

文章编号: 0258-7025(2009)08-1918-05

宽线宽 Cr:LiSAF 受激布里渊散射相位共轭激光器

葛传文 薛模根 罗晓琳 张 瑾

(炮兵学院光电工程教研室, 安徽 合肥 230031)

摘要 激光聚焦到受激布里渊散射(SBS)介质中所产生的声子光栅的密度对比度对应于叠加光场的强度对比度, 据此直观分析了宽线宽激光 SBS 能量阈值高于窄线宽激光 SBS 的原因, 并对宽线宽 SBS 相位共轭谐振腔的高启动阈值进行了定性分析。设计并运行了 Cr:LiSAF 宽线宽 SBS 相位共轭激光器, 对其静态运行时的输出激光波形, 以及自调 Q 动态运行时的输出激光脉冲波形、能量、光束发散角等进行了测量。结果表明它能有效地产生脉宽约为 50 ns 的自调 Q 脉冲激光, 光束发散角相对于静态激光压缩了约 2 倍。

关键词 非线性光学; 宽线宽相位共轭激光器; 受激布里渊散射(SBS); Cr:LiSAF

中图分类号 O437.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.1918

Broad-Band Cr:LiSAF Stimulated Brillouin Scattering Phase-Conjugation Laser

Ge Chuanwen Xue Mogen Luo Xiaolin Zhang Jin

(Optoelectronic Engineering T&R Section of Artillery Academy, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Laser beam focused on stimulated Brillouin scattering (SBS) medium can produce phonon grating, whose density contrast direct ratio to superposition fringe intensity contrast of light field. Then the reason of broad-band laser SBS having higher energy threshold than narrow-band SBS is analyzed, and the qualitative analysis of broad-band SBS phase-conjugation laser resonator having higher startup energy threshold is given. A broad-band SBS phase-conjugation laser resonator of Cr:LiSAF is designed and operated, its free-running output laser pulse waveform, self-Q-switching output laser pulse waveform, pulse energy and beam divergence angle are measured. The results indicate that this resonator can produce 50 ns self-Q-switching narrow pulsewidth laser beam efficiently, its beam divergence angle is compressed by a factor of two.

Key words nonlinear optics; broad-band phase-conjugation lasers; stimulated brillouin scattering(SBS); Cr:LiSAF

1 引 言

Cr:LiSAF 是新型近红外、宽调谐固体激光材料,其调谐范围从 760 nm 到 1000 nm 附近,倍频处于蓝绿波段。它具有很长的上激光能级寿命(67 μ s),可用闪光灯或半导体激光作为其抽运源^[1,2]。但普通 Cr:LiSAF 激光器的输出一般都是宽线宽、多横模激光束,光束质量较差,不利于通过非线性过程(如谐波、光学参量振荡等)进行有效的波长扩展^[3]。目前,受激布里源散射(SBS)相位共轭技术

在补偿校正激光束光束质量方面得到广泛研究^[4~7],人们已成功地运行了 Nd:YAG、Nd:YALO 等窄线宽 SBS 相位共轭激光器,获得了窄脉宽、高功率、近衍射极限的激光输出^[8~11]。将相位共轭镜用于 XeCl^[12,13]、Ti:sapphire^[14]等激光谐振腔,构成的宽线宽相位共轭激光器也运行成功,并较好地改善了光束质量。

为改善宽线宽 Cr:LiSAF 激光器的输出光束质量,获得窄脉冲激光,本文对宽线宽 Cr:LiSAF 相位

收稿日期: 2009-01-16; 收到修改稿日期: 2009-05-11

基金项目: 国家 863 计划激光技术创新基金(20030509)资助课题。

作者简介: 葛传文(1968—),男,副教授,主要从事非线性光学、固体激光器件与技术等方面的研究。

E-mail: ge_chuan_wen@yahoo.com.cn

共轭激光器进行了实验研究。由于宽线宽激光的受激布里渊散射阈值较高,所以相对于 Nd:YAG 等窄线宽激光而言,Cr:LiSAF 激光相位共轭谐振腔的形成比较困难,它要求起始腔提供足够高的光功率密度。为此在相位共轭谐振腔设计方面采取了一些措施,实现了 Cr:LiSAF 相位共轭激光器的运转,并对其输出波形、输出能量、光束质量等进行了观测。

2 理论分析

激光聚焦到受激布里渊散射介质中所产生的声子光栅的密度对比度,对应于叠加光场的强度对比度,也即叠加光场的强度条纹对比度,此对比度与激光线宽 $\Delta\lambda$ 之间具有密切关系^[15]。

在一维叠加光场中某一点 (z) 处,波长 $\lambda_i \sim \lambda_i + d\lambda_i$ 的激光的叠加强度为

$$dI = \bar{I}_0 \cos^2(m - k)\pi d\lambda_i,$$

式中 $\bar{I}_0 = I_0/\Delta\lambda$ 为波段 $\Delta\lambda$ 内的平均光密度, m 为最短波长 λ 在 z 点处的干涉级, $k = m - m_i$ 为波长 λ 和 λ_i 的干涉级差值,即有 $m = \Delta(z)/\lambda, k = (\lambda_i - \lambda)\Delta(z)/\lambda\lambda_i \approx (\lambda_i - \lambda)\Delta(z)/\lambda^2$,这里 $\Delta(z) = n_1z - n_2z$ 为波长 λ 和 λ_i 从 $z = 0$ 点到 $z = z$ 点的光程差, n 和 n_i 分别为波长 λ 和 λ_i 的激光在介质中的折射率。所以整个 $\Delta\lambda$ 波段在 z 点处的叠加光强为

$$\begin{aligned} I &= \int dI = \bar{I}_0 \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} \cos^2(m - k)\pi d\lambda_i \\ &= \bar{I}_0 \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} \cos^2(1/\lambda - \lambda_i - \lambda/\lambda^2)\Delta(z)\pi d\lambda_i \\ &= I_0 \left[1 + \frac{\sin(\pi\Delta\lambda\Delta(z)/\lambda^2)}{\pi\Delta\lambda\Delta(z)/\lambda^2} \cos \frac{2\pi\Delta(z)}{\lambda} \right], \end{aligned}$$

由此式可得强度条纹对比度的表达式为

$$\gamma = \left| \frac{\sin(\pi\Delta\lambda\Delta(z)/\lambda^2)}{\pi\Delta\lambda\Delta(z)/\lambda^2} \right|.$$

如图 1 所示为叠加光场强度条纹对比度 γ 随传播距离 z 的变化关系,由图中曲线可见,随着传播距离的增大,宽线宽激光叠加光场强度条纹对比度相对于窄线宽激光来说下降得更为迅速。

从机理上看,窄线宽激光或近单色激光具有很长的相干长度,在 SBS 介质中传播时色散小,光子群始终能保持很高的步调一致性,产生的声子光栅密度较大,且随传播距离的变化小。而宽线宽激光的不同频率成分在介质中传播时具有不同的相速,因而色散大,在介质中传播时,相干叠加所产生的声子光栅密度随传播距离迅速变小。因此,宽线宽

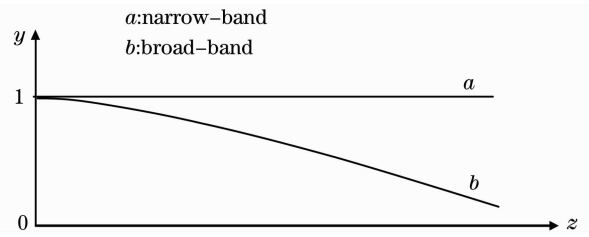


图 1 叠加光场强度条纹对比度随传播距离的变化
Fig. 1 Relationship between intensity fringe contrast and propagating distance

Cr:LiSAF 激光的 SBS 能量阈值远高于窄线宽 Nd:YAG 激光。这也是导致宽线宽 Cr:LiSAF 激光 SBS 相位共轭谐振腔的启动阈值远高于窄线宽 Nd:YAG 激光的原因。

3 实验结果与讨论

为了研究宽线宽 Cr:LiSAF 激光 SBS 相位共轭谐振腔的工作特性,首先构建了如图 2 所示的宽线宽 SBS 相位共轭谐振腔,全反镜 M_1 和部分透射的输出耦合镜 M_2 构成起始腔,腔长为 L_0 ,为了提高起始腔中的激光能量密度,已将 M_2 的透射率减小为 10%,即其反射率高达 90%。F 为 50 mm 焦距的聚焦透镜,为了降低腔内损耗,透镜和 SBS 池的窗片皆镀有双面增透膜。Cr:LiSAF 激光棒长约 70 mm、口径约 6 mm,氙灯抽运。实验中选用了 CCL_4 作为 SBS 介质。与文献^[12~14]中报道的 XeCl、Ti:sapphire 等宽线宽相位共轭激光谐振腔相比,该宽线宽 Cr:LiSAF 相位共轭谐振腔具有结构简单特点。

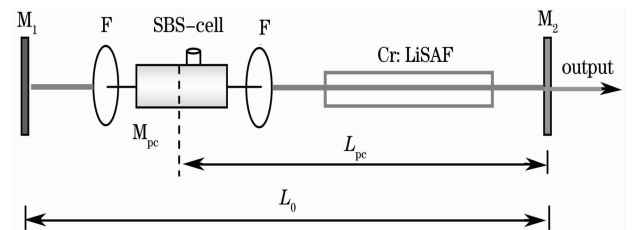


图 2 宽线宽 Cr:LiSAF 激光 SBS 相位共轭激光器示意图

Fig. 2 Schematics of Cr:LiSAF broad-band SBS phase-conjugation laser

当起始腔中的自由运转激光能量还未达到共轭腔的启动阈值时,只能输出静态激光脉冲。 CCL_4 作 SBS 介质时,自由运转静态激光脉冲的总体波形如图 3(a),它由许多尖峰脉冲组成,总脉宽约 20 μs ,随着氙灯抽运能量的增大,尖峰脉冲会更多;其局部波形展开细节如图 3(b),可见尖峰脉冲半峰全宽

(FWHM)约 300~500 ns。

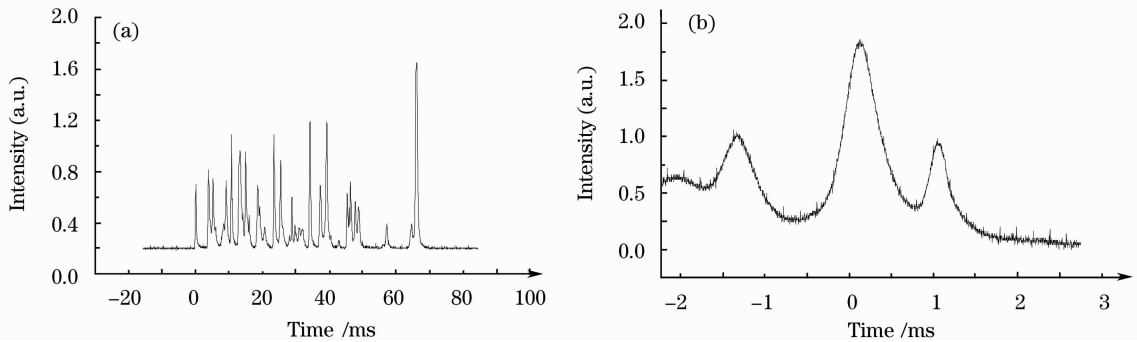


图 3 SBS 池中装有 CC14 介质时,起始腔输出的自由运转激光波形(a)总体波形;(b)局部波形细节

Fig. 3 Free-running laser waveform of startig resonator with CC14 SBS-cell (a)full waveform;(b)partial waveform in detail

当起始腔中自由运转静态激光能量达到共轭腔启动阈值时,SBS 池中形成相位共轭镜 M_{PC} , M_{PC} 取代 M_1 同 M_2 构成相位共轭谐振腔,腔长为 L_{PC} 。激光在起始腔 L_0 中往返一周所经受的损耗包括路程上的所有光学元件的吸收、散射、衍射及耦合输出等的总和,记作 ϵ_0 ;而当 SBS 相位共轭谐振腔 L_{PC} 形成之后,激光仅在共轭镜 M_{PC} 与输出耦合镜 M_2 之间往返,其往返一周所经受的总损耗 ϵ_{PC} 将大大低于 ϵ_0 ,因此在从起始腔谐振转变为相位共轭腔谐振的瞬间过程中, Q 值发生了由低而高的突变,实现自

调 Q 过程输出激光窄脉冲。SBS 相位共轭谐振腔的自调 Q 是一种非线性光学过程,不同于通常的主动电光、声光调 Q ,也不同于饱和吸收体被动调 Q 机理,但它们在导致谐振腔 Q 值由低向高突变的结果上是一致的,即都能实现谐振腔的调 Q 功能。如图 4 所示。共轭腔的输出脉冲仅有一个,从其波形展开图(b)可看出,脉冲宽度(FWHM)约为 50 ns,即实现了相位共轭腔的自调 Q 输出。此时氙灯抽运电压为 900 V 左右。

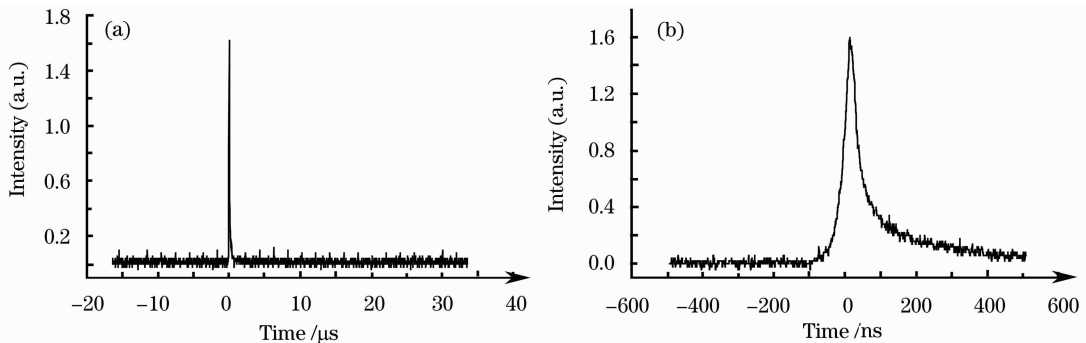


图 4 SBS 池中装有 CC14 介质时,相位共轭腔输出的自调 Q 激光小型(a)总体波形;(b)波形展开细节

Fig. 4 Self-Q-switching laser waveform of CC14 SBS phase-conjugation resonator (a)full waveform;(b)waveform in detail

大多数情况下,相位共轭腔的启动都需要借助起始腔中自由振荡的静态激光,只有静态激光强度达到 SBS 阈值时,才能启动相位共轭腔。众所周知,在固体激光系统中,普遍存在驰豫振荡效应,使自由振荡激光包括大量强弱不同的静态脉冲尖峰,每个尖峰脉冲的脉宽约有几百纳秒,它们按先后排成序列,且尖峰脉冲之间的时间间隔相当随机,如图 3 所示。这样的脉冲序列被聚焦到腔内的介质池里,在氙灯抽运能量很大的时候,静态脉冲序列中肯定会有多个脉冲的强度已达到或超过共轭腔的启动阈值,相应地应能产生多个共轭光脉冲,并在共轭腔内被谐振放大。按这种推理,此时的相位共轭腔应

该能输出一个调 Q 窄脉冲序列,但实际实验中基本上只能输出一个调 Q 窄脉冲。究其原因,合理的推测应该是相位共轭腔的自调 Q 过程具有一定的选择放大特性。在起始腔静态激光脉冲序列中,只有最先达到共轭腔启动阈值的尖峰脉冲所激发产生的相位共轭窄脉冲,才能在共轭腔中被优先放大,并输出强的调 Q 窄脉冲,此放大过程消耗了激光工作介质中的大部分储能,使后继静态尖峰脉冲产生的共轭脉冲得不到有效放大,最终因损耗大于增益而衰竭消失。相位共轭腔的这种选择放大特性是一种竞争过程,它是产生单个相位共轭调 Q 窄脉冲的原因所在。在激光工作介质储能很高(比如实验中氙灯抽运电

压超过 1200 V 时)、共轭腔损耗较小或形成的相位共轭镜反射率较高的情况下,共轭腔有可能输出一个以上的自调 Q 窄脉冲,每个窄脉冲的脉宽相差不大,实验中有时会遇到这种情况,但次数不多。

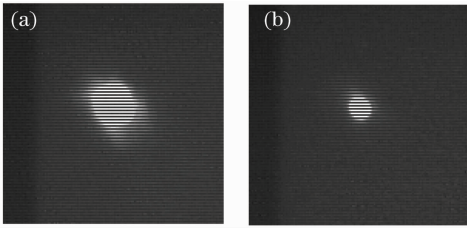


图 5 激光远场光斑照片(a)起始腔自由运转静态激光;(b)SBS 相位共轭腔自调 Q 动态激光

Fig. 5 Photograph of laser far-field spot (a) starting resonator free-running; (b) SBS phase-conjugation resonator self-Q-switching

分别将起始腔自由运转静态激光与共轭腔自调 Q 动态激光照射到距输出耦合镜 M_2 约 2.5 m 远的白纸屏上,在相同激光功率的条件下用 CCD 摄取它们的远场光斑照片,如图 5(a)、(b)所示。实验中,用肉眼观察白纸屏时,可看到较大的静态光斑呈暗橘红色,但看不清共轭腔调 Q 光斑,可能因为调 Q 光斑较明亮,与白纸屏颜色相近。借助 CCD 照片,对静态激光和自调 Q 激光的光束发散角进行了相对地测算,后者的光束发散角(2.2 mrad)比前者(4.3 mrad)小了近两倍。表明此型 Cr:LiSAF 激光 SBS 相位共轭腔不仅能输出窄脉宽自调 Q 动态激光,而且可有效地减小光束发散角,改善光束质量。如图 6 是测得的这种 SBS 相位共轭激光器的输出能量与氙灯抽运电压之间的关系,该 SBS 相位共轭谐振腔启动阈值较高,耦合输出能量也比较低,且不稳定,有待进一步优化调整。另外,由于 Cr:LiSAF 固体激光具有宽线宽的光谱输出特性,其相位共轭

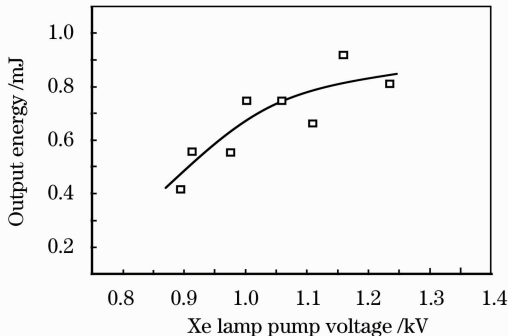


图 6 SBS 相位共轭激光器的输出能量与氙灯抽运电压的关系

Fig. 6 Relationship between output energy of SBS phase-conjugation laser and pump voltage of Xe-lamp

激光器的光谱特性,以及其光谱特性相位于普通激光器的变化情况,还需要进一步测量。

4 结 论

由于自由运转的 Cr:LiSAF 激光器是宽线宽的,与 Nd:YAG 等窄线宽激光器相比,其相位共轭谐振腔的启动阈值相对较高。为此采取了降低谐振腔输出耦合率等措施,初步实现了宽线宽 Cr:LiSAF 激光相位共轭腔的运行,对其输出波形、输出能量、光束发散角等输出特性参数进行了实验观测,结果表明这种宽线宽相位共轭谐振腔能有效地产生低发散角的自调 Q 窄脉冲激光束,脉冲宽度约为 50 ns,光束发散角比自由运转静态激光束压缩了近两倍,其输出能量及稳定性有待提高。由于激光聚焦到受激布里渊散射(SBS)介质中所产生的声子光栅的密度对比度对应于叠加光场的强度对比度,据此直观分析了宽线宽激光 SBS 能量阈值高于窄线宽激光 SBS 的原因,并对宽线宽 SBS 相位共轭谐振腔的高启动阈值进行了定性理解。

致谢 部分实验在中科院安徽光学精密机械研究所完成,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- Xu Yao, Tao Shiping, Kong Yufei *et al.*. Investigation of high efficiency Cr³⁺:LiSrAlF₆ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(4): 289~292
徐 瑶, 陶世平, 孔羽飞 等. 高效率 Cr³⁺:LiSrAlF₆ 激光器的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(4): 289~292
- Wang Dongmei, Ni Wengjun, Xia Runyu *et al.*. Flashlamp pumped Cr:LiSAF laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(3): 209~210
王冬梅, 倪文俊, 夏润雨 等. 闪光灯抽运的 Cr:LiSAF 激光器[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(3): 209~210
- H. H. Zenzie, Isyanova Y. High-energy, high-efficiency harmonic generation from a Cr:LiSrAlF₆ laser system[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(2): 169~171
- M. Ostermeyer, H. J. Kong, V. I. Kovalev *et al.*. Trends in stimulated Brillouin scattering and optical phase conjugation[J]. *Laser and Particle Beams*, 2008, **26**:1~66
- Hidetsugu Yoshida, Hisanori Fujita, Masahiro Nakatsuka *et al.*. Fused-quartz glass with low optical quality as a high damage-resistant stimulated Brillouin-scattering phase-conjugation mirror [J]. *Opt. Commu.*, 2003, **222**: 257~267
- A. Mark, Dubinskii, Larry D. Merkle. Ultrahigh-gain bulk solid-state stimulated Brillouin scattering phase-conjugation material[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(9): 992~994
- Ge Chuanwen, Zhang Weijun, Chen Changshui *et al.*. Experimental investigation of broadband laser's SBS based on frequency-band-dispersing Method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1454~1457
葛传文, 张为俊, 陈长水 等. 频带色散法改善宽线宽激光受激布里渊散射效果的实验研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12):

1454~1457

8 M. Ostermeyer, A. Heuer, R. Menzel. 27-W average output power with 1.2 * DL beam quality from a single-rod Nd:YAG laser with phase-conjugating SBS mirror[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(2): 372~377

9 H. J. Eichler, R. Menzel, D. Schumann. 10-W single-rod Nd:YAG laser with stimulated brillouin scattering Q-switching mirror [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(24): 5038~5043

10 Qu Jun, Zhang Weijun, Gao Xiaoming *et al.*. The investigation of improving beams mode quality compound YAG phase-conjugate resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1663~1666
屈 军, 张为俊, 高晓明 等. YAG 复合型相位共轭腔对改善光束模式的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1663~1666

11 Ge Chuanwen, Zhang Weijun, Gao Xiaoming. Self-Q-switching mechanism of SBS phase-conjugation laser resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9): 788~790

葛传文, 张为俊, 高晓明. 受激布里渊散射相位共轭激光器自调 Q 机理的探讨[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 788~790

12 M. R. Perrone, Y. B. Yao. Phase conjugated XeCl laser resonator[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(14):1052~1054

13 D. Berger, H. J. Eichler, S. Baudach *et al.*. Beam quality of self starting SBS resonators for excimer lasers [J]. *SPIE*, 1998, **3267**: 287~294

14 A. Minassian, G. J. Crofts, M. J. Damzen. Self-starting Ti:sapphire holographic laser oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10): 697~699

15 Ge chuanwen, Zhang weijun, Gao xiaoming. Illustrated description of narrow-band and broad-band stimulated brillouin scattering process [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 701~704
葛传文, 张为俊, 高晓明. 窄线宽与宽线宽受激布里渊散射过程的图示化描述[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 701~704



为了进一步提高我国光学期刊的学术水平和论文质量,吸引和催生优秀稿件,鼓励和培育优秀作者,促进我国光学、激光科技事业发展,《光学学报》《中国激光》《中国光学快报》(英文版)特发起“光学期刊优秀论文评选活动”。在光学泰斗王大珩先生的支持下,本活动特命名为光学前沿——“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动。

光学前沿——首届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选结果在中国光学学会 2008 年学术年会上隆重公布。中国光学学会秘书长倪国强宣读了入选论文名单,中国光学学会理事长周炳琨院士、副理事长徐至展院士等为上海光机所周军等入选论文的作者代表颁发了证书和奖金。

根据“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动评选办法,光学前沿——第二届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动即将开始,欢迎广大作者提交论文信息,参与评选。评选规则请参考“大珩杯”光学期刊优秀论文评选办法。

编辑部将在 2009 年年底,对获奖作者进行表彰,并颁发证书和奖金。

主办单位:中国科学院上海光学精密机械研究所

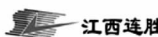
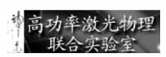
联合主办单位:相干(北京)商业有限公司

上海瀚宇光纤通讯技术有限公司

协办单位:高功率激光物理联合实验室

江西连胜实验装备有限公司

普爱纳米位移技术有限公司



时间安排:参评论文统计截止时间:2009 年 8 月 30 日。

论文作者提交申请材料时间:2009 年 7 月 1 日~9 月 30 日(论文被引的材料和论文所在项目或课题获奖的证明),请在中国光学期刊网上提交。

审核时间:2009 年 10 月 8 日~10 月 30 日。

详情请浏览:<http://www.opticsjournal.net/Daheng.htm>

咨询电话:021-69918426 段家喜 编辑 duanjiaxi@siom.ac.cn