

文章编号: 0258-7025(2008)09-1308-05

腔内倍频 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4/\text{LBO}$ 深蓝 456 nm 激光器的工作特性

李义民^{1,2} 檀慧明¹ 付喜宏^{1,2} 田玉冰^{1,2} 王保山^{1,2} 孟玉青^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 在激光二极管(LD)抽运腔内倍频 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4/\text{LBO}$ 深蓝456 nm激光器中,为对比激光晶体掺杂浓度对倍频输出功率的影响,利用同样尺寸为3 mm × 3 mm × 2 mm,稀土离子掺杂原子数分数分别为0.15和0.25的 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体作为对比。实验中利用同样长为20 mm的线性直腔,在使用10 mm长、按基频光为914 nm方向切割的I类相位匹配倍频晶体LBO,在抽运功率为2.85 W时,前者获得了输出功率为105 mW的深蓝456 nm激光,明显高于后者。通过对准三能级激光晶体的最佳长度分析表明,掺杂原子数分数为0.15的 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体与0.25的相比,其实际长度更加接近于最佳长度。通过对倍频晶体LBO的最佳切割角和温度控制等分析表明,利用针对914 nm基频光切割的LBO晶体在912 nm激光器中,其切割角的差别可以通过温控的改变得到补偿。

关键词 激光器;激光二极管抽运;腔内倍频;准三能级;456 nm 激光

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083509.1308

Characteristics of Intracavity-Frequency-Doubled $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4/\text{LBO}$ Deep Blue 456 nm Laser

Li Yimin^{1,2} Tan Huiming¹ Fu Xihong^{1,2}
Tian Yubing^{1,2} Wang Baoshan^{1,2} Meng Yuqing^{1,2}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract In the experiment of laser diode (LD) pumped intracavity frequency doubled Nd: GdVO_4/LBO deep blue 456 nm laser, in order to examine the effect of different neodymium concentrations in laser crystal on output power of frequency-doubled laser, two Nd: GdVO_4 crystals with the same size of 3 mm × 3 mm × 2 mm and different neodymium concentrations with Nd^{3+} ion atom fraction of 15 % and 25 % are compared. In the experiment, the same length of laser cavity of 20 mm and an I-type phase-matched frequency-doubled medium of LBO for 914 nm with the length of 10 mm were used, a output power of 105 mW was obtained at incident pumped power of 2.85 W in the former crystal. In experiment, the laser crystal with higher dopant concentration obtained lower output power relative to that with lower dopant concentration. Through analyzing optimal crystal length in quasi-three-level laser system, the actual length of the 15 % Nd^{3+} doped crystal is closer to the optimal length compared with the other crystal. Through analyzing the accurate cut-angle of frequency-doubled medium and temperature control of LBO, the difference of cut-angle for 912 nm and 914 nm may be compensated by controlling the temperature.

Key words lasers; laser diode pumped; intracavity-frequency-doubling; quasi-three-level; 456 nm laser

收稿日期: 2007-10-16; **收到修改稿日期**: 2008-02-26

基金项目: 国家 863 课题基金(2002AA311140)资助项目。

作者简介: 李义民(1979 →), 男, 黑龙江人, 博士研究生, 研究方向为全固态激光及光学频率变换技术。

E-mail: lym79hsd@163.com

导师简介: 檀慧明(1954 →), 男, 吉林人, 研究员, 博士生导师, 目前研究方向为非线性光学及激光频率变换技术。

E-mail: hmtan2223@yahoo.com.cn

1 引言

激光二极管(LD)抽运的全固态激光器件,以其具有高效、紧凑、使用寿命长和易于获得高质量光束等优点在高密度数据存储、水下通信、激光彩色显示、海洋资源探测和光量子学分析等领域有着广泛的潜在应用^[1~3]。在LD抽运的全固态蓝光激光器的研究中,T. Y. Fan等^[4]利用 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体作为激光晶体实现了 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 准三能级跃迁、发射波长为946 nm的激光运转,为蓝光473 nm激光器的出现奠定了理论和实验基础。此后,C. Czeranowsky等^[5]利用Z型腔和非线性材料BBO作为倍频晶体,实现了输出功率为2.8 W的473 nm蓝光激光运转。

而分别基于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 和 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体中对应 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 跃迁、发射波长分别为914 nm和912 nm基频光谱线倍频的深蓝457 nm和456 nm激光器,由于其颜色更加饱满、波长更短、能量更大而在应用中倍受青睐。而 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 由于其热导率大、热透镜效应小、激光上能级热布居而引起的再吸收损耗小等诸多优点而更加受到人们的关注^[6]。

本文选用尺寸为3 mm × 3 mm × 2 mm,掺杂原子数分数为0.15的 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体作为激光介质,使用10 mm长临界I类相位匹配LBO倍频晶体,在抽运功率为2.85 W时,获得了最大输出功率为105 mW的深蓝456 nm激光输出。为研究不同掺杂原子数分数对激光输出性能的影响,对比了相同长度、不同掺杂原子数分数的 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体的激光输出特性,并对倍频晶体LBO的最佳切割角和温度控制等进行了分析。

2 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体特性

2.1 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体的吸收光谱与发射光谱

$\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 是利用Czochralski方法生长的、空间晶格常数为 $a = b = 0.7211$ nm和 $c = 0.635$ nm且具有四角形 ZrSiO_4 结构的一种晶体,具有偏振吸收和偏振发射特性。图1给出了 a 方向切割的 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体在室温下从400~850 nm范围的吸收谱。 σ 偏振和 π 偏振的吸收分别用虚线和实线表示,从图中可以看出 π 偏振方向的吸收要明显大于 σ 偏振方向的吸收。图2则给出了晶体从850~1100 nm范围内的荧光发射光谱,无论是对于1064 nm波长还是912 nm波长发射, π 偏振方向都

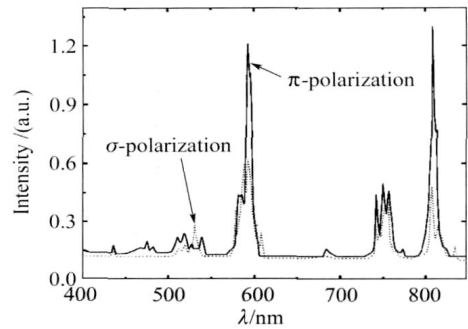


图1 室温下 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体从400~850 nm范围的吸收谱

Fig. 1 Absorption spectra of $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ crystal from 400 nm to 850 nm at room temperature

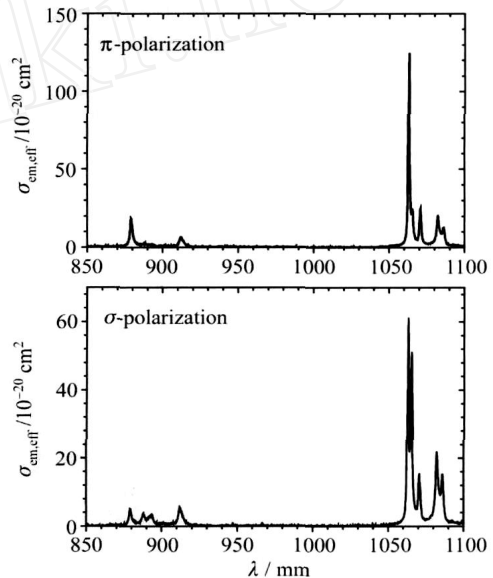


图2 室温下 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体从850~1100 nm范围的荧光发射光谱

Fig. 2 Fluorescence spectrum of $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ crystal from 850 nm to 1100 nm at room temperature

明显高于 σ 偏振方向。

2.2 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体的光学和热学特性

作为工作波长为460 nm以下深蓝光源非常有潜力的激光介质, $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体除了其准三能级 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 跃迁具有更短的发射波长外,还集合了 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体和 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体在光学和热学方面的优点。表1为 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体与 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 及 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体的光学和热学特性比较。

从表1可以看出,相对于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 和 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体, $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体具有以下优点。首先, $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体具有类似于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶

体的偏振发射特性,在激光倍频过程中无需选偏元件的引入,不会给激光谐振腔带来附加损耗,有利于抽运功率向光输出功率转化。同时,Nd³⁺:GdVO₄晶体的热导率明显优于偏振发射的Nd³⁺:YVO₄晶体,沿着晶格<110>方向具有类似Nd³⁺:YAG晶体的导热性能,这在准三能级激光跃迁中非常重要。有利于减少因发热在激光晶体中产生的温度梯度,利用减少激光晶体内的热透镜效应和减小因过多热量积累带来晶体损坏的可能性。最为重要的是可减少在准三能级跃迁发射中激光下能级因为热布居而导致的再吸收损耗,提高激光输出功率的利用率。对于LD抽运光的吸收,Nd³⁺:GdVO₄晶体沿π偏振

方向有远大于Nd³⁺:YAG晶体和近似于Nd³⁺:YVO₄晶体的吸收截面,其发射截面则无论π偏振方向还是σ偏振方向,都大于Nd³⁺:YVO₄晶体和Nd³⁺:YAG晶体。对于抽运波长的吸收,无论π偏振方向还是σ偏振方向,其吸收带宽也明显大于Nd³⁺:YVO₄晶体和不具有偏振发射特性的Nd³⁺:YAG晶体。对于⁴F_{3/2}→⁴I_{9/2}准三能级跃迁,Nd³⁺:GdVO₄晶体还有一个明显优势:⁴F_{3/2}能级具有简并特性,使激光器在运行过程中,整个⁴F_{3/2}能级的布居粒子都可以对激光增益有所贡献,而不再仅仅是⁴F_{3/2}能级的一个斯塔克(Stark)分裂子能级对激光增益有贡献。

表 1 Nd³⁺:GdVO₄,Nd³⁺:YVO₄与 Nd³⁺:YAG 三种晶体的光学、热学特性

Table 1 Optical and calorific properties of Nd³⁺:GdVO₄, Nd³⁺:YVO₄ and Nd³⁺:YAG crystals

	Nd ³⁺ :GdVO ₄	Nd ³⁺ :YVO ₄	Nd ³⁺ :YAG
Laser wavelength / nm, transition ⁴ F _{3/2} → ⁴ I _{9/2}	912(π),912(σ)	914(π),915(σ)	946
Stark level ⁴ I _{9/2} / cm ⁻¹	0,107,173,267,409	0,108,173,226,433	0,130,194,302,857
Stark level ⁴ F _{3/2} / cm ⁻¹	11375	11366,11384	11427,11512
α _{abs,eff} / 10 ⁻²⁰ cm ²	53.6(π),12.3(σ)	60.1(π),12.0(σ)	7.9
α _{em,eff} / 10 ⁻²⁰ cm ²	6.6(π),5.6(σ)	4.8(π),4.3(σ)	3.7
Absorption line width (FWHM), Δλ/nm	1.6(π),2.2(σ)	1.3(π),1.8(σ)	0.8
Thermal conductivity 300 K / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	11.7(// c),9.63(⊥ c)	5.23(// c),5.10(⊥ c)	11.1
Peak pump absorption, sm ⁻¹ at 1 %	57	40.7	8

3 LD 抽运腔内倍频深蓝 456 nm 激光实验

3.1 实验装置

图 3 为全固态 LD 抽运腔内倍频 Nd³⁺:GdVO₄/LBO 深蓝456 nm激光器的装置图。LD 的抽运光经光耦合系统整形圆化后,形成直径为100 μm的光斑注入到尺寸为3 mm ×3 mm ×2 mm 的 Nd³⁺:GdVO₄ 激光晶体上。晶体左端面镀1064 nm增透912 nm高反膜作为谐振腔的一个腔镜,同时该端面对 LD 发射的808 nm抽运光增透以实现粒子数反转,晶体右端面则镀912 nm增透膜;输出镜选择曲率半径为50 mm的平凹镜,内侧凹面

镀1064 nm和456 nm增透912 nm高反的激光介质膜,外侧平面镀456 nm增透膜,整个谐振腔长为20 mm。腔内用尺寸为3 mm ×3 mm ×10 mm 的LiB₃O₅ (LBO)材料作为倍频晶体。激光晶体按θ=90°,Φ=21.7°方向切割,借用了腔内倍频Nd³⁺:YVO₄晶体中914 nm谱线到深蓝457 nm激光器中的倍频晶体,其双端面镀制对914 nm与457 nm增透膜。整个LD部分以及谐振腔的机械装置分别放置在两个热电致冷器(TEC)上分别进行温度控制。

3.2 激光输出特性与结果讨论

利用同样的谐振腔长度、同一倍频晶体和同样温度控制条件,更换掺杂原子数分数分别为0.15和0.25的Nd³⁺:GdVO₄晶体作为激光介质进行实验。通过精细调节发现,利用掺杂原子数分数为0.15的Nd³⁺:GdVO₄晶体的深蓝456 nm激光的阈值相对较低,而出光效率和出光功率则要明显优于掺杂原子数分数为0.25的激光器,在注入功率为2.85 W 时,获得了最大输出功率为105 mW的深蓝456 nm激光输出,后者在同样抽运功率下输出功率为72 mW。两种晶体的输出功率特性曲线如图 4 所示。

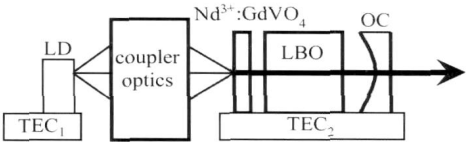


图 3 实验装置示意图(TEC:电子致冷器; OC:光学输出镜)

Fig. 3 Experimental setup (TEC: temperature-electronic controller; OC: output coupler)

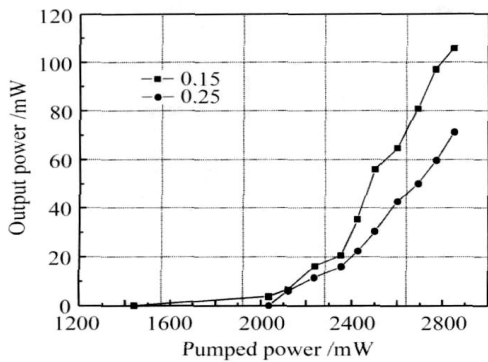


图 4 深蓝 456 nm 激光输出功率特性曲线

Fig. 4 Output power curve of the deep blue 456 nm laser

两种激光晶体的阈值差别可以通过准三能级激

光器件阈值表达式 $P_{P,th} = \frac{\pi h\nu_p}{4\sigma(f_a + f_b)\eta_t\tau}(w_L^2 + w_p^2)(L + T + 2f_a\sigma N_{ion}l)$ 得到解释,其中 $h\nu_p$ 为光子能量, f_a, f_b 分别为激光下能级、上能级粒子数分支比, η_t 为抽运量子效率, τ 为激光上能级寿命, w_L, w_p 分别代表基频光和抽运光的光斑半径, L, T 分别为线性损耗和透射‘损耗’, $2f_a\sigma N_{ion}l$ 则代表由于激光下能级存在粒子数而引起的再吸收损耗,这里 σ 为激光受激发射截面, N_{ion} 为晶体掺杂浓度, l 为腔内基频光循环强度^[4]。实验中使用的两种晶体除了掺杂浓度 N_{ion} 不同外,其他因素完全相同,根据阈值表达式,掺杂浓度高的 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体的激光器阈值也必然稍高。

对于晶体长度相同、掺杂浓度高的晶体输出功率反而低的实验事实,可以通过激光晶体的最佳优化长度理论加以定量解释。在准三能级跃迁激光晶体中,在一定抽运条件下,适当加长激光晶体的长度有利于晶体吸收更多的抽运光子,以提高激光效率,但是激光晶体过长也引入了大的再吸收损耗反倒降低了激光输出功率。因此在准三能级激光器件中存在着激光晶体最佳长度。晶体最佳长度 l 的表达式为^[4]

$$\frac{f_a N_{ion} \sigma}{\alpha} = \frac{\exp(-\alpha)}{1 - \exp(-\alpha)} (f_a N_{ion} \sigma + \delta/2),$$

对于 808 nm 激光二极管抽运的倍频 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4/\text{LBO}$ 深蓝 456 nm 激光器,具体参量选择如下: $f_a = 0.0573, \sigma = 6.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 对于掺杂原子数分数为 0.15 时 $N_{ion} = 1.8195 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 吸收系数 $\alpha = 11.1 \text{ cm}^{-1}$; 对于掺杂原子数分数为 0.25 时 $N_{ion} = 3.0325 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 吸收系数 $\alpha = 18.5 \text{ cm}^{-1}$ 。根据对激光晶体的最优化长度进行计算

可以得出,对于掺杂原子数分数为 0.15 的晶体,当激光损耗范围在 2%~10% 时,它的最佳长度范围大约在 1.5~2.5 mm;而对于掺杂原子数分数为 0.25 的晶体,当激光损耗在相同范围时,它的最佳长度范围在 0.8~1.2 mm。从计算中可以看出,对于掺杂原子数分数为 0.15 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体 2 mm 可能更接近于它的最佳长度;而对于掺杂原子数分数为 0.25 的晶体,则由于所选长度超过了它的最佳长度,在腔内引入了很大的再吸收损耗而导致倍频光输出功率相对较低。

在实验中倍频晶体 LBO 的切割角度 $\theta = 90^\circ, \Phi = 21.7^\circ$,这并不是严格按照该激光器中基频光 912 nm 来切割的,而是按照倍频 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶体中 914 nm 谱线进行切割的。该方向接受角为 $4.56 \text{ mrad} \cdot \text{cm}$,这意味着对于本实验中所用的晶体在 0.26 范围内可以进行有效倍频。如按 912 nm 进行切割,计算表明方向应为 $\theta = 90^\circ, \Phi = 21.9^\circ$,两者的差异为 0.2° ,小于 0.26° ,说明这里采用的实际切割方向对于 912 nm 是有效的。在这里,切割角度的计算都是采用室温 300 K 条件下的晶体数据,同时还计算补偿晶体切割角度的差别所需要改变的晶体温度。计算发现,如果将晶体的工作温度从 300 K 增加到 310 K,则完全可以补偿 0.2° 的差别。实验中为了使激光模与抽运光的模式良好匹配,所采用的激光谐振腔相对较小,从而限制了激光晶体与倍频晶体的独立控制,无法对倍频晶体进行加热。而在其他功率稍高的此类激光器中,当激光谐振腔变长以后,激光晶体和倍频晶体的温控进一步分离,倍频晶体的温度补偿对于进一步提高输出功率就变得十分有意义。

4 结 论

对比了选用不同掺杂浓度激光晶体的腔内倍频 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4/\text{LBO}$ 深蓝 456 nm 激光器的输出特性。实验发现利用掺杂原子数分数为 0.15 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体的激光器件其 456 nm 输出功率明显高于使用掺杂原子数分数为 0.25 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体的激光器。对激光晶体的最佳长度进行了分析,指出对于掺杂原子数分数为 0.15 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体,与掺杂原子数分数为 0.25 的 $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ 晶体相比,实验中的长度可能更加接近于其最佳长度,因而输出功率相对较高。通过对倍频晶体 LBO 的最佳切割角和温度控制等问题的分析指出,利用针对 914 nm 基频光切割的 LBO 倍频晶体在 912 nm 的

蓝光实验中,其切割角的差别可以通过温控的改变得到补偿。

参 考 文 献

- 1 Fu Xihong, Tan Huiming, Li Yimin *et al.*. Laser diode-pumped continuous-wave 589 nm laser with doubly resonant intracavity sum-frequency mixing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1043~1047
付喜宏,檀慧明,李义民等. 激光二极管抽运复合腔和频连续波 589 nm 激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(8): 1043~1047
- 2 Wang Wei, Liu Xingang, Liu Yingdong. Laser diode pumped Nd:NYW/LBO green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 646~648
王巍,刘钢,刘英同. 激光二极管抽运的 Nd:NYW/LBO 绿光激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(5): 646~648
- 3 Sun Yao, Li Tao, Yu Guolei *et al.*. Characteristics of laser

diode end-pumped laser crystal on thermal effect and second harmonic generation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 359~363

孙尧,李涛,于果蕾等. 激光二极管端面抽运 Nd:GdYVO₄ 晶体热效应分析及倍频研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 359~363

- 4 Tso Yee Fan, Robert L. Byer. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(5): 605~612
- 5 C. Czeranowsky, E. Heumann, G. Huber. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG:BiBO laser with 2.8-W output power at 473 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6): 432~434
- 6 C. Czeranowsky, M. Schmidt, E. Heumann *et al.*. Continuous wave diode pumped intracavity doubled Nd:GdVO₄ laser with 840 mW output power at 456 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **205**(4-6): 361~365

《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。执笔人(第一作者)应是在激光及其相关领域具有一定造诣,对某一方面有较深入研究的专家、学者。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。投稿同时,请作者提供详细的作者简介(包括研究领域、主要研究成果等)。

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。

投稿方式:网上投稿:www.opticsjournal.net 或 E-mail:mayi@siom.ac.cn

咨询电话:021-69918427

《中国激光》编辑部