

文章编号: 0258-7025(2010)04-0944-06

管板式电极结构对大功率横流 CO₂ 激光横模的影响

陈 钢 许周速 程 成

(浙江工业大学激光与光电子技术研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要 为了研究大功率横流 CO₂ 激光器模式的形成原因及改善途径,理论分析了横流 CO₂ 激光器的管板式电极结构。通过数值求解放电区电势的拉普拉斯方程,得到了电势和电场的空间分布。由场强的分布可以定性地认识放电区电子密度、粒子数密度、光子密度的分布情况,从而定性解释了模式形成的原因和光斑能量分布不均匀的特点。计算结果表明,减小电极距离和增大阴极管径都有助于提高光轴附近场强和均匀性,进而可以提高电子密度,从而达到控制、改善光斑模式的作用。在理论分析的基础上,对激光器的电极和光轴等进行了调整,实测得到了明显改善的光斑模式。

关键词 CO₂ 激光器;电场分布;管板式电极;激光模式

中图分类号 TN248.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.0944

Effect of Tube-Plate Electrodes on Laser Transverse Mode of High Power Transverse-Flow CO₂ Laser

Chen Gang Xu Zhousu Cheng Cheng

(*Institute of Laser and Photoelectric Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China*)

Abstract In order to study the formation and improvement of laser modes of high power transverse-flow CO₂ laser, the structure of a tube-plate electrode is analyzed theoretically. A Laplace's equation describing the electric potential in the discharge area is numerically solved, and the spatial distributions of the electric potential and field are obtained. Based on the distributions of electric field, the densities of electron, population and photon can be predicted theoretically. These results can be used to analyze the formation reasons of laser modes, as well as to explain the nonuniform characteristic of the laser spot energy. It is also shown by the calculations that with the decreasing of electrodes space and increasing of the tube diameter, the magnitudes and uniformity of electric field near the optic axis are enhanced greatly. As a result, the electron density will be increased and the laser modes can be controlled and improved. Based on the theoretical analysis, laser beam modes are improved through slightly adjusting of the electrodes and the optic axis.

Key words CO₂ laser; distribution of electric field; tube-plate electrodes; laser mode

1 引 言

直流放电激励的横流 CO₂ 激光器以其结构简单、功率大、效率高而在工业加工中占有一席之地^[1~3],但由于该类型的激光器输出的激光模式比较复杂,以高阶模居多,因此大多用于激光热处理领域^[4,5]。另外激光器在长时间运转后模式会逐渐蜕变,光斑能量分布很不均匀,同时激光功率也会不断下降甚至不能振荡,从而使得激光加工质量不一致

和不稳定。激光模式和功率的蜕变问题已经成为制约我国激光加工技术发展的一个瓶颈,研究并解决它具有重要的现实意义。

有关 CO₂ 激光模式的测量和对激光加工影响的实验和理论研究已有很多报道^[6~9],但对其模式的形成机制缺乏理论分析和相关实验研究,对模式的控制和改善的途径更是缺乏理论分析。尽管有关 CO₂ 激光器的动力学模型的理论研究已经很

收稿日期: 2009-05-22; 收到修改稿日期: 2009-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(60807011)和全国优秀博士论文专项基金(200433)资助课题。

作者简介: 陈 钢(1975—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事气体激光器、纳米材料发光特性等方面的研究。

E-mail: gangchen@zjut.edu.cn

多^[10~12]，但这些研究内容大都以提高激光功率作为研究目标，很少讨论对激光模式的影响和改善方法。对于 CO₂ 激光器的核心——管板式电极结构的研究也有不少报道，但大多以实验探索为主，只能得到少量可以参考的结论，缺乏合适的理论分析。

对于横流大功率 CO₂ 激光器，影响激光模式的因素很多，比如气体成分的改变对模式和功率的影响^[13]、气体温度分布的影响^[14]、阴极位置的选择^[15]等，这些研究内容都从不同角度对模式蜕变和功率下降给出了合理的解释和一定的改善途径。由于气体放电激励的激光器中，能量的来源和分布主要受放电区电场的影响，而这方面却很少有理论分析。因此本文通过分析其放电区的电极结构，计算放电区电势、电场的变化，进而定性地获得电子密度、粒子数密度、光子数密度的空间变化，从而理解光斑模式的形成原因并提出相应的改善途径。

2 实验装置和测量

实验中用到的激光器为 LEO GFT-IVB 型快横流 CO₂ 激光器，最大连续波输出功率 7 kW。谐振腔及电极结构如图 1 所示，电极采用管-板电极结构，阴极为直径 8 mm 的水冷铜管，直接接地，下端面距阳极为 30 mm，阳极由 55 块等间距平板铜块组成，各铜块尺寸为 40 mm×15 mm，间隔 5 mm。气流从阴极平面进入，靠近放电区喉部上方。图 1(b) 为放电区横截面图，建立 x - y 坐标系，气流从 x 方向进入，阳极平板在 x 方向 0~40 mm， y 轴表示阴极高度，光轴位置在平面内的坐标为 (27, 16)。为增大激活体积，采用了前后串接式的放电结构，每个放电区长度均为 1100 mm，整个谐振腔长 2500 mm。激光器的工作气压为 8.0 kPa 或 10.6 kPa，CO₂:N₂:He 的压强比为 1:8:11。

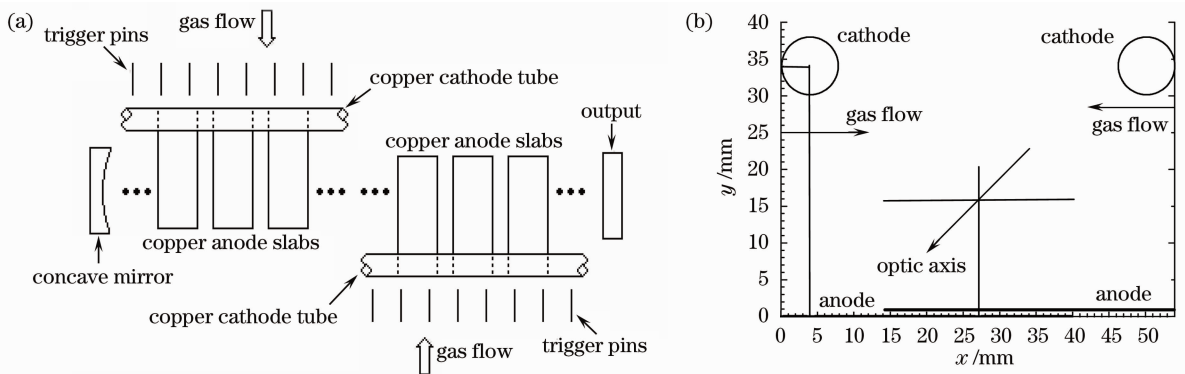


图 1 谐振腔及放电电极示意图。(a) 谐振腔；(b) 放电区横截面

Fig. 1 Scheme of resonant cavity and electrodes. (a) resonant cavity; (b) cross section of the discharge area

激光模式的测量利用美国 Spiricon 公司的大功率激光光束分析仪 (II-VI-CO2-BS-35 型)，分析仪的布置和文献^[7]类似，实验时维持放电电压 2.8 kV，此时激光输出功率约 2000 W，激光横模的测量结果如图 2 所示。在大量模式测量中发现，激光光斑的能量分布均匀性较差，上下两边光强较强，而中间部

分能量非常弱，这样的能量分布很难满足激光加工的要求，即使用于热处理领域，也希望光斑能量分布足够均匀。

3 理论模型

根据麦克斯韦方程，介质中电势满足的偏微分方程为

$$-\nabla^2 U = \rho_e / \epsilon, \quad (1)$$

式中 ρ_e 为自由电荷密度， ϵ 为介电常数。实际激光器中，由于气体的高速流动以及放电过程导致的温度分布，会引起介质的不均匀性，要全部仔细考虑比较困难，本文暂考虑气体介质均匀分布的情况。(1) 式的精确求解需要知道放电区域内各点的电荷密度 ρ_e 的具体分布，对于气体放电形成的等离子体，空间电荷主要是电场电离引起的带正电的离子和带负电的电子。考虑到等离子体宏观电中性的特点，以及弱电

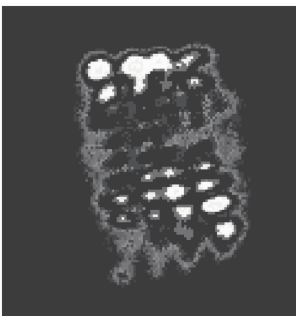


图 2 2000 W 时的光斑模式
Fig. 2 Laser mode at 2000 W

离的等离子体中电子的电势能远小于电场加速的动能,为简化计算,在等离子体均匀分布下暂考虑 $\rho_e = 0$ 的情况。在二维 $x-y$ 坐标系下,(1)式简化为标准的拉普拉斯方程

$$\frac{\partial^2 U(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U(x,y)}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

(2)式的计算需要给出一定的边界条件,即阳极处 $U(x,0) = U_a$,阴极处 $U_c = 0$,在其他边界处采用第二类边界条件,即边界处电势的外法线导数为零。对于具有圆对称的分布,拉普拉斯方程可以给出精确的解析解。但对于一般的非对称分布,多采用数值差分计算,本文对研究的电场区域采取数值差分求解。(2)式经数值求解可得各点电势的分布,利用电场强度和电势的梯度关系,可以得到空间各点 x,y 方向的场强分布。在假定 $\rho_e = 0$ 的情况下给出的电场强度大小可能和实际的场强大小有所偏差,但却能给出电场的空间分布形式。其他文献中经常采用更为简单的假设^[14],即 $E = U/d$,其中 d 为电极间距,用一个均匀的场强来表示空间场强的变化。

4 计算结果

图3是(2)式数值求解后得到的放电平面内各点电势的分布情况,从图3中可以看到,整个放电区内电势从阳极到阴极(沿 y 方向)及各边界处连续下降,且不同区域电势下降的速率不同。在气流入口处($x = 0$ 的平面)电势下降最快,而在气流下游区域电势下降较慢。电势的变化率反映了该区域场强的大小,对整个放电区的电势取其 x,y 方向的导数,就可以得到沿 x,y 方向的场强分布,下面重点讨论放电区场强大小的分布情况。

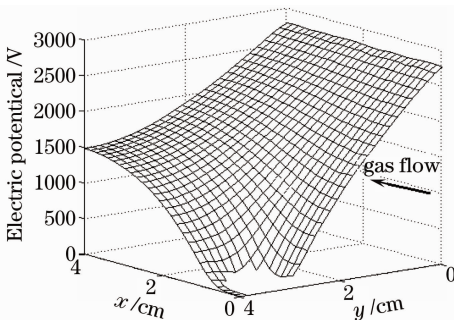


图3 放电区电势分布

Fig. 3 Electric potential of the discharge area

图4是放电区内各点场强大小的分布情况。从图4中可以看到,整个放电区内场强在阴极附近达到最大值约 1.8×10^3 V/cm,并沿各个方向连续下降,不同区域场强下降的速率不同。在气流入口处,

场强从阴极最大值开始不断下降,并最终维持在一个相对较高的值,场强约 700 V/cm,这个值和按照 $E=V/d$ 计算出的场强大小比较一致。尽管图3给出的场强分布能够清晰地反映各个区域场强的大小关系,但实际的放电区域并不会扩展成这样的一个矩形平面,在场强较小的区域,放电实际上是很难维持的。另外激光模式的变化主要受光轴附近场强、粒子数密度、气体温度、气体成分等的影响,所以下面重点讨论光轴位置处场强的变化情况,从而认识场强分布对激光模式形成的影响以及探索模式改善的途径。

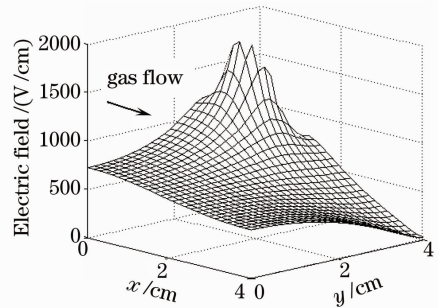


图4 放电区电场强度大小

Fig. 4 Magnitude of electric field in the discharge area

从图1(b)中可以看到光轴在放电区 $x-y$ 平面内的坐标为 (27, 16), 所以从图4中取沿垂直方向 $x=27$ mm 和水平方向 $y=16$ mm 两条场强变化曲线,如图5所示。从图5中可以看到,场强在光轴附近沿 x 方向呈现出左边高、右边低的特性,即顺着气流方向下降。场强沿 y 方向则表现为下边高、上边低,即靠近阳极处的场强大。在高增益的 CO_2 激光器中,影响激光模式的主要是粒子数的空间分布,由于电子密度 n_e 正比于 E/N , N 为总的粒子数密度,所以场强的分布形式对应着类似的电子密度分布,从而也对应着类似的粒子数密度和光子密度分

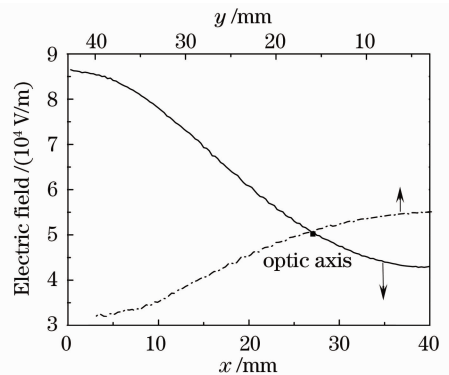


图5 光轴位置处场强

Fig. 5 Electric field around the optic axis

布。最终使得激光光强的空间分布也有类似的左高右低、下高上低的强度分布。当放电采用前后腔的放电结构时,前后腔电场分布正好形成左右对称的分布形式。

对照图 2 实验测量得到的激光光斑图样,这种光斑模式可以看成是由前后两个放电区各自形成的上下两个模式的非相干的空间叠加,称之为“双模”^[7]。其中上半部分光强分布可看成是左高右低,而下半部分可看成是右高左低的光强分布形式,这主要是因为气流在两个放电区的方向是相反的。按照图 4 理论分析给出的场强分布,场强的大小随气流方向不断下降,场强的减小直接导致电子密度的下降,从而导致粒子数密度和光子密度的下降,所以,实验上观察到的光强分布随气流方向不断减小,这和理论给出的电场分布形式非常一致。因此借助电场的分布形式可以间接地认识激光模式的形成原因,这也为激光模式的控制与改善提供了一个非常直接的途径,通过设计不同的电极结构,形成一定要求的电场分布,就可以达到对激光输出模式的间接控制与改善。

另外,从图 2 中也可以看到,尽管各放电区光斑能量的分布均是沿气流方向下降,但整个光斑的上下部分能量分布不是很对称,上半部分光斑能量明显小于下半部分,可见前后放电区的电极结构或者光轴位置可能存在一些差异。在实验测量放电电极的尺寸关系时发现,首先是光轴在前后腔的位置并不完全重合,另外由于阴极铜管长期使用,在重力作用下发生了弯曲变形,中心处最大的变形有 5 mm 之多^[7]。这些差异都可能会对放电区的电场分布产生重要影响,从而影响激光能量的空间分布。由理论分析和实测测量结果,可以认为光斑上部分对应的放电区的场强分布要差一些。下面借助理论分析比较了不同的电极结构对场强分布的影响,探索模式控制与改善的可能途径,从而满足更多激光加工的需求。

图 6 模拟比较了电极距离不同时光轴处 x - y 方向的电场分布。从模拟结果可以看出随着电极距离的缩短,光轴 x - y 方向的场强都不断增加。图中同时标出了光轴的坐标位置,如果以实际电极距离 30 mm 时的场强大小作为激光振荡的阈值场强,可见当电极间距缩短时, x 、 y 方向的场强都将超过这个阈值。尽管场强分布仍表现为左高右低、下高上低的特性,

但对光斑中心以及气流下游没有能量的缺点来说肯定是有所改善的。理论分析以及实验上观察到的光斑形式都说明了前后放电区的电极距离并不完全相等,或者光轴位置有所偏离,这和我们对于激光器的实测结果非常一致。另外,实际激光器长时间运转后,起初充入的气体由于电离分解作用,CO₂、N₂ 等主要气体的浓度会有所下降。实验测量表明^[13],CO₂ 的分解量约 20%,N₂ 的分解量约 10%,在相同放电条件下,功率会有大幅下降。再加上分解后形成的气体对激光动力学过程的影响,甚至会产生激光不能振荡的情况,模式也就变得非常差。

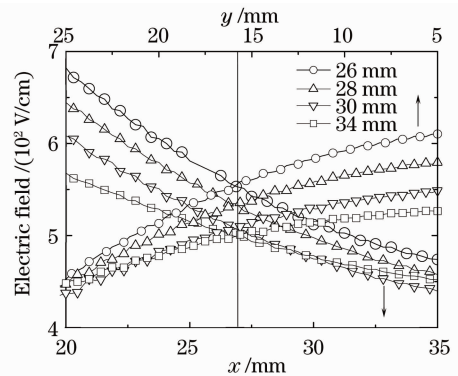


图 6 不同电极距离时光轴位置的电场强度

Fig. 6 Electric field around the optic axis with different electrode spacings

通过激光模式的实验测量和放电区场强的理论计算,证实了前后放电区的电极间距存在一些差异,以及光轴位置的不对称等因素,使得输出光斑的能量分布很不均匀。因此在重新安装激光器时,对电极间距和光轴位置进行了精确的校准,在此基础上重新测量了光斑模式的变化情况。实验测量了不同功率下模式的分布情况,如图 7 所示。从图 7 可以看到,在调整过电极间距和光轴位置后,无论是小功率还是大功率时,光斑模式的均匀性和对称性都有明显改善。另外,在功率增加的过程中,光斑面积也不断增加,从小功率时的单一的低阶模式向复杂的高阶模式转变,光斑在竖直和水平方向产生更多的分裂。从测量结果也可以看到,当功率超过 1500 W 时,光斑的轮廓基本不再改变,呈现出一个矩形分布。竖直方向的对称性比较好,但水平方向,由于受气流的影响,还是会出现在左边的功率要比右边的功率低的现象,这也和前面理论分析给出的顺着气流方向场强下降的结论非常一致。

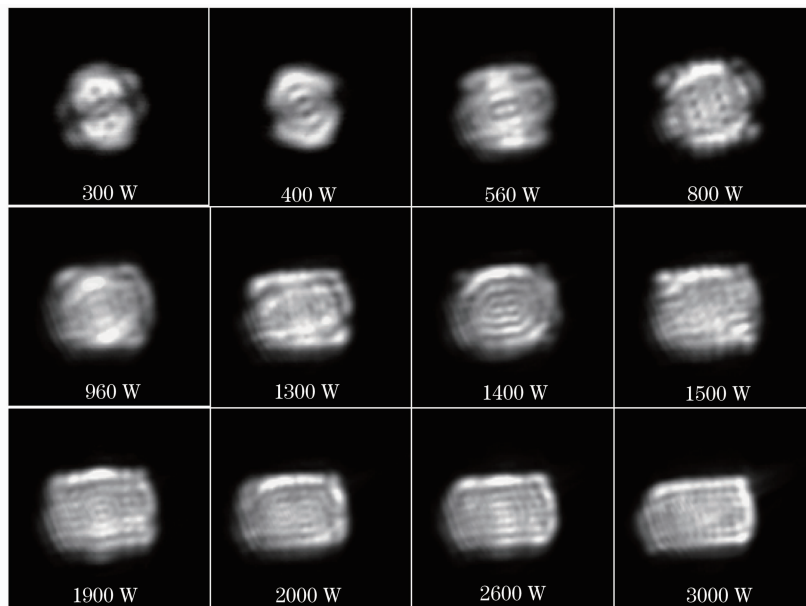


图 7 激光模式随输出功率的变化

Fig. 7 Variation of laser modes with the output power

5 结 论

通过数值计算求解了横流 CO₂ 激光器管板式放电区电势变化的拉普拉斯方程,得到了放电区电势和场强的分布情况,从而可以定性了解放电区电子密度的分布情况,为了解激光模式的形成和改善提供了一定的理论依据。通过实验测量,定性地解释了光斑能量分布沿气流方向下降及能量不均匀的特点。利用理论分析结果和对激光器放电电极结构的测量,适当调整激光器的电极间距和光轴位置,从而获得了比较均匀的输出光斑,激光模式得到了较大改善。理论和实验结果表明,管板式放电区场强的分布对激光模式的形成有直接关系,通过设计、调整电极距离有助于改善光轴附近场强分布,从而达到控制、改善光斑模式的作用。

致谢:感谢浙江工业大学理学院张航、李海彬老师对理论模型的讨论,及激光加工技术工程研究中心的孙东跃、楼程华等老师及研究生在实验过程中给予的大力帮助。

参 考 文 献

- 1 S. V. Deshmukh, C. Rajagopalan. High-power multibeam CO₂ laser industrial applications[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2003, **35**(7): 517~521
- 2 Y. W. Park, H. Park, S. Rhee *et al.*. Real time estimation of CO₂ laser weld quality for automotive industry[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2002, **34**(2): 135~142
- 3 M. Boutinguiza, J. Pou, F. Lusquinos *et al.*. CO₂ laser cutting

of slate[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2002, **37**(1): 15~25

- 4 Yao Jianhua, Fu Jibin, Chen Jun. Laser beam mode analysis in laser quenching process[J]. *Applied Laser*, 2008, **28**(1): 25~29
- 姚建华,傅纪斌,陈君. 激光淬火过程中的激光束模式分析[J]. *应用激光*, 2008, **28**(1): 25~29
- 5 Wang Yunshan, Wang Juanjuan, Zhu Fudong. Beam optimum system for laser heat treatment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1730~1734
- 王云山,王娟娟,朱福栋. 激光热处理光束优化系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1730~1734
- 6 Wang Zhiyong, Chen Tao, He Ping *et al.*. Measurement of optical parameters for high-power CO₂ laser beams according to changes of transverse intensity distribution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(12): 1075~1079
- 王智勇,陈涛,贺平等. 大功率 CO₂ 混合模激光束传输参数的精确测量[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(12): 1075~1079
- 7 Cheng Cheng, Ma Xingchao, Xu Zhousu *et al.*. Measurement of temporal depending lasing modes of a high power Transverse-flow CO₂ laser processor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 549~554
- 程成,马行超,许周速等. 大功率横流 CO₂ 激光横模随时间变化的测量[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 549~554
- 8 Chen Hong, Wu Shikai, Zhang Zhengwei *et al.*. The effect of laser beam characteristics on laser processing [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(6): 834~837
- 陈虹,吴世凯,张正伟等. 大功率激光光束特性对激光加工的影响[J]. *光学技术*, 2006, **32**(6): 834~837
- 9 Wang Zhiyong, Chen Kai, Zuo Tiechuan. Study on the influence of high-power CO₂ blending mode laser beam upon laser welding [J]. *J. Optoelectronic · Laser*, 2000, **11**(5): 549~552
- 王智勇,陈铠,左铁钊. 大功率 CO₂ 混合模激光束对焊接的影响[J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(5): 549~552
- 10 Ding Changlin, Wan Chongyi. Multifrequency dynamical model of pulsed CO₂ lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3): 1165~1170
- 丁长林,万重怡. 脉冲 CO₂ 激光器的多频动力学模型[J]. *物理学报*, 2006, **55**(3): 1165~1170

- 11 A. H. Sharif, A. M. Kheir. Numerical modeling of a fast-axial-flow CW CO₂ laser [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2007, **39**(3): 610~615
- 12 S. Sazhint, P. Wild, E. Sazhinat *et al.*. Three-dimensional modelling of processes in the fast-axial-flow CO₂ laser[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1994, **27**: 464~469
- 13 C. Cheng, Z. S. Xu. Experiment determination of after-operating gas compositions in a transverse-flow CW high power CO₂ laser[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2005, **37**(4): 293~297
- 14 G. G. Martin, J. R. Ignacio, D. A. Violeta *et al.*. An analytical approach to the design of electrodes in high-power, fast-transverse-flow CO₂ lasers[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2005, **37**(8): 615~622
- 15 Li Shimin, Huang Weiling. Principle and Design of Laser Devices [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. 117
李适民, 黄维玲. 激光器件原理与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. 117

Call for Papers

Special Issue on *Enabling Science and Technology for High-Speed Optical Communications*

Chinese Optics Letters (COL) invites original manuscript submissions for a Special Issue on *Enabling Science and Technology for High-Speed Optical Communications* to be published in September, 2010.

Fiber optics underpin the communications infrastructure for the information society today. Cables consisting of hair-like fibers speed data around the globe in the form of rapid pulses of light. Modern telecom infrastructure facilitating high-speed broadband internet would not be possible without it. Rapid progress of advanced modulation formats, coding, optical amplification, coherent detection, and digital signal processing has made significant impact in the field of optical communications. Transmission speeds beyond 100 Gb/s are being explored. This special issue will include comprehensive review articles and original contributions covering the rapid advances and broad scope of these technologies in optical fiber communications.

Following is a representative and non-exclusive list of areas in which papers are solicited.

- Advanced modulation formats
- Advanced coding technologies
- Coherent detection techniques
- High-speed optoelectronics devices
- New fiber for long-haul and submarine applications
- Performance monitoring for optical transmission

Invited papers include:

Allan Willner (University of South California), High-speed transmission and optical monitoring
 Jianjun Yu (NEC Labs America), High-capacity DWDM transmission systems
 Xiang Liu (Bell labs), Fiber nonlinear impairments and their mitigation in coherent optical OFDM
 Christophe Peucheret (Technical University of Denmark), Ultra-high speed optical transmission
 Xiang Zhou (AT&T Labs), Digital signal procession for multi-level modulation format
 Chongjin Xie (Bell labs), Nonlinear polarization effects and mitigation in polarization multiplexed transmission
 Benyuan Zhu (OFC labs America), New fiber for optical signal transmission over long-haul and submarine distance

Feature Editors:

Tingye Li (厉鼎毅) (AT&T, retired), Member, National Academy of Engineering; Foreign Member, Chinese Academy of Engineering, Fellow, OSA and IEEE
 Ziseng Zhao(赵梓森) (WRI, Fiberhome), Member, Chinese Academy of Sciences
 Jianjun Yu(余建军)(NEC Labs America), Fellow, OSA

Submission deadline: May 10, 2010

Submission format:

Authors should use the Latex or MS-Word style files. Please upload the submission online at the website of COL: <http://www.col.org.cn> (with marks of "submitted to optical fiber communications issue"). And please send email to col@mail.shnc.ac.cn if there is any problem. Publication is partly supported by the National Basic Research Program of China (No. 2010CB328300).