

文章编号: 0258-7025(2010)07-1683-05

激光二极管抽运连续三波长固体激光器

高缓缓 高兰兰 刘宏博 郝怀庆

(长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022)

摘要 报道了利用激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YVO₄+KTP 胶合晶体得到波长分别为 532, 537 和 542 nm 激光输出的实验研究。通过调节晶体的角度, 发现在 KTP 晶体中 1064 nm 倍频, 1064 与 1084 nm 和频, 以及 1084 nm 倍频 3 个非线性频率转换过程同时存在。从非线性频率转换效率对基频光振荡的影响角度出发, 讨论了 1064 nm 和 1084 nm 双波长振荡的条件, 分析了激光器在不同抽运功率条件下 3 个输出波长功率变化的原因。

关键词 激光器; 全固态激光器; 三波长; 胶合晶体; 和频

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1683

Laser Diode Pumped Continuous Wave Three-Wavelength Laser

Gao Huanhuan Gao Lanlan Liu Hongbo Hao Huaiqing

(College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract A laser diode (LD) end-pumped optical-contact composites Nd:YVO₄ + KTP three-wavelength laser is reported. The output laser wavelengths are 532, 537 and 542 nm respectively. By adjusting the angle of the crystal, 1064 nm doubling frequency, 1064 and 1084 nm sum-frequency and 1084 nm doubling frequency coexist in KTP crystal. From the impact of nonlinear conversion efficiency on fundamental oscillation, the condition of 1064 nm and 1084 nm dual-wavelength oscillation was discussed and the reasons of three wavelengths power changing with pump power were studied.

Key words lasers; all solid-state laser; three-wavelength; optical-contact composites; sum-frequency

1 引 言

多波长激光器在激光测距、非线性光学混频、精密激光光谱等方面有重要的应用价值。一种是通过控制输出耦合镜对不同波长的透射率, 使具有多个波长跃迁谱线的激光晶体获得多波长振荡输出^[1,2], 这种方法得到的波长在红外波段。还有一种方法是受激拉曼频移, 这种方法必须采用峰值功率高的脉冲激光器^[3,4]。2006 年 Z. Zhang 等^[5]报道了利用 Nd:YVO₄ 的 1084 nm 谱线, 用 BIBO 晶体倍频得到了 542 nm 激光输出的实验研究。Nd:YVO₄+KTP 胶合晶体是激光晶体(Nd:YVO₄)和非线性倍频晶体 KTP 通过紫外胶胶合或光胶形式制成的晶体组件, 在中小功率固体激光器中应用非常普遍。采用胶合晶体在激光器生产的过程中结构简单紧凑, 性能稳定可靠, 降低了调试激光器的难

度。Nd:YVO₄ 是一种性能优良的激光晶体, 有 914, 1064, 1342 nm 3 条主要的发射谱线^[6], 分别对应⁴F_{3/2}→⁴I_{9/2}, ⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2}, ⁴F_{3/2}→⁴I_{13/2} 的跃迁。实际上, 仅在⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2} 跃迁内就有近 10 条发射谱线^[7]。在 1064 nm 发射谱线旁边有一条谱线 1084 nm, 1084 nm 是 σ 偏振发射, 由于二者距离非常近, 并且 1084 nm 谱线的受激发射截面大约是 1064 nm 的 1/10, 如果产生 1084 nm 单一谱线振荡, 对镀膜技术的要求非常高, 故 1084 nm 谱线跃迁虽然存在, 但基于这一波长的激光振荡的报道很少。

KTP 晶体作为典型的非线性光学晶体, 光学性能优良, 除了有大的有效非线性系数外, 还有大的允许角、大的允许温度等优点^[8,9], 而且不潮解, 价格也相对便宜, 因此对于小功率激光器, 采用 Nd:YVO₄+KTP 组合是目前最常用的胶合晶体方式。

收稿日期: 2009-07-03; 收到修改稿日期: 2009-09-14

作者简介: 高缓缓(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事全固态激光技术及非线性频率变换技术方面的研究。

E-mail: hhgao2007@163.com

导师简介: 高兰兰(1974—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事非线性光学和全固态激光器的研究。E-mail: gll_75@163.com

以 KTP 晶体为和频晶体也有一些研究报道^[10,11]。本文利用 Nd:YVO₄+KTP 胶合晶体得到了波长分别为 532,537 和 542 nm 的激光输出。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,激光二极管(LD)作为抽运源,最大输出功率为 1 W,抽运光经过透镜聚焦后直接注入到胶合晶体上。胶合晶体是将尺寸为 1 mm×1.5 mm×0.5 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体(掺杂原子数分数为 2.0%)和尺寸为 1 mm×1.5 mm×2 mm 的 KTP 晶体直接粘合在一起,在胶合晶体的入射面镀 808 nm 增透膜($T>90\%$),1064~1084 nm 高反膜($R>99.8\%$)和 532~542 nm 高反膜($R>99\%$),出射面镀 1064~1084 nm 高反膜($R>99.8\%$)和 532~542 nm 增透膜($T>95\%$)。LD 用半导体制冷器(TEC)控温,确保激光器稳定运行。

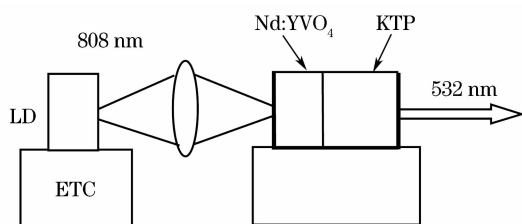


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

3 实验结果与讨论

3.1 实验结果

调节抽运光在胶合晶体上的注入角度,在某一角度固定放置得到如图 2,3 所示的实验结果。图 2 是用海洋光学公司 HR4000CG-UV-NIR 光谱仪测得的基频光的发射谱线,由图 2 可看出激光器有 2 条谱线起振,波长分别为 1069 和 1089 nm,比实际的波长值(1064 和 1084 nm)向长波方向漂移了 5 nm。这个误差主要是光谱仪器的测量误差造成的。光谱仪的测量范围为 200~1100 nm,而最佳效率测量波长范围为 200~1050 nm,所以在大于 1050 nm 处可能存在 5 nm 的漂移。为证实此漂移的确存在,用该光谱仪对一台 1064 nm 红外脉冲激光器的输出波长进行了测试,测试结果如图 4 所示。峰值波长在 1069 nm,与实际波长 1064 nm 相差 5 nm,与双波长振荡的测试结果的误差相符,即均向长波方向漂移了 5 nm。因此实验中谐振腔内振荡的双波长确实为 1064 和 1084 nm。

图 3 是用同一个光谱仪测得的在抽运功率为

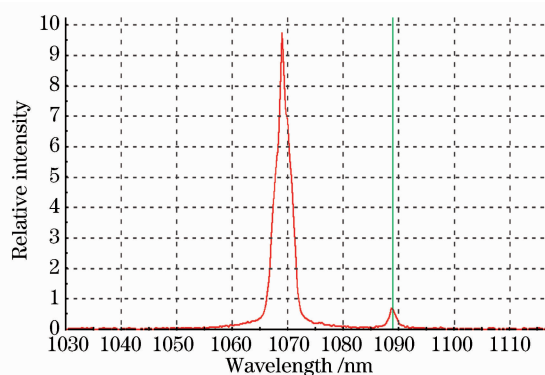


图 2 基频光的发射谱线

Fig. 2 Emission spectrum of fundamental frequency

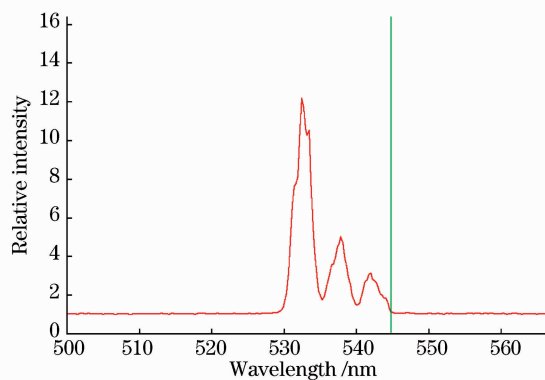


图 3 二次谐波的输出光谱图

Fig. 3 Spectrum of the second harmonic

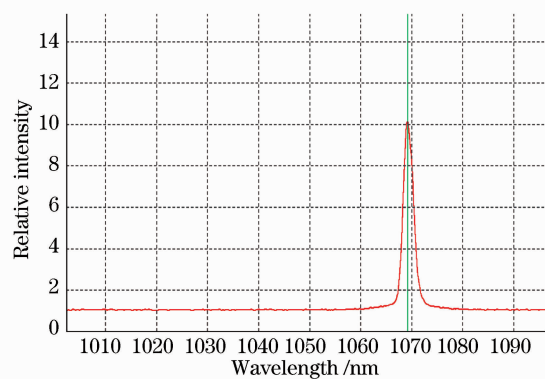


图 4 1064 nm 脉冲激光器的输出谱线

Fig. 4 Spectrum of 1064 nm pulsed laser

300 mW 时二次谐波的输出光谱曲线。从图 3 可以看出,输出激光束中有 3 条谱线:532,537 和 542 nm,分别对应于 1064 nm 倍频,1064 和 1084 nm 和频,以及 1084 nm 倍频 3 个非线性频率转换过程。实验中,当 LD 抽运功率为 190 mW 时,得到 532 nm 激光输出。增大抽运光功率,537 和 542 nm 的激光相继出现。转动胶合晶体,3 个波长的输出功率会随着变化。抽运功率为 320 mW 时得到二次谐波的输出光功率为 18 mW。继续增加抽运功率,输出光

斑变为多横模输出, 光束质量变差。多横模的原因是实验用的胶合晶体是厂家提供用于最大输出功率为 30 mW 的绿光模块, 能承载的最大抽运功率为 300 mW。抽运功率增大使增益介质中的热沉积增多, 而增益介质与倍频晶体的导热系数不同, 所以胶合晶体的胶合面发生分离或变形, 使谐振腔的结构发生变化; 该实验中采用的胶合晶体构成的是平平谐振腔, 对谐振腔结构变型非常敏感, 因此很容易出现多横模。

3.2 理论分析

1064 nm 的受激发射截面为 1084 nm 的 10 倍, 若 1064 和 1084 nm 两条谱线同时都起振, 则需采取一些方法使两条激光谱线具有相同的增益, 即激光器在 1064 和 1084 nm 处有相同的阈值^[12], 一种方法是通过设计输出耦合镜对 1064 和 1084 nm 具有不同的反射率来实现。但本实验中的输出耦合镜是对 1064~1084 nm 高反膜(99%), 而激光器在此情况下实现了双波长同时起振, 从二次谐波的非线性转化过程考虑双波长起振的原因。

图 5 是利用 SNLO 计算软件得到的 1064 nm 倍频(SHG), 1064 与 1084 nm 和频(SFM), 以及 1084 nm 倍频 3 个非线性转换过程对应的最佳相位匹配方向, 分别用 x_1 , x_2 和 x_3 3 个向量表示。其对应的参数如表 1 所示。从表 1 和图 5 可以看出, x_1 , x_2 和 x_3 不在同一个平面, 但都分布在 x 轴附近。如果设基频光入射方向在 $\varphi=23.5^\circ$ 面上, 此时上述 3 个非线性转换过程对应的相位匹配方向及有效非线性系数如表 2 所示。

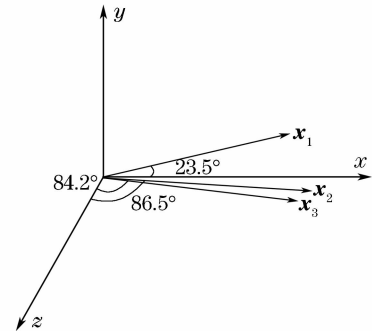


图 5 KTP 晶体实现 3 种非线性转换过程的相位匹配角
Fig. 5 Phase matching angle of KTP for the three nonlinear conversions

表 1 KTP 晶体非线性变换时的相位匹配参数

Table 1 Phase matching parameters for KTP crystal

Plane	SFM/SHG	Phase matching angle (θ, φ)	$d_{\text{eff}}/(\text{pm}/\text{V})$	Mix accept angle $/(\text{mrad} \cdot \text{cm})$
xy	1064 nm(o)+1064 nm(e)=532 nm(e)	$(90^\circ, 23.5^\circ)$	3.58	$\Delta\theta \cdot l=62.63, \Delta\varphi \cdot l=14.08$
zx	1064 nm(e)+1084 nm(o)=537 nm(o)	$(86.5^\circ, 0^\circ)$	3.88	$\Delta\theta \cdot l=9.21$
zx	1084 nm(o)+1084 nm(e)=542 nm(o)	$(84.2^\circ, 0^\circ)$	3.86	$\Delta\theta \cdot l=5.67$

表 2 KTP 晶体在 $\varphi=23.5^\circ$ 面上非线性变换时的相位匹配参数

Table 2 Phase matching parameters at $\varphi=23.5^\circ$ plane for KTP crystal

SFM/SHG	Phase matching angle (θ, φ)	$d_{\text{eff}}/(\text{pm}/\text{V})$	Mix accept angle $/(\text{mrad} \cdot \text{cm})$
1064 nm(o)+1064 nm(e)=532 nm(e)	$(90^\circ, 23.5^\circ)$	3.58	$\Delta\theta \cdot l=62.63$
1064 nm(e)+1084 nm(o)=537 nm(o)	$(80^\circ, 23.5^\circ)$	3.509	—
1084 nm(o)+1084 nm(e)=542 nm(o)	$(81^\circ, 23.5^\circ)$	3.532	—

从表 2 可以看出, 在 $\varphi=23.5^\circ$ 面上, 1084 nm 倍频($\theta=81^\circ$)和 1084 与 1064 nm 和频($\theta=80^\circ$)的相位匹配角非常接近, 只相差 1° , 而且有效非线性系数相差很小。虽然 1064 nm 倍频的匹配方向与 1064 和 1084 nm 和频的匹配方向相差 10° , 但是 KTP 晶体的 θ 允许角很大, 对 2 mm 的 KTP 晶体 θ 允许角为 17.9° ($\Delta\theta=62.63/0.2 \text{ mrad}$), 已经涵盖了 1084 nm 倍频和 1084 与 1064 nm 和频的相位匹配方向。即如果基频光沿 ($\theta=80^\circ, \varphi=23.5^\circ$) 入射, 则 3 种非线性频率转换过程都可能存在, 但是因为相位失配 1064 nm 倍频及 1084 nm 倍频的转换效率降低。根据相位匹配和倍频转换效率公式^[12]

$$\eta \propto \left[\frac{\sin\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)}{\frac{\Delta k l}{2}} \right]^2, \quad (1)$$

$$\Delta k = \Delta k \Big|_{\theta=\theta_m} + \frac{\partial \Delta k}{\partial \theta} \Big|_{(\theta=\theta_m, \varphi=\varphi_m)} \Delta\theta + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Delta k}{\partial \theta^2} \Big|_{(\theta=\theta_m, \varphi=\varphi_m)} (\Delta\theta)^2 + \dots \quad (2)$$

设基频光以 ($\theta=80^\circ, \varphi=23.5^\circ$) 入射, 得到对于 2 mm 厚的 KTP 晶体, 此时 1064 nm 倍频相位因子的平方值为 76%, 1064 nm 的倍频转换效率降低。此时如果谐振腔内有 1084 nm 光子起振, 则 1084 nm 倍频及 1084 与 1064 nm 和频的非线性转化过程就

可能存在。实验中采用的胶合晶体谐振腔长短,为 2.5 mm,损耗小,阈值低,有利于 1084 nm 光子起振。1064 nm 倍频转换效率降低,容易达到增益饱和,一部分反转粒子数就会被属于同一组跃迁能级的 1084 nm 利用达到振荡阈值,产生振荡。至于 1074 nm 光子没有起振,可能是 1074 和 1064 nm 都是 π 偏振,1084 nm 是 σ 偏振,同一个偏振方向的 1064 nm 会对 1074 nm 有抑制。

图 6 是输出光束为基横模时经过光栅常数为 $1.1 \mu\text{m}$ 的光栅分光后在接收板上拍摄的光斑分布图,从左到右依次为 542, 537 和 532 nm 激光。

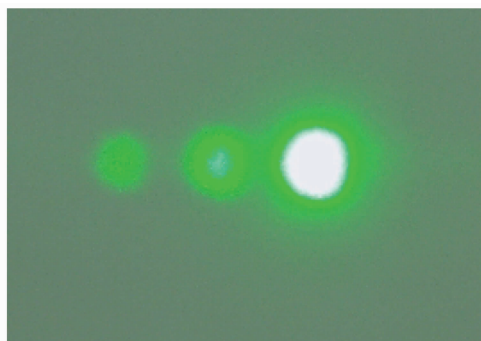


图 6 542, 537 和 532 nm 光斑图片

Fig. 6 Light beam for 542, 537 and 532 nm

实验中,观察光栅分光后倍频光及和频光的功率变化,发现每个波长的功率会随着抽运功率的增大出现起伏,这是 1064 和 1084 nm 两条谱线相互竞争的结果。1064 与 1084 nm 谱线跃迁都属于 $F_{3/2} \rightarrow I_{11/2}$, 而且 1064 nm 的受激发射截面是 1084 nm 的 10 倍,因此,在 LD 抽运功率较低时,1064 nm 基频光首先起振,经过 KTP 倍频得到 532 nm 倍频光。随着抽运功率的增大,532 nm 功率逐渐增强,但是由于 KTP 晶体不是放置在 1064 nm 倍频的最佳相位匹配角上,受到倍频效率的限制,1064 nm 的增益很快达到饱和,而多余的反转粒子数被 1084 nm 基频光利用,1084 nm 基频光起振。同时,由于 KTP 晶体的放置角度几乎可以同时满足 1084 nm 倍频和 1084 与 1064 nm 和频的最佳相位匹配,因此当 1084 nm 起振后,经过 KTP 的倍频及和频得到了 542 和 537 nm 激光输出。随着 1084 nm 倍频及 1084 与 1064 nm 的和频对 1084 nm 光子的逐渐消耗,促使 1084 nm 粒子不断振荡,而属于同一跃迁能级的 1064 nm 振荡则会减弱,所以 537, 542 nm 激光的功率不断升高而 532 nm 功率有所下降。随着抽运功率的继续增加,1084 nm 振荡逐渐达到增益饱和,这又促使了 1064 nm 增益的加强,1064 nm 光子数增加,所以

532 nm 功率开始升高,而 542 和 537 nm 功率开始下降。当 1064 nm 再度达到增益饱和,532 nm 激光功率达到高峰,1084 nm 的增益又会增加,537 和 542 nm 又会逐渐增加,这样的循环竞争使 1064 和 1084 nm 交替出现增益饱和,进而使 3 个二次谐波的输出功率出现起伏。542 nm 的输出功率在测试范围内一直比较小,主要是因为基频光 1084 nm 的功率受激发射截面的影响一直比较低,倍频效率与基频光功率的平方成正比,因此 1084 nm 倍频的转化效率很低。图 7 是 3 个二次谐波的输出功率随抽运功率的变化曲线。

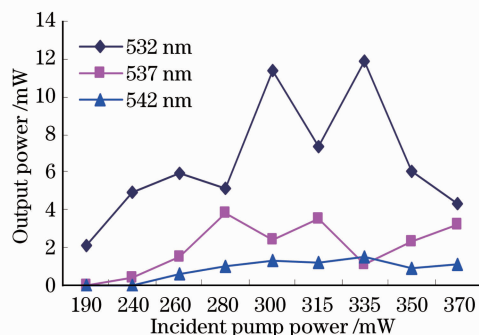


图 7 532, 537 和 542 nm 激光输出功率随 LD 抽运功率的变化

Fig. 7 532, 537 and 542 nm output power via LD pumped power

4 结 论

研究和分析了用激光二极管抽运 $\text{Nd}:\text{YVO}_4 + \text{KTP}$ 胶合晶体得到了 532, 537 和 542 nm 3 个波长激光输出的实验。实验结果表明,对于波长接近的谱线,通过改变非线性转换效率也可以得到双波长振荡,从而使多个非线性频率转换过程同时存在,激光器得到多波长输出。

参 考 文 献

- Zhang Qiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi *et al.*. High power laser diode pumped $\text{Nd}:\text{YAG}$ continuous wave dual-wavelength laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):577~581
张强,姚建铨,温伍麒等. 高功率激光二极管抽运 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 连续双波长激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):577~581
- Y.-F. Chen. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(4):475~478
- Hu Dawei, Wang Zhengping, Zhang Huaijin *et al.*. Stimulated Raman scattering of GdVO_4 crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1):11~16
胡大伟,王正平,张怀金等. GdVO_4 晶体的受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1):11~16
- Jia Peng, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*. Laser diode-pumped $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ self-stimulated Raman laser [J]. *Chinese J.*

- Lasers*, 2006, **33**(10):1309~1313
贾鹏,张行愚,王青圃等. 激光二极管抽运的自拉曼 Nd:YVO₄激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(10):1309~1313
- 5 Z. Zhang, H. M. Tan, L. L. Gao *et al.*. Intra-cavity second harmonic generation with Nd:YVO₄/BIBO laser at 542 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **267**(2): 487~490
- 6 Bu Yikun, Chen Yingxin, Zheng Quan *et al.*. LD pumped Nd:YVO₄ crystal LBO frequency doubling 457 nm blue laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):336~339
卜铁坤,陈颖新,郑权等. LD泵浦 Nd:YVO₄晶体 LBO倍频 457 nm 蓝色激光器[J]. 光子学报, 2005, **34**(3):336~339
- 7 R. D. Peterson, H. P. Jentsen, A. Cassanho. Investigation of the spectroscopic properties of Nd:YVO₄[C]. *Opt. Soc. Am. Canada*, 2002, **68**:294~298
- 8 Shen Dezhong, Chen Jianrong. Research progress and market outlook on KTP crystal and the device [J]. *Advanced Materials Industry*, 2007, (10):66~71
沈德忠,陈健荣. KTP晶体与器件的研究进展及市场展望[J]. 新材料产业, 2007, (10):66~71
- 9 Huang Lingxiong, Huo Hande, Zhang Ge. Growth and optical character of KTP crystals by hydrothermal method [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2007, **36**(2):256~259
黄凌雄,霍汉德,张戈. KTP晶体的水热法生长及其光学性能测量[J]. 人工晶体学报, 2007, **36**(2):256~259
- 10 Richard A. Stolzenberger, Chia Chen Hsu, N. Peyghambarian *et al.*. Type II sum frequency generation in flux and hydronthermally grown KTP at 1.319 and 1.338 μm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, **1**(12):446~448
- 11 Lü Yanfei, Tan Huiming, Ren Xusheng *et al.*. KTP type II critical phase matched intracavity sum frequency mixing 593.5 nm laser [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(2):3~4
吕彦飞,檀慧明,任旭升等. KTP II类临界相位匹配腔内和频 593.5 nm激光器[J]. 激光杂志, 2005, **26**(2):3~4
- 12 Yao Jianquan, Xu Degang. All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology [M]. Beijing: Science Press, 2007. 300~700
姚建铨,徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 300~700

2010 年度“大珩杯”中国光学期刊优秀论文奖评选

为了提高中国光学期刊的学术水平和质量,吸引和催生优秀稿件,鼓励和培育优秀作者,促进中国光学科技事业发展,在中国杰出的战略科学家、中国近代光学与光学工程的奠基人与组织领导者、中国光学学会的创始人王大珩先生的支持下,中国光学学会决定组织学会主办的 10 种期刊并邀请中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)所有入网期刊参加 2010 年度“大珩杯”中国光学期刊优秀论文奖评选活动。

从发表在《光学学报》、《中国激光》等共计 39 种期刊(包括增刊)2007,2008,2009 年的学术论文中评选出优秀论文 40 篇(简讯、消息、综述类论文和上一届已经获奖的论文不再参评)。

评选程序及日程

- 1) 论文作者 2010 年 5 月 30 日前提交申请材料(论文被引的材料和论文所在项目或课题获奖的证明);
- 2) 6 月 10 日前各编辑部组织汇总各项统计信息,经评选推荐交中国光学学会,同时提交推荐评选成员名单;
- 3) 6 月 15 日学会公布经遴选组成的评选委员会名单,并开始以网络通信方式组织网络投票评审;
- 4) 7 月 15 日前评选结束,确定初步评选结果,并在中国光学学会网站(www.cncos.org.cn)以及中国光学期刊网站(www.opticsjournal.net)上公示名单;公示期 2 周,接受异议投诉。如无论文抄袭、剽窃等学术不端行为等举报或投诉,论文获奖生效。
- 5) 8 月 10 日在中国光学学会网站、中国光学期刊网和各相关期刊及网站上公布获奖名单。8 月下旬在天津举办的中国光学学会 2010 年学术年会上,举行颁奖仪式。

联系方式

网址: 中国光学学会 <http://www.cncos.org>

中国光学期刊网 <http://www.opticsjournal.net/Daheng.htm>

联系人: 段家喜,庞立

电话: 021-69918426 010-82616604