

文章编号: 0258-7025(2008)02-0168-05

激光二极管阵列侧面对称抽运薄片激光器

张申金¹ 周寿桓^{1,2} 吕华昌² 唐晓军² 郭丽娜² 王超² 杜涛² 李斐³

¹ 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071
² 固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015; ³ 国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073

摘要 对激光二极管(LD)阵列 5 向侧面对称抽运 Nd:YAG 薄片激光器进行了实验和模拟研究。薄片激光器的耦合系统由消像差透镜组和空心光波导组成,采用 $\phi 15\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$ 的 Nd:YAG 薄片进行初步实验,实验得到薄片激光器的激光输出平均功率为 65.7 W,光-光转换效率为 10.5%,同时增益介质内具有较理想的荧光分布。同时考虑激光二极管在快轴和慢轴方向的发散特性及增益介质侧面的散射特性,采用光线追迹法,模拟并分析了增益介质内抽运光分布,模拟结果表明耦合系统具有 88.3% 的耦合效率,同时增益介质内具有较理想的抽运光分布,且与实验结果相吻合。

关键词 激光器;薄片激光器;激光二极管侧面抽运;光线追迹法;耦合系统;荧光分布

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Laser-Diode Arrays Symmetrically Side-Pumped Thin Disk Laser

Zhang Shenjin¹ Zhou Shouhuan^{1,2} Lü Huachang²

Tang Xiaojun² Guo Lina² Wang Chao² Du Tao² Li Fei³

¹ School of Technology Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China
² National Key Laboratory of Solid-State Laser, Beijing 100015, China
³ Science College, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract The five laser-diode (LD) arrays symmetrically side-pumped Nd:YAG thin disk laser is investigated experimentally and simulatively. The coupling system is composed of astigmatic lenses and hollow wave-guide, and a $\phi 15\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$ Nd:YAG disk was used during the primary experiment. The average output power of the disk laser was 65.7 W in experiment with 10.5% optical-to-optical efficiency, and there is good fluorescence distribution in medium. The pump distribution of thin disk is obtained and analyzed by the ray tracing method. The divergence characteristics of the fast axis and the slow axis of LD and the scattering characteristic of thin disk side are homogeneously considered during the simulation. The simulation shows that the coupling efficiency of the coupling system is 88.3%, and the pump distribution in thin disk is ideal, which is accordant to the experimental result.

Key words lasers; disk laser; laser-diode side-pumped; ray tracing method; coupling system; fluorescence distribution

1 引 言

在高功率固体激光器中,沉积在增益介质内的废热,不仅会降低固体激光器的输出特性,甚至还可能造成增益介质的破裂^[1]。薄片激光器是解决这一问题有效手段之一^[2~6],对薄片形的增益介质

进行均匀抽运,并将其一个端面固定在热沉上进行均匀且有效的冷却,则增益介质内的温度只是沿厚度方向的一维分布,这种结构允许更高的抽运功率密度,而且能大大降低热效应^[7,8]。对于侧面抽运棒状激光器,采用只考虑激光二极管(LD)快轴方向

收稿日期:2007-06-04; 收到修改稿日期:2007-09-04

基金项目:总装预研资助项目。

作者简介:张申金(1978—),男,山东人,博士研究生,主要从事高功率激光二极管抽运固体激光器技术、新型固体激光器技术等方面的研究。E-mail:zhshjin@sina.com

导师简介:周寿桓(1937—),男,四川人,中国工程院院士,华北光电技术研究所研究员,博士生导师,目前研究方向为固态激光技术。E-mail:zhshuan@yahoo.com.cn

的发散特性或分别考虑在快轴和慢轴方向的发散特性对增益介质内抽运光分布影响的方法是可行的,但对于侧面抽运薄片激光器,则必须同时考虑激光二极管快轴和慢轴方向的发散特性和增益介质侧面的散射特性^[9,10]。

本文介绍了 5 个激光二极管阵列侧面对称抽运 Nd:YAG 薄片激光器实验装置,对增益介质内抽运光分布和薄片激光器的输出特性进行了实验和模拟研究。

2 耦合系统结构

5 个激光二极管阵列侧面对称抽运 $\phi 15 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 薄片激光器的结构如图 1 所示,为了便于观察,图中省略了一个平面反射板。薄片激光器坐标系的选取如图 1 所示,取 Nd:YAG 端面的法线方向为 y 轴,中心为坐标系的原点。激光二极管阵列由 15 个经过微柱透镜准直的激光二极管条组成,发光面积为 $16.8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,在快轴和慢轴方向,发散角的宽度分别为 3° 和 10° 。激光二极管阵列采用微通道冷却方式进行冷却,抽运光的中心波长为 808 nm 。

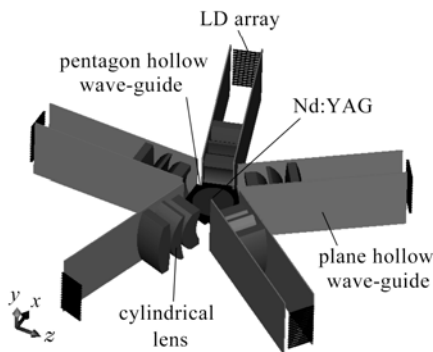


图 1 激光二极管侧面抽运薄片激光器结构

Fig. 1 Structure of laser-diode side-pumped disk laser

耦合系统由消像差柱透镜组和空心光波导组成。实验采用的消像差柱透镜组由三个柱透镜组成,将激光二极管阵列快轴方向的抽运光孔径压缩到 1.5 mm ,与增益介质的厚度相匹配。实验采用的空心光波导由两个镀 808 nm 全反膜的平面反射板组成,分五边形空心光波导和平板空心光波导两种。抽运光经过空心光波导传输一段距离后,发散角和孔径保持不变,但抽运光的均匀性得到了提高^[11]。

五边形空心光波导的孔径为 1.5 mm ,外侧为正五边形,内侧为直径 15 mm 的圆孔,紧贴 Nd:YAG 的侧面,平板空心光波导的孔径为 11 mm ,两者分别

对快轴和慢轴方向抽运光进行压缩和均匀化。经消像差柱透镜组聚焦后,抽运光快轴方向孔径为 1.5 mm ,且发散角较大,进入五边形空心光波导后,经上下两个平面反射板不断反射,孔径保持不变,长方形抽运光孔径与增益介质侧面的抽运面孔径相匹配,同时不同发散角的光束在传输过程中相互叠加,实现了快轴方向抽运光强度的均匀化。在慢轴方向,平板空心光波导将抽运光的孔径约束在 11 mm 范围内,同时改善了慢轴方向抽运光强度的均匀性。因此,空心光波导有较高耦合效率,提高了抽运光分布的均匀性且结构简单。

3 耦合系统设计模型

设激光二极管抽运光的传播方向为 z' 轴,则基模的光强分布表示为^[1]

$$I(x', y', z') = I_0(x', y', z') \times \exp\left\{-4 \cdot \left[\frac{x'^2}{\omega_x^2(z')} + \frac{y'^2}{\omega_y^2(z')}\right]\right\}, \quad (1)$$

式中 $I_0(x', y', z')$ 为抽运光中心位置处光强, $\omega_x(z')$ 和 $\omega_y(z')$ 分别为高斯光束在 z' 处沿 x' 轴和 y' 轴(即快轴或慢轴)方向的宽度。

抽运光的传输规律可以用 ABCD 变换矩阵来描述,消像差柱透镜组的变换矩阵为^[12]

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & S_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & S_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 f_1, f_2, f_3 分别为三个柱透镜的焦距, S_1 为靠近激光二极管阵列的柱透镜与激光二极管阵列的距离, S_2 为经过耦合系统后高斯光束束腰(即五边形空心光波导的入射面处)与靠近增益介质的柱透镜的距离, L_1, L_2 分别为三个柱透镜之间的间距。

空心光波导中平面反射板的变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

设增益介质的吸收系数为 α ,则抽运光传输距离 L 后,微元长度内吸收的抽运光 ΔI 为^[1]

$$\Delta I = I'(x', y', z') \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha \cdot L), \quad (4)$$

式中 $I'(x', y', z')$ 为经过耦合系统传输及侧面散射后进入增益介质的抽运光分布。

增益介质的侧面经过打毛,抽运光经过时,会产生散射现象^[13],散射时抽运光分布用描述物体表面粗糙度光学性质的双向散射分布函数(Bidirectional

Scattering Distribution Function, 即 BSDF) 表示, 此函数是描述光线在物体表面散射的数学模型, 包含双向反射分布函数及双向透射分布函数, 分别描述侧面的反射和透射情况。

根据激光二极管抽运光模型、抽运光传输的 ABCD 变换矩阵、增益介质的吸收特性和侧面的散射特性, 结合(1)~(4)式, 将所有激光二极管条发出的抽运光在增益介质内的分布相互叠加, 即可得到增益介质内的抽运光分布。模拟结果表明, 同时考虑激光二极管快轴和慢轴方向的发散特性, 在模拟所取激光二极管快轴和慢轴方向 6° 和 20° 视场角内的所有光线全部从侧面进入增益介质。柱透镜组的 6 个通光面镀有 808 nm 的增透膜, 假设每个入射面的透射率为 99.5%, Nd:YAG 侧面的透射率为 91%, 则耦合系统的耦合效率约为 88.3%。

Nd:YAG 的掺杂原子数分数为 1.0%, 吸收系数为 0.3 mm^{-1} , 同时考虑激光二极管在快轴和慢轴方向的发散特性, 模拟得到增益介质内抽运光分布如图 2 所示, 为了便于比较, 对抽运光强进行了归一化。可以看出, 增益介质内抽运光成侧面强、沿着半径向着中心逐渐降低、在中心附近又增强且分布较为均匀的规律。这是因为抽运光在侧面光强最强, 在增益介质内沿半径方向传输时逐渐被吸收, 未被吸收的抽运光在中心相互叠加, 光强再次加强, 这种较均匀的抽运光分布符合薄片激光器对增益介质内抽运光分布均匀性的要求。

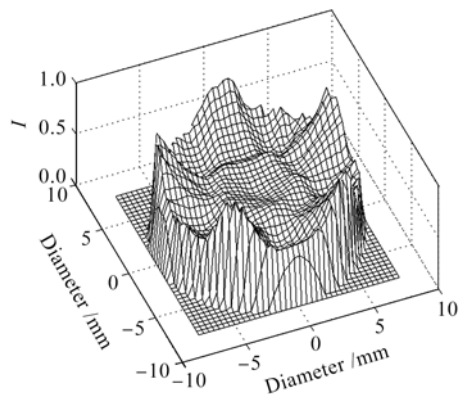


图 2 增益介质内抽运光分布

Fig. 2 Pump distribution in medium

本文采用的激光二极管阵列侧面对称抽运薄片激光器增益介质内具有较均匀的抽运光分布, 同时由消像差柱透镜组和空心光波导组成的耦合系统有较高的耦合效率且结构简单, 有利于激光二极管阵列侧面抽运薄片激光器。激光二极管抽运光的光束质量、激光二极管阵列与增益介质的距离、耦合系统

结构、增益介质的吸收系数等参量对激光二极管侧面抽运薄片激光器的耦合效率及增益介质内抽运光的均匀性都有很大的影响。

4 薄片激光器输出特性实验结果

5 个激光二极管阵列侧面对称抽运 Nd:YAG 薄片激光器的实验装置如图 3 所示。增益介质前表面镀有 1064 nm 的增透膜, 后表面为冷却面, 先镀 1064 nm 的全反膜, 再镀 Ti, Pt, Au 实现金属化, 最后采用钢焊工艺焊接在紫铜热沉上。钢焊工艺减小了增益介质与紫铜热沉间的热阻, 提高了散热冷却效率, 同时有利于增益介质自由膨胀, 防止断裂。紫铜热沉采用铜微通道方式用去离子水进行高效均匀的强迫对流冷却。

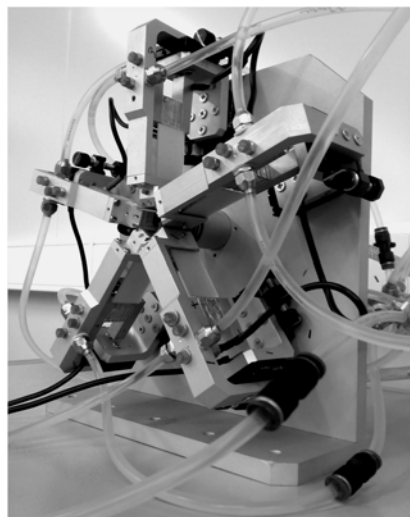


图 3 薄片激光器实验装置

Fig. 3 Experimental setup of disk laser

由激光原理可知, 在增益介质内, 抽运光强越高的地方, 自发辐射和受激辐射也就越强, 产生的荧光强度也越大, 因此, 可以通过实验测量增益介质内荧光分布的特性来直观地研究抽运光分布特性。激光二极管阵列抽运电流为 110 A, 抽运脉宽为 $400 \mu\text{s}$, 抽运频率为 25 Hz 时, 实验得到的增益介质内荧光分布如图 4 所示。

可以看出, 增益介质内抽运光分布的均匀性较为理想, 与图 2 的模拟结果一致。增益介质侧面有一处激光二极管阵列抽运区的荧光强度较弱, 这是因为相对应的激光二极管阵列输出抽运光功率较弱, 或因为耦合系统调整结构的精度要求较高, 所以相对应的耦合系统的耦合效率较低。

实验中薄片激光器采用平-平谐振腔, 输出耦合镜透射率为 7.9%, 实验测得激光二极管阵列抽运电

流为110 A,抽运脉宽为400 μs 时,激光输出平均功率与激光二极管阵列抽运频率关系和光-光转换效率与抽运功率关系分别如图5和图6所示。

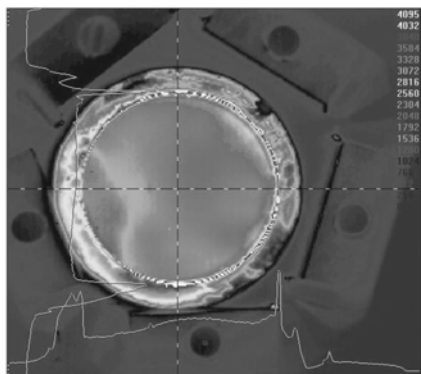


图4 增益介质内的荧光分布

Fig. 4 Fluorescence distribution in medium

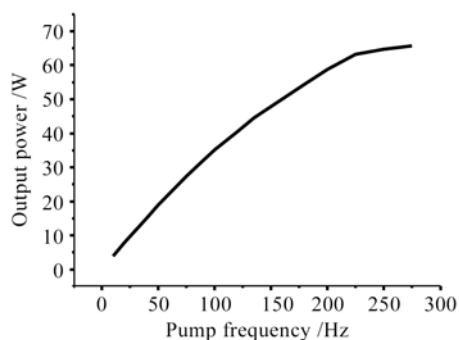


图5 输出平均功率与抽运频率的关系

Fig. 5 Average output power versus pump frequency

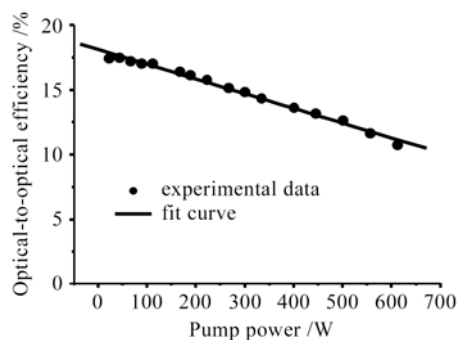


图6 光-光转换效率与抽运功率的关系

Fig. 6 Optical-to-optical efficiency versus pump power

从图5和图6中可以看出,抽运频率逐渐增加时,输出平均功率增加的趋势变得逐渐缓慢,抽运频率较高时,输出功率几乎保持不变;抽运功率增加时,光-光转换效率近似成直线降低。这是因为抽运频率较低时,增益介质内热效应不明显,对输出功率的影响较小;抽运频率逐渐增加时,抽运平均功率逐渐增加,增益介质内热效应对谐振腔造成的失谐也逐渐变得明显,使激光输出平均功率增加的趋势

逐渐变得缓慢,光-光转换效率逐渐降低;抽运频率较高时,增益介质内抽运功率较高,增益介质温度也较高,反转粒子数重新分布,增益降低,同时增益介质的形变进一步造成了谐振腔的失谐,使得激光输出平均功率几乎不变,甚至降低。

激光二极管阵列抽运电流为110 A,抽运频率为275 Hz,抽运脉宽为400 μs ,抽运功率为612.4 W时,实验测得激光输出平均功率为65.7 W,光-光转换效率为10.5%。

5 结 论

设计了5个激光二极管阵列侧面对称抽运Nd:YAG薄片激光器装置,耦合系统由消像差柱透镜组和空心光波导组成。实验得到平均功率为65.7 W的激光输出,光-光转换效率为10.5%,同时增益介质内荧光分布较为均匀。采用光线追迹法,同时考虑激光二极管快轴和慢轴方向的发散特性和增益介质侧面的散射特性,模拟得到耦合系统具有88.3%的耦合效率,同时增益介质内具有较理想的抽运光分布,与实验结果相吻合。其结论可为激光二极管抽运薄片激光器的优化设计提供参考。

参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Solid State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang trans. Beijing: Science Press, 2002. 356~357
W. 克希耐尔 著. 固体激光工程[M]. 孙文,江泽文,程国祥译. 北京:科学出版社, 2002. 356~357
- 2 John Vetrovec. Active mirror amplifier for high-average power [C]. SPIE, 2001, 4270:45~55
- 3 Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. 1.5 kW laser diode-pumped Nd:YAG disk laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(1):37~40
姚震宇,蒋建锋,涂波等. 1.5 kW激光二极管抽运Nd:YAG薄片激光器[J]. *中国激光*, 2007, 34(1):37~40
- 4 Liu Qiang, Gong Mali, Yan Ping *et al.*. Edge-pumped thin-disc Nd:YAG lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, 31(Suppl.):35~37
柳强,巩马理,闫平等. 边缘抽运薄片Nd:YAG激光器[J]. *中国激光*, 2004, 31(增刊):35~37
- 5 Yao Zhenyu, Lü Baida, Jiang Jianfeng *et al.*. Laser diode-pumped Nd:YAG double-disk laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, 32(4):457~460
姚震宇,吕百达,蒋建锋等. 激光二极管抽运Nd:YAG双薄片激光器[J]. *中国激光*, 2005, 32(4):457~460
- 6 Qi Yunfeng, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. 10.5 W continuous-wave output from Yb:Y₂O₃ ceramic disk laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5):797~798
漆云凤,楼祺洪,董景星等. Yb:Y₂O₃陶瓷薄片激光器获得10.5 W连续激光输出[J]. *光学学报*, 2006, 26(5):797~798
- 7 Zhang Shenjin, Zhou Shouhuan, Tang Xiaojun *et al.*. Thermodynamics analysis in diode-laser side-pumped Nd:YAG disk laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, 33(Suppl.):16~19

- 张申金,周寿桓,唐晓军等. 激光二极管阵列侧面抽运 Nd:YAG 圆片激光器热力学分析[J]. 中国激光, 2006, **33**(增刊): 16~19
- 8 Christian Stewen, Karsten Contag, Mikhail Larionov *et al.*. A 1 kW CW thin disc laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4):650~657
- 9 Ning Jiping, Cai Zhiqiang, Chen Zhiqiang *et al.*. Study on uniform of pump distributivity in a LD side-pumped Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):390~394
宁继平,蔡志强,陈志强等. LD 侧面抽运的 Nd:YAG 激光器抽运均匀性研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(4):390~394
- 10 Zhang Shenjin, Zhou Shouhuan, Guo Lina *et al.*. Investigation of coupling system of laser-diode side-pumped thin disk laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(Suppl.):138~142
张申金,周寿桓,郭丽娜等. 二极管侧面抽运薄片激光器耦合系统研究[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(增刊):138~142
- 11 Jia Wei, Li Mingzhong, Ding Lei *et al.*. Research on the large-aperture high power laser diode arrays end-pumped coupling system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(Suppl.):105~107
贾伟,李明中,丁磊等. 大口径高功率激光二极管阵列端面泵浦技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(增刊):105~107
- 12 Lü Baida. *Laser Optics: Laser Beam Propagation and Beam Quality Control* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. 117~122
吕百达. 激光光学:激光束的传播变换和光束质量控制[M]. 成都:四川大学出版社, 1992. 117~122
- 13 Min Xianlong, Sun Yankui, Bu Hailiang. The PRT rendering algorithm of translucent object [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, **36**:26~28
闵贤龙,孙延奎,卜海亮. 半透明物体的 PRT 绘制算法[J]. 计算机工程与应用, 2005, **36**:26~28

《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