

文章编号: 0258-7025(2007)11-1466-06

输出功率 50 W 的脉冲染料激光放大器

陈日升^{1,2}, 谢全新², 卢 强², 张云兴², 张晓卫², 张志忠²

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; ² 天津理化工程研究院, 天津 300180)

摘要 推导了准稳态下横向抽运的脉冲染料激光放大器的简化速率方程, 提出了双侧横向抽运方式的脉冲染料激光放大器的设计原则和设计方法。应用高功率脉冲染料激光放大器的物理设计结果, 研制了输出功率为 50 W 的脉冲染料激光放大器的实验装置。采用铜蒸气激光(CVL)作为抽运光, 在此染料激光放大器上进行了实验研究, 获得染料激光输出功率为 52 W, 抽运激光功率提取效率为 41%。给出了染料激光波长、注入染料激光功率以及抽运激光的时间和空间匹配特性与染料激光放大器输出激光功率和抽运激光功率提取效率的相互关系, 讨论了染料溶液浓度对双侧横向抽运方式的脉冲染料激光放大器的输出光束质量的影响。

关键词 激光技术; 染料激光器; 染料激光放大器; 双侧抽运; 提取效率

中图分类号 TN 248.3 文献标识码 A

Pulsed Dye Laser Amplifier with 50 W Output Power

CHEN Ri-sheng^{1,2}, XIE Quan-xin², LU Qiang²,

ZHANG Yun-xing², ZHANG Xiao-wei², ZHANG Zhi-zhong²

(¹ College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)
(² Tianjin Institute of Physical and Chemical Engineering, Tianjin 300180, China)

Abstract The principle and method of designing double-side transversely-pumped high-power pulsed dye laser amplifier are presented based on the simplified rate equation of transversely-pumped dye laser amplifier at quasi-steady state. A double-side transversely pumped dye laser amplifier with 50 W output power was developed based on the results of physical design of high power pulsed dye laser amplifier. The experimental study has been performed on this dye laser amplifier pumped by copper vapor laser (CVL). The output power of the amplifier was over 52 W, and the extraction efficiency was up to 41%. The experimental results of the extraction efficiency and output power related to the laser wavelength, input dye laser power and pump beam's temporal and spatial performance have been given. Furthermore, the influence of dye solution concentration on the beam quality of the double-side transversely-pumped dye laser amplifier has been discussed.

Key words laser technique; dye laser; dye laser amplifier; double-side pump; extraction efficiency

1 引言

染料激光器从其发展初期到现在已经在科学和技术领域被广泛采用。虽然近年来全固态可调谐激光器、光参量激光器等可调谐激光器的发展对染料激光器的应用构成了很大的冲击, 但染料激光器窄激光线宽、高功率、高脉冲重复频率等方面的优异性能是其他激光器目前还无法超越的。因此在激光光谱学、激光化学等许多研究领域里, 染料激光器仍然在发挥着重要的作用^[1~3]。直接由染料激光振荡器

难于获得既有高功率、又有高光学质量的激光输出。为了获得窄线宽、高功率的可调谐激光, 往往需要采用激光放大技术。国内外从事染料激光研究的机构都非常重视染料激光放大技术的研究。1993 年美国利弗莫尔国家实验室报道了染料激光主振荡功率放大(MOPA)链输出功率达到了 750 W^[1]; Grigor'ev 等研究的染料激光放大器的输出功率达到了 100 W 以上^[3]。国内目前从事高功率、高脉冲重复频率染料激光器研究的机构不多, 近年来在染料激

收稿日期: 2007-02-07; 收到修改稿日期: 2007-05-31

作者简介: 陈日升(1971—), 山西人, 研究员, 目前主要从事可调谐激光器、固体激光器等方面的研究工作。

E-mail: chenrishi@yahoo.com.cn

光器系统的理论研究和优化设计方面有了一定的研究^[4~7],但真正建立实验系统,并开展实验研究的并不多^[8,9]。本文描述了铜蒸气激光(CVL)双侧横向抽运的脉冲染料激光放大器的理论模型、设计方法、实验装置以及实验结果。

2 双侧横向抽运脉冲染料激光放大器的理论模型

在横向抽运的脉冲染料激光放大器中,染料分子的能级结构如图 1 所示。图中 n_0 和 n_1 分别为基态 S_0 和第一激发态 S_1 上的粒子数密度, σ_{01} 和 σ_{12} 分别为基态 S_0 和第一激发态 S_1 粒子对抽运光的吸收截面(cm^2), σ_e 为受激辐射截面(cm^2), τ 为 S_1 态粒子荧光寿命(s), τ_{21} 为第二激发态 S_2 弛豫时间(s), K_{ST} 为 S_1 态与三重态 T_1 系间非辐射跃迁速率常数(s^{-1}), σ_{01}^L 和 σ_{12}^L 分别为注入激光波长下 $S_0 \rightarrow S_1$ 和 $S_1 \rightarrow S_2$ 的吸收截面(cm^2), T_2 为三重态高能级。

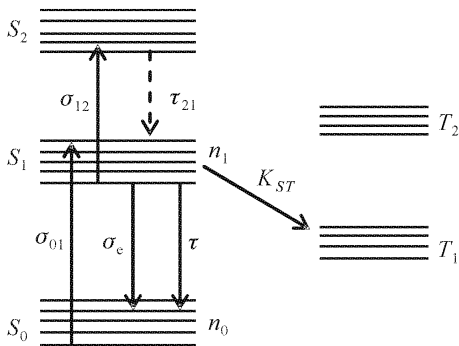


图 1 染料分子的能级结构图

Fig. 1 Energy level diagram of dye molecule

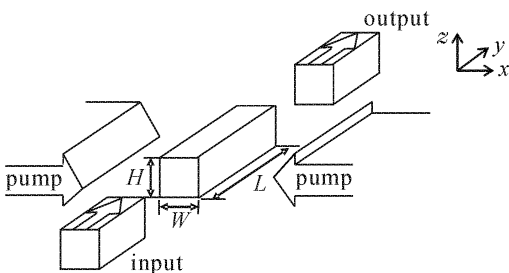


图 2 双侧横向抽运染料激光放大器结构图

Fig. 2 Schematic diagram of a double-side transversely pumped dye laser amplifier

图 2 所示为双侧横向抽运脉冲染料激光放大器的典型实验结构图。低能量、窄带宽的注入激光脉冲是由染料激光振荡器产生的,注入激光脉冲经过放大介质时,由于抽运光的作用而使染料溶液能级粒子数反转,从而产生激光能量的放大输出。对注入染料激光有放大作用的过程主要是:

1) 基态粒子吸收抽运光能量并跃迁到激发态上,该过程提供激光放大能量;

2) 激发态粒子受激辐射跃迁到基态,该过程释放能量,产生激光放大输出。

在铜蒸气激光抽运的染料激光放大器中,由于铜蒸气激光抽运光脉冲持续时间(典型值 20~40 ns)比第二激发态 S_2 弛豫时间 τ_{21} (典型值 10^{-12} s)长,但比系间非辐射跃迁的时间 ($1/K_{ST}$)短, S_2 和 T_1 的粒子数可以忽略,系统可以看作处于准稳态。在准稳态下,染料分子的能级结构可以简化为图 3。因此可以在图 2 的坐标系中推导准稳态下横向抽运脉冲染料激光放大器的微分方程^[4,10]

$$\frac{dn_1}{dt} = 0 = n_0\sigma_{01}I_p + n_0\sigma_{01}^L I - n_1\sigma_e I - \frac{n_1}{\tau}, \quad (1)$$

$$\frac{dI_p}{dx} = -n_0\sigma_{01}I_p - n_1\sigma_{12}I_p, \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dy} = n_1\sigma_e I - n_0\sigma_{01}^L I - n_1\sigma_{12}^L I, \quad (3)$$

式中 I, I_p 分别表示染料激光和抽运激光的光强 ($\text{Photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。由于除 S_0 和 S_1 态外,其余各能态上没有粒子数的积聚,因此染料分子的总粒子数 n 可以表示为

$$n = n_0 + n_1, \quad (4)$$

通过解(1)~(4)式可以得到

$$\frac{1}{I} \frac{dI}{dy} = \frac{G_0}{1 + I/I_s}, \quad (5)$$

式中 G_0 为放大器的小信号增益系数,其表达式为

$$G_0 = \frac{n\sigma_e(\sigma_{01}\tau I_p - \sigma_{01}^L/\sigma_e)}{1 + \sigma_{01}\tau I_p}, \quad (6)$$

I_s 为染料激光饱和强度,其表达式为

$$I_s = \frac{1 + \sigma_{01}\tau I_p}{\sigma_e\tau(1 + \sigma_{01}^L/\sigma_e)}, \quad (7)$$

在大功率染料激光放大器中,抽运激光都是以高强度为特征的,因此(7)式中 $\sigma_{01}\tau I_p \gg 1$,同时忽略基态粒子对注入激光的吸收,即 $\sigma_{01}^L \ll \sigma_e$,于是(7)式可以简化为

$$I_s \approx \frac{\sigma_{01}}{\sigma_e} I_p. \quad (8)$$

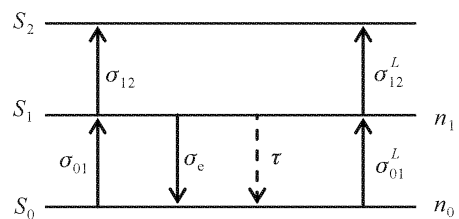


图 3 稳态理论中染料分子简化能级结构图

Fig. 3 Simplified molecular energy level diagram in steady state theory

对(5)式沿染料激光光轴从 $y = 0$ 到 $y = L$ 积分后得到长度为 L 的染料激光放大器的级间增益系数 G 的表达式

$$\ln G = \ln \frac{I_{out}}{I_{in}} = G_0 L - \frac{(G-1)I_{in}}{I_s}, \quad (9)$$

式中 I_{in} 和 I_{out} 分别为染料激光放大器的注入激光光强 ($y = 0$) 和输出激光光强 ($y = L$)。

染料激光放大器级间增益系数 G 的表达式(9)描述了在某些参数已知情况下,放大器的注入和输出激光特性,它是脉冲染料激光放大器设计的理论基础。

3 双侧横向抽运脉冲染料激光放大器的设计

在设计双侧横向抽运脉冲染料激光放大器时,通常对放大器的要求是放大后输出的激光脉冲光谱形状与从染料激光振荡器产生的注入激光脉冲光谱形状尽量一致,而激光输出能量增加到注入激光能量的 G 倍。双侧横向抽运脉冲染料激光放大器结构中最主要的部件是染料池以及染料循环系统。

在染料池的设计过程中,放大器的最大输出功率受到放大器染料池激光窗口损伤阈值的限制。综合考虑放大器的输出激光功率、脉冲重复频率、脉冲持续时间等参数,在准稳态增益理论下作者计算了放大器染料池的物理尺寸^[4],最终的设计结果及参数见表 1。

表 1 50 W 脉冲染料激光放大器设计参数

Table 1 Parameters of 50 W pulsed dye laser amplifier

Pump laser wavelength /nm	578
Pump pulse repetition frequency /kHz	6
Pump pulse duration /ns	20
Dye laser wavelength /nm	620
Laser dye	Rhodamine 101
Dye cell size / (mm×mm×mm)	20×1×0.5

在高功率脉冲染料激光放大器中,一般不采用染料溶液开放式的喷流形式,因为,在高功率抽运激光的作用下,这种形式有失火的危险,而多采用染料溶液在封闭的、有透明激光窗口的染料池内流动的形式,如图 4 所示,染料池的材料多为高纯度的石英。由于抽运光而产生的染料激光介质中热能的积留,会引起整个染料溶液密度的变化,进而引起折射率的微变,这种微变会产生热透镜效应和输出激光

束的偏折现象。为了克服这一现象,需使染料溶液处于高速流动状态。染料溶液的流速应该满足在连续不断的抽运激光脉冲间隔内,抽运区域内的染料溶液刷新 3~10 次^[2]。对于抽运区域为 20 mm×1 mm×0.5 mm 的染料池,染料溶液的流速应至少大于 15 m/s(假设激光脉冲重复频率为 10 kHz)。因此染料循环系统及染料池的结构必需足够坚固,否则难以承受染料溶液循环泵产生的压力。染料溶液在流经染料池时,在抽运区域内高速流动的液体须为均匀的流体,这就要求在染料溶液的流路中应该避免尖角或横截面的突变,因为它们会使高速流动的染料溶液产生涡流形式。所以循环管道和染料池形状的精心的设计是高功率脉冲染料激光放大器结构中十分重要的环节。

染料溶液流动中另一个引起不均匀性的潜在因素是流动中的气泡,在流经染料池之前过滤染料溶液会加重这种影响。过滤器会使流动中的大气泡碎化成微小的气泡,这些微小的气泡在流经染料池时使激光束产生噪声。通过过滤器的精心设计及其在染料循环回路中的位置安排可以有效地减少染料溶液流动中的气泡。

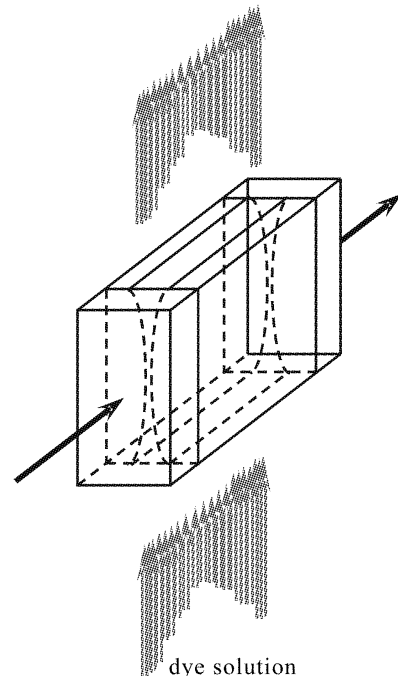


图 4 双侧横向抽运的染料池结构

Fig. 4 Structure of double-side transversely-pumped dye cell

4 实验装置

铜蒸气激光双侧抽运染料激光器实验装置如图 5 所示。图中虚线框为 LAMBDA PHYSIK

LPD3000 染料激光器,其中 DC_1 为振荡级染料池, DC_2 为预放级染料池。 I 为矩形光阑, L 为 $F = 500$ mm 的聚焦透镜, DC_3 为放大器的染料池, CL_1 和 CL_2 为抽运光铜蒸气激光的聚焦柱透镜, D_1 和 D_2 为 M-92 型激光功率计,分别用来测量放大器注入激光功率和输出激光功率, D_3 和 D_4 为 Lab Master 型激光功率计,分别用来测量抽运激光功率 CVL_3 和 CVL_4 。用于抽运染料激光器振荡级和预放级的 CVL_1 和 CVL_2 波长为 511 nm,染料为 DCM 乙醇溶液,抽运染料激光放大器的 CVL_3 和 CVL_4 波长为 578 nm,染料为 Rh101 乙醇溶液,染料池长 20 mm,缝宽 1 mm,染料溶液流速 20 m/s。

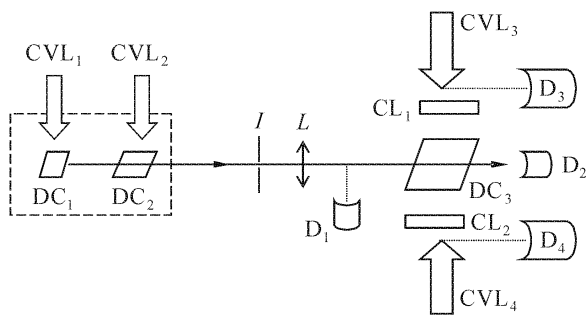


图 5 铜蒸气激光双侧抽运的染料激光放大器实验装置
Fig. 5 Experimental setup for CVL double-side pumped dye laser amplifier

5 铜蒸气激光抽运染料激光放大器的实验特性

5.1 功率提取效率

在染料激光放大器的实验研究中,一个重要的参数是染料激光放大器的功率提取效率 η ,它的定义为

$$\eta = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{P_{\text{pump}}}, \quad (10)$$

式中 P_{in} , P_{out} 和 P_{pump} 分别为染料激光放大器的注入激光功率、输出激光功率和抽运激光功率。染料激光放大器的功率提取效率不仅与它们有关,而且与染料溶液浓度和染料激光输出波长等有关。实验中,在抽运功率为 94 W,三种不同染料溶液浓度下测量了对应不同激光波长时放大器的输出激光功率,结果如图 6 所示。在染料溶液浓度为 0.16 mmol/L,激光波长为 624 nm 时,放大器的输出功率达到 52 W。在相同条件下,得到了放大器的功率提取效率 η 与注入染料激光功率的关系曲线,如图 7 所示。在注入功率为 13.2 W 时,功率提取效率达到 41%,此时放大器的输出激光功率为 52 W。

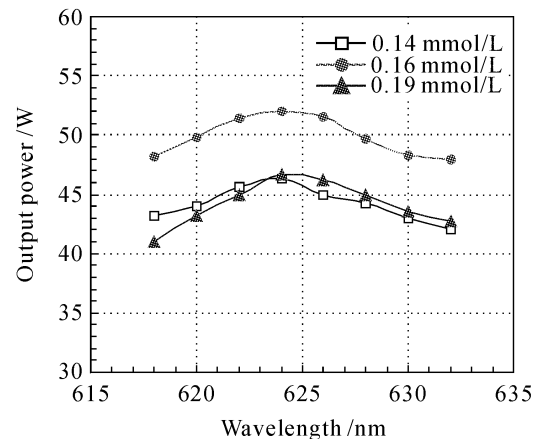


图 6 放大器平均输出功率与激光波长的关系

Fig. 6 Measured average output power of the amplifier as a function of laser wavelength

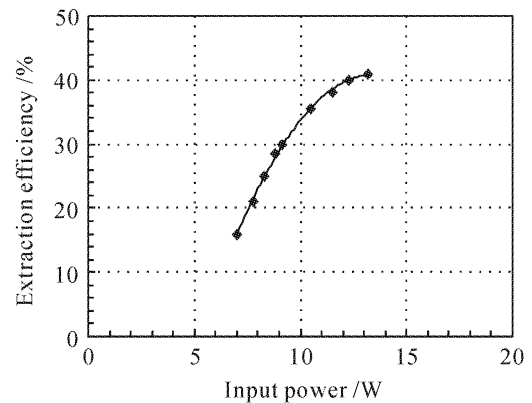


图 7 放大器功率提取效率与注入染料激光功率的关系

Fig. 7 Amplifier extraction efficiency versus input dye laser power

5.2 时间匹配特性

为了达到最大功率提取效率,抽运激光脉冲与染料注入激光脉冲之间的时间匹配十分重要。如果抽运激光脉冲与注入激光脉冲在放大介质内没有同时到达,那么注入激光脉冲就不会从抽运激光脉冲中提取能量,达不到功率放大的目的。如果注入激光的脉冲持续时间比抽运激光的脉冲持续时间长很多,注入激光脉冲将仅能覆盖抽运激光脉冲的一个很小的区域,不能从整个抽运激光脉冲中提取能量,这样会产生放大自发辐射(ASE),降低功率提取效率。通常注入激光比抽运激光的脉冲持续时间略短时,可以获得较大的提取效率^[11]。图 8(a)是实验中注入染料激光脉冲与铜蒸气激光抽运激光脉冲间的时间匹配特性。对于双侧横向抽运的脉冲染料激光放大器,双侧抽运激光脉冲的时间匹配也十分重要,如果双侧抽运激光脉冲不能同时到达放大介质,那么其中一侧的抽运激光能量将被浪费,因而达不到最大的功率提取效率。图 8(b)是实验中双侧铜蒸

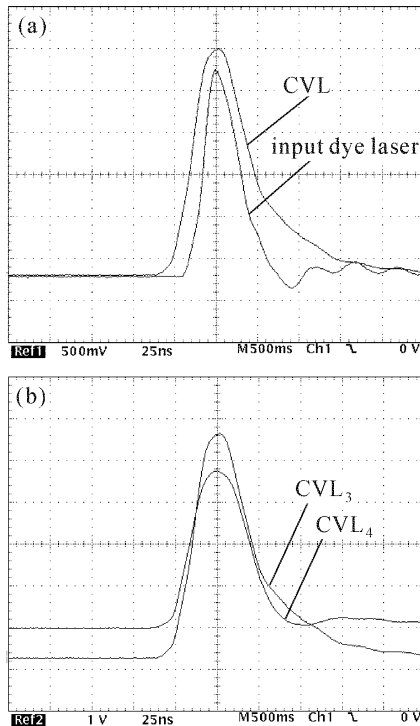


图 8

- (a) 注入染料激光与铜蒸气激光抽运光的时间匹配特性；
 (b) 双侧铜蒸气激光抽运光的时间匹配特性

Fig. 8

- (a) performance of temporal matching between input dye laser and CVL pumping beam; (b) performance of temporal matching between double-side CVL pumping beams

气激光抽运激光脉冲间的时间匹配特性。

5.3 空间匹配特性

注入放大器的染料激光光束的空间分布应该与放大器的增益区域相匹配,才能获得最佳的功率提取效率。在实际应用中,注入激光光束应当比染料池的狭缝宽度小约 20%,才可以避免衍射效应。实验中利用矩形光阑 I 和正透镜 L 使聚焦后的注入激光光束与染料池的狭缝宽度相匹配。

5.4 光束质量

双侧横向抽运的脉冲染料激光放大器输出激光的空间分布通常为不规则矩形,其光束质量很大程度上取决于实验过程的精细调节。但是抽运激光的光束质量和染料溶液的浓度选择对输出激光的光束质量也会产生很大的影响^[11]。抽运激光在柱透镜聚焦后的高度决定了激光放大介质在垂直方向增益区域的尺寸(参考图 2),因而决定了输出激光在垂直方向的空间分布和远场发散角。在水平方向,增益区域的尺寸决定于抽运激光在染料溶液中的渗透深度,因而决定于染料溶液的浓度。在高浓度运行时,输出光束在水平方向的空间形状会产生严重畸

变,光束能量分布不均匀,水平方向的发散角增大,尽管此时激光输出功率会提高;在低浓度下运行时,输出光束在水平方向的空间均匀性会提高,发散角减小,但此时激光输出功率会下降。图 9(a)是染料浓度为 0.14 mmol/L 时的输出激光远场光斑图样,此时光束水平方向发散角为 2.5 mrad,垂直方向的发散角为 2.1 mrad;图 9(b)是染料浓度为 0.19 mmol/L 时的输出激光远场光斑图样,此时光束水平方向发散角为 7.2 mrad,垂直方向的发散角为 2.3 mrad。

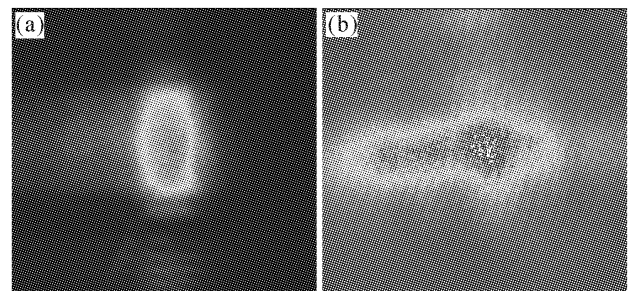


图 9 染料激光放大器输出激光远场光斑图样

Fig. 9 Far-field pattern of the dye laser amplifier output beam

6 结 论

对铜蒸气激光双侧横向抽运的脉冲染料激光放大器的设计方法进行了简要介绍,利用 Rh101 激光染料作为激光介质得到了最高输出功率为 52 W 的激光输出,功率提取效率为 41%。实验过程中也发现了在高输出功率下运行时,放大器激光窗口损伤、光束质量下降等现象。这些技术问题制约着目前染料激光放大器输出激光功率的进一步提高,有待更深入地研究解决。

参 考 文 献

- Richard P. Hackel, Bruce E. Warner. The copper-pumped dye laser system at Lawrence Livermore National Laboratory [C]. *SPIE*, 1993, **1859**:120~129
- Francisco J. Duarte. High-Power Dye Lasers [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991. 158~173
- I. S. Grigor'ev, A. B. D'yachkov, V. P. Labozin *et al.*. Tunable dye laser amplifier chain for laser isotope separation [J]. *Quantum Electronics*, 2004, **34**(5):447~450
- Chen Risheng, Zhang Zhizhong, Xie Quanxin *et al.*. Physical design of high power pulsed dye laser amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7):815~819
陈日升,张志忠,谢全新等. 高功率脉冲染料激光放大器物理设计[J]. *光学学报*, 2001, **21**(7):815~819
- Xianglei Kong, Xianyi Zhang, Xiaolin Luo *et al.*. Theoretical study on the laser gain of a multi-stage dye laser amplifier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(1):34~36
- Kong Xianglei, Luo Xiaolin, Zhang Xianyi *et al.*. Theoretical

- study on the gain and intensity of amplified spontaneous emission in multistage dye laser amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5):385~390
- 孔祥蕾, 罗晓琳, 张先焱等. 多级染料激光放大器中激光增益与放大自发辐射强度的理论研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5):385~390
- 7 Kong Xianglei, Luo Xiaolin, Zhang Xianyi *et al.*. Optimal design for small signal two-stage dye laser amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2):137~141
- 孔祥蕾, 罗晓琳, 张先焱等. 小信号双级染料激光放大器的优化设计[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2):137~141
- 8 Chen Risheng, Xie Quanxin, Zhang Yuanyuan *et al.*. The experimental study of double-sided transversely pumped dye laser amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(Suppl.):201~202
- 陈日升, 谢全新, 张元芄等. 双侧横向抽运方式的染料激光放大器的实验研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(增刊):201~202
- 9 Chen Risheng, Guo Jinbo, Yang Jichun *et al.*. Experimental study on double-stage dye laser amplifying system pumped by Nd:YAG laser [J]. *Laser and Infrared*, 2005, **35**(9):650~652
- 陈日升, 郭津博, 杨基春等. 倍频固体激光抽运双级染料激光放大系统的实验[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(9):650~652
- 10 R. Steven Hargrove, Tehmau Kan. High power efficient dye amplifier pumped by copper vapor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**(10):1108~1113
- 11 Sunita Singh, Kamalesh Dasgupta, Sasi Kumar. High-power high-repetition-rate copper-vapor-pumped dye laser [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(6):1894~1903

《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

具体要求:综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

引言,要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

正文,是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

结论,是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

参考文献,是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

《中国激光》编辑部