸收效率, 影响靶丸均

匀辐照^[1]。由于成丝, 局部的激光强度增大还会加强某些不稳定性的发展, 产生更多的超热电子。超热电子会使热核燃料预热, 导致内爆压缩时燃料不能达到高压压缩度。研究表明, 10 μm 到 100 μm 尺度的靶面光强调制最容易引起成丝, 是间接驱动束平

* 国家 863 计划(2005AA845030)资助课题。

作者简介: 张 锐(1981~), 男, 内蒙古临河人, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心硕士研究生, 主要从事高功率固体激光装置光束控制研究。E-mail: zrsnowmanzr@hotmail.com

导师简介: 张小民(1955~), 男, 山东人, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心研究员, 主要从事高功率固体激光技术的研究。E-mail: xmzhang@lfcenter.ac.cn

收稿日期: 2005-12-21; 收到修改稿日期: 2006-02-20

滑抑制的主要目标。

1989 年,激光力能学实验室(Laboratory for Laser Energetics, LLE)的 S. Skupsky 等^[2]提出了光谱色散平滑技术(Smoothing by spectral dispersion, SSD),目前该技术已发展出了多种形式^[3],但总的来说,都具有将宽带光、相位板和色散元件结合起来使用的特点。光谱色散平滑技术已在 OMEGA 和 GEKKO Ⅱ等激光装置上得到了应用。法国兆焦耳装置采用了三倍频光栅透镜对宽带光(在前端对窄带光做正弦相位调制)聚焦加连续相位板(Continuous phase plate, CPP)的方式^[4],得到了高阶超高斯焦斑包络。国内周申蕾等^[5]做了谱色散均匀化的计算和实验研究,为神光Ⅱ中的应用提供了设计参考。但光谱色散平滑技术由于相位板的加入使焦斑尺寸大为增加,在应用于间接驱动时容易出现堵孔等问题。诱导空间非相干技术(Induced spatial incoherence, ISI)^[6]将非相干光成像到靶面获得了平滑的焦斑,但由于要对空间和时间内强度不均匀的光进行放大,不

适合用于高功率固体激光器。对间接驱动,如何结合前端输出脉冲^[7]采用合理的束平滑措施来抑制成丝仍是目前未解决的技术难题。

针对该难题,本文提出对前端光纤系统产生的啁啾脉冲用多路光纤堆积器做脉冲堆积,然后加光栅色散,利用焦斑不同时刻对应频谱分布不同形成的束平滑机制,抑制靶面上对物理实验不利的空间起伏。

2 理论推导

图 1 给出了这种束平滑方法的简图。从被动锁模掺镱光纤激光器^[8]中选出半峰全宽约为 20 ps 的单脉冲,选单器采用波导调制器,它可使输出的脉冲间幅度起伏控制在 1% 内。这种单脉冲本身具有啁啾^[9],光谱宽度达 10 nm。通过掺镱光纤放大器后中心波长被控制在 1.053 μm,同时由于放大器中光纤光栅的作用使光谱变窄脉宽展宽。再让这种脉冲通过多路光纤堆积器,便可得到所需脉宽的任意整形脉冲。

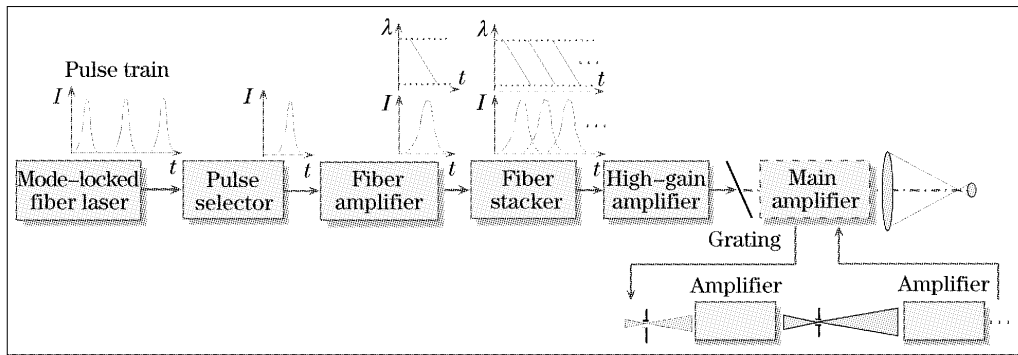


图 1 采用啁啾脉冲堆积的束平滑方法简图

Fig. 1 Schematic of the beam smoothing method using chirped pulse stacking

在建立脉冲堆积模型时,用下式描述堆积脉冲的电场强度

$$E(t) = \sum_{k=0}^n \alpha_k \exp\left[-\frac{krT_{FWHM}}{2\tau^{2m}} - ib \frac{(t - krT_{FWHM})^2}{2\tau^2}\right] \exp[-i\omega_0(t - krT_{FWHM})], \quad (1)$$

式中 t 为时间, T_{FWHM} 为脉冲时间波形的半峰全宽, ω_0 为中心角频率, τ 为 e^{-1} 强度处的半峰全宽, b 为输入脉冲的啁啾参量 ($b = \Delta\omega_L \tau/2$, 其中 $\Delta\omega_L$ 为啁啾脉冲的频谱全宽), n 为堆积脉冲数, α_k 为相对强度, r 为脉冲延时因子。考虑高斯脉冲的堆积 ($m = 1$), 有 $T_{FWHM} = 2(\ln 2)^{1/2} \tau$ 。图 2 给出了脉冲延时因子 r 改变时得到的组合脉冲。可以看到, 对于高斯脉冲, r 越小, 顶部调制越小。但随着 r 的减小, 脉冲间的相干性会变强。因此选择了 $r = 0.7$ 作为下一步计算的参量, 此时顶部调制已小于 1%。

选 Z 轴作为光的传播方向, 则光栅引入的相

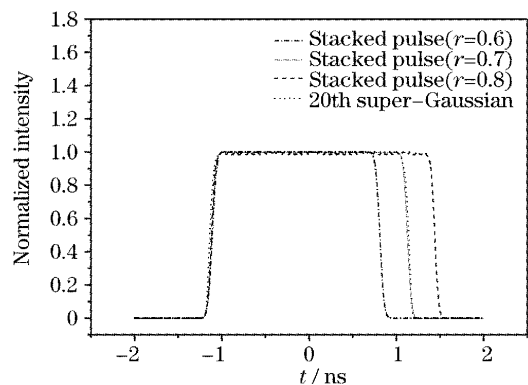


图 2 不同延时因子 r 下得到的组合脉冲

Fig. 2 Composite pulses with different pulse delay factor r

位为

$$\phi(\omega) = \mathbf{k} \cdot \mathbf{R} = (\omega/c)(Z\cos\theta + Y\sin\theta), \quad (2)$$

其中 \mathbf{k} 为光波矢, \mathbf{R} 为传输距离, c 为真空中的光速。

ω 光的衍射角 θ 由光谱角色散 $\Delta\omega/\Delta\lambda$ 给出:

$$\theta = \frac{d\theta}{d\omega}\Delta\omega = -\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}\frac{\lambda}{\omega}\Delta\omega, \quad (3)$$

$\Delta\omega/\omega$ 较小时

$$\phi(\omega) \approx -\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}\frac{\lambda}{c}(\omega - \omega_0)Y + \frac{\omega}{c}Z, \quad (4)$$

得到光栅后的电场表达式:

$$E'(t) = \sum_{k=0}^n \alpha_k \exp[-i\omega_0(t - krT_{FWHM})] \times \exp\left[-\frac{1+ib}{2\tau^2}\left(t - krT_{FWHM} + \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}\frac{\lambda}{c}Y - \frac{Z}{c}\right)^2\right], \quad (5)$$

光束截面上的频率变化可以理解为截面不同部位时间延迟不同引起的。由(5)式看出总时间延迟 t_D 与光栅色散和 Y 方向的光束尺寸 D 成正比:

$$t_D = (D \cdot \Delta\theta/\Delta\lambda)\lambda/c.$$

光栅色散可写成 $\xi = (\Delta\theta/\Delta\lambda)\lambda/c = t_D/D$, 用色循环数(N_c)来定义一个空间截面内的波长分布周期数, 这里取 $N_c = t_D/T_{FWHM}$ 。

光栅后的电场形式为

$$E(X, Y, Z, t) = E'(t) \exp\{-\ln 2[(2X/D)^{2n} + (2Y/D)^{2n}]\} \times \exp[i\varphi(X, Y) - ikZ], \quad (6)$$

其中 n 取 10, $D=29$ cm。

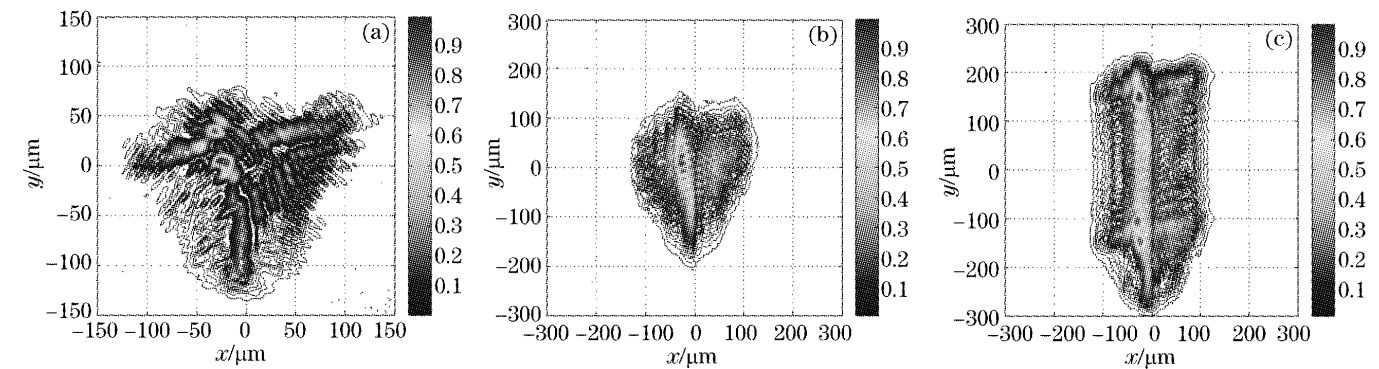


图 3 (a)不加束平滑措施时的焦斑, (b)基准脉冲带宽 0.5 nm($N_c=1$)时啁啾脉冲堆积得到的焦斑, (c) 0.5 nm 带宽下一维光谱色散平滑技术(不加相位板, $N_c=1$)得到的焦斑

Fig. 3 (a) Focal spot without beam smoothing method, (b) focal spot of stacked chirped pulse with 0.5 nm bandwidth of each pulse and $N_c=1$, (c) focal spot of 1D SSD (without phase plate) with 0.5 nm bandwidth and $N_c=1$

由图 4 可见, 色循环数增大时, 最终得到的焦斑衬比度呈现先减小后增大的趋势。这是由于色循环数很小时, 焦斑扫动范围也小, 造成许多原有的调制无法得到平滑; 而随着色循环数的增大, 光束截面内

3 数值模拟

堆积脉冲经放大和扩束, 最后聚焦到靶面。设像传递面位于透镜前 f 处, 且透镜后焦面作观察平面, 则焦面上的光强分布为

$$I_{ff}(x_{ff}, y_{ff}, t) = \left| \iint_{V_{space}} E(X, Y, t) \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}(x_{ff}X + y_{ff}Y)\right] dXdY \right|^2, \quad (7)$$

$I_{ff}(x_{ff}, y_{ff}, t)$ 代表远场瞬时光强, $E(X, Y, t)$ 为输入近场, (X, Y) 和 (x_{ff}, y_{ff}) 为近场和远场的对应坐标。远场光通量定义为瞬时光强在脉冲时间长度内的积分。在透镜前加入原型首束测得的主放动态波前, 取透镜焦距 $f=2.2$ m, 得到图 3(a) 的焦斑通量分布。可以看出焦斑上有很多 $10\sim 100 \mu\text{m}$ 的起伏。图 3(b) 给出了基准脉冲带宽 0.5 nm 时, 啁啾脉冲堆积做光谱色散后得到的平滑焦斑; 图 3(c) 给出了 0.5 nm 带宽下一维光谱色散平滑技术(不加相位板且 $N_c=1$) 得到的焦斑。

定义光束通量衬比度(Contrast)

$$c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F_i - F_{avg})^2 / D}{F_{avg}}},$$

其中 F_i 为靶面上 i 点位置处的光通量, F_{avg} 为计算区域内光场的平均通量。得到图 4 包含焦斑 95% 通量范围内的衬比度在不同色循环数下随时间变化的曲线。

相同频率光之间的相干性逐渐增强, 在焦斑上体现为出现条纹状结构, 衬比度随之增大。同时发现, 相同带宽和色循环下, 采用图 1 中 20 阶超高斯脉冲的一维光谱色散平滑技术(不加相位板)焦斑比啁啾

脉冲堆积束平滑得到的通量衬比度高,且焦斑上两

端存在尖峰调制。这说明不加空间束平滑器件时,堆积脉冲在改善靶面辐照均匀性方面更具优越性。

在色循环数为 1 的条件下,研究了基准脉冲带宽对焦斑平滑特性的影响,得到的焦斑通量分布如图 5。

由图 6 可以看出,达到最佳平滑效果所需的时间随着基准脉冲带宽的增加不断减少,最终达到的衬比度值同样存在先减小后增大的趋势,即基准脉冲存在最佳带宽。后四条曲线中衬比度在达到最小值后出现了小幅上升,通过观察瞬时平滑效果图,也发现开始的几个脉冲作用下焦斑内的条纹状结构并不明显,而随着时间的推移,这种条纹结构逐渐增强。这说明,达到衬比度最小值后,堆积脉冲数目的增多对焦斑平滑效果的改善已没有益处。通过计算,选择了一个色循环,基准脉冲带宽 0.3~0.5 nm 的束平滑方案,作为实验的基本参量。

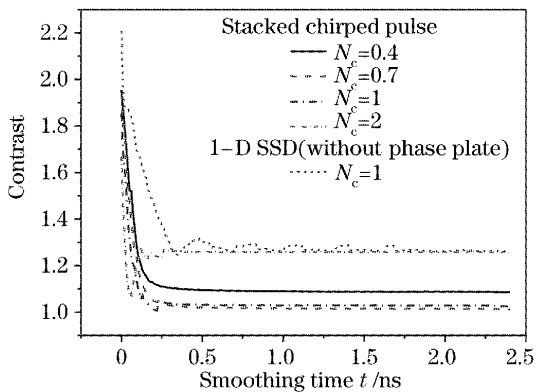


图 4 基准脉冲带宽 0.5 nm 色循环数不同时得到的通量衬比度随时间的变化曲线

Fig. 4 Relationship between the flux contrast of focal spot and time with different color cycles for 0.5 nm basic pulse bandwidth

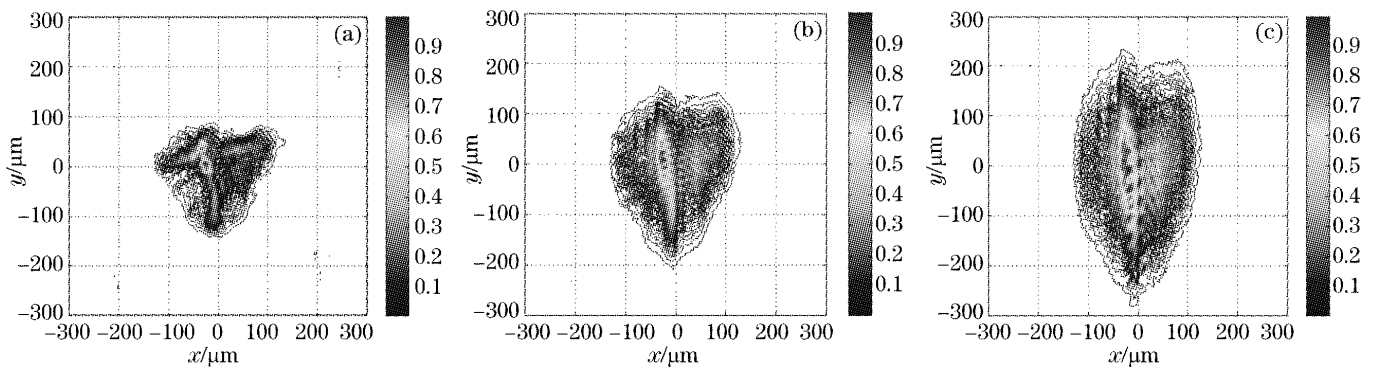


图 5 一个色循环下基准脉冲带宽 0.1 nm (a), 0.5 nm (b) 和 0.9 nm (c) 时得到的平滑焦斑

Fig. 5 Focal spot using chirped pulse stacking with one color cycle and 0.1 nm (a), 0.5 (nm) and 0.9 nm bandwidth of each pulse

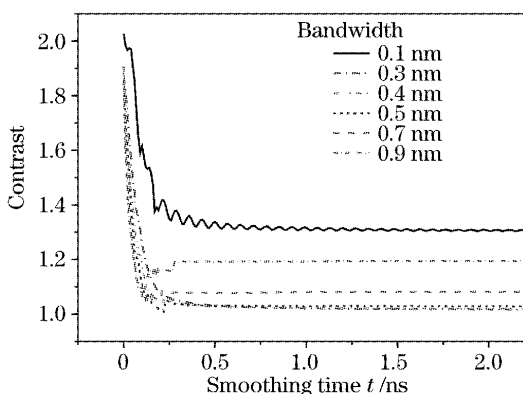


图 6 基准脉冲带宽改变时焦斑衬比度随平滑时间的变化曲线

Fig. 6 Relationship between contrast of focal spot and time with different bandwidths of each pulse

4 结 论

为解决光谱色散平滑技术不加相位板时远场焦

斑两端存在强调制的问题,提出了利用堆积的啁啾脉冲进行光谱色散的束平滑方法。该方法充分利用了啁啾脉冲的平滑光谱,在光栅色散后将时间谱转化为空间分布,从而得到超高斯型的远场焦斑。通过研究色循环数和基准脉冲带宽等参量对焦斑的影响,优化了设计参量,并证明这种束平滑方法与一维光谱色散平滑技术(不加相位板)相比,在消除靶面高频起伏方面更具优越性。利用这种短脉冲堆积的方法,还可以很好地解决惯性约束聚变驱动器前端系统输出脉冲的任意整形问题、快上升沿问题和主脉冲与各种脉冲的精确同步问题。为用于间接驱动实验的高功率激光驱动器提供了一条新的技术路线。

参 考 文 献

- 1 S. Skupsky, Kotik Lee. Uniformity of energy deposition for laser driven fusion[J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(7): 3662~3671
- 2 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
- 3 Joshua E. Rothenberg. Comparison of beam-smoothing methods for direct-drive inertial confinement fusion[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(7): 1664~1671
- 4 Jérôme Néauport, Xavier Ribeyre, Jérôme Daurios *et al.*. Design and optical characterization of a large continuous phase plate for laser integration line and laser Megajoule facilities [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(13): 2377~2382
- 5 Zhou Shenlei, Lin Zunqi, Zhu Jian *et al.*. Computation and study of smoothing by spectral dispersion[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(3): 341~345 (in Chinese)
周申蕾, 林尊琪, 朱 俭 等. 谱色散均匀化的计算研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 341~345
- 6 R. H. Lehmborg, A. J. Schmitt, S. E. Bodner. Theory of induced spatial incoherence[J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**(7): 2680~2701
- 7 Shen Lei, Chen Shaohe, Ge Xiaping *et al.*. New temporary pulse shaping technique of the front-end system in laser facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 84~87 (in Chinese)
沈 磊, 陈绍和, 葛夏平等. 新型激光装置前端系统激光时间脉冲整形技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 84~87
- 8 Changgui Lü, Zhuyuan Wang, Binfeng Yun *et al.*. Stable single frequency Er-doped all-fiber ring laser with fiber Bragg grating Fabry-Perot filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(4): 212~214
- 9 H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen. Structures for additive pulse mode locking [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(10): 2068~2076

征 订 启 事

《中国激光》增刊

第十七届全国激光学术会议于 2005 年 10 月 19~22 日在四川绵阳富乐山大酒店召开。本次会议由中国光学学会与中国电子学会联合主办。共有 350 多名来自高校、研究所以及公司激光领域的研究人员参加了本次会议。

本次大会共收到论文 330 篇,《中国激光》将其中的优秀论文 126 篇汇编成册,以增刊形式出版了《第十七届全国激光学术会议论文集》,为广大激光工作者提供了一份有价值的参考资料。

按照研究方向,论文集分为激光物理、非线性光学、高能固体激光与超短脉冲激光、新型激光器、激光技术及晶体材料、激光应用、光束传输、激光薄膜及元器件等专栏。较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果,显示了激光科学技术对国家十一五规划、国家 863 计划、国家 973 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

论文集共计 462 页,进口雅光纸精印,定价 100 元。欢迎订阅。

《光学手册》

这是我国编写的第一本基础性大型光学手册。本书顾问为著名光学专家龚祖同,主编为李景镇。

本书为 16 开,1541 页,定价 100 元。全书有 2700 多个公式,1400 余幅插图和 400 多个数据表格,230 万字。是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。本书能使读者在较短时间内全面了解某门光学分科的主要内容,查阅公式、数据省时省力。

电话:021-69918427 电子信箱:gexiaohong@siom.ac.cn
地址:上海 800-211 信箱 邮政编码:201800 联系人:葛晓红