

文章编号: 0258-7025(2009)01-0023-05

纵向抽运准三能级 Yb:YAG 激光器的 理论模型及实验研究

汪 莎¹ 陈 军¹ 刘 崇¹ 胡 淼¹ 葛剑虹^{1*} 赵广军² 徐 军²

(¹ 浙江大学光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)
(² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 在激光谐振腔中,边缘冷却的激光晶体中存在着温度梯度分布,从而使激光晶体等效为一个热透镜。热透镜效应对固体激光器的性能影响很大。由于热透镜效应,振荡光斑半径会随抽运光功率及激光谐振腔型结构的变化而变化,这将影响输出光功率的大小。在考虑振荡光斑半径随抽运光功率及谐振腔变化的情况下给出了速率方程的表达式,并采用数值方法求解。由理论分析可知,输出光功率与抽运光功率及谐振腔腔型结构有关。在相同的抽运功率下,腔型不同输出光功率不同。采用 930 nm 纵向抽运,发射光波长 1030 nm 的准三能级 Yb:YAG 晶体在三种不同腔型结构下进行实验,实验结果表明腔型结构对激光输出功率影响很大。实验结果与模拟符合较好。

关键词 激光器;速率方程;腔型结构;准三能级;Yb:YAG 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0023

Theoretical and Experimental Research of End Pumped Quasi-Three-Level Yb:YAG Laser

Wang Sha¹ Chen Jun¹ Liu Chong¹ Hu Miao¹

Ge Jianhong¹ Zhao Guangjun² Xu Jun²

(¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)
(² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In laser resonator, temperature gradient distribution exists in the edge cooling laser crystal, which makes laser crystal be equivalent to a thermal lens. The laser beam diameter changes with the pump power and the laser resonator structure due to the thermal lens effect, which influences the output power. Rate equations considering the variation of the laser beam diameter are presented and numerical methods are used to solve them. The theoretical results show that the relationship between the output power and the pump power depends on the laser cavity structure. Experiments are taken with 940 nm end pumped Yb:YAG with emission of 1030 nm. Experimental results show that output power is influenced by the cavity structure. The experimental data agree well with the stimulation results.

Key words lasers; rate equations; cavity structure; quasi-three-level; Yb:YAG crystal

1 引 言

近年来,半导体激光器的迅速发展使准三能级晶体振荡出光成为可能。Yb 掺杂的晶体作为新型的激光材料受到了人们越来越多的关注。Yb:YAG^[1~3] 晶体由于具有吸收带宽、上能级寿命长、

量子效率高、热负荷小、不存在激发态吸收和上转换以及高的掺杂浓度而不出现淬灭等优点,而受到广泛的关注。

人们对于准三能级的速率方程进行了广泛的研究。虽然此类研究都考虑了抽运光和振荡光的重叠

收稿日期:2008-01-28;收到修改稿日期:2008-05-06

作者简介:汪 莎(1982—),女,博士研究生,主要从事激光与非线性光学方面的研究。E-mail:anskina@hotmail.com

导师简介:陈 军(1946—),女,教授,博士生导师,目前研究方向为激光与非线性光学。E-mail:chenjun1@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail:jianhong@zju.edu.cn

因子^[4~6],但是在求解速率方程时往往都只是任意给定一个抽运光光斑半径和振荡光光斑半径的比值。实际上随着抽运光功率以及谐振腔腔型结构的变化,振荡光光斑大小变化很大,所以在求解速率方程时,应该考虑抽运光对光斑半径的影响。本文考虑了腔结构造成的振荡光光斑半径变化对速率方程的影响,导出了在此情况下的速率方程形式,并对其求解。根据这个新模型,不同的激光谐振腔需要不同大小的抽运光及激光晶体长度以获得最大的振荡光输出。

2 速率方程

由于 Yb:YAG 是准三能级的晶体,所以在建立速率方程时,需要考虑重吸收。考虑重吸收后稳态速率方程为^[4]

$$\frac{d\Delta N(r,z)}{dt} = (f_1 + f_2)Rr_p(r,z) - \frac{\Delta N(r,z) - \Delta N^0}{\tau_i} - \frac{(f_1 + f_2)c\sigma\Delta N(r,z)}{n}\Phi\phi_0(r,z) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{c\sigma}{n} \iiint \Delta N(r,z)\Phi\phi_0(r,z)dV - \frac{\Phi}{\tau_c} = 0, \quad (2)$$

式中 f_1 和 f_2 分别为低能级和高能级的粒子分布数, c 为真空中的光速, τ_i 为上能级寿命, σ 为发射截面面积; $\tau_c = 2l_c/[c(L_i + T)]$ 为腔内光子寿命, 其中 L_i 为腔内损耗, T 为耦合输出镜的透射率; $l_c = l_{\text{cav}} + (n-1)l$ 为谐振腔的等效光程, 其中 l_{cav} 为谐振腔的几何长度, l 为激光晶体长度, n 为激光晶体的折射率; $\Delta N(r,z) = N_2(r,z) - N_1(r,z)$ 为反转粒子数密度; $\Delta N^0 = N_2^0 - N_1^0 \approx -N_1^0 \approx -f_1 N_0$ 为未抽运的反转粒子数密度, 其中 N_0 为总掺杂浓度; Φ 为腔内总的光子数, 其和激光输出 P_{out} 的关系为 $\Phi = 2l_c P_{\text{out}}/(cTh\nu_L)$, 其中 $h\nu_L$ 为激光光子能量; R 为总的抽运速率, $R = \eta_a \eta_p P_p / (h\nu_p)$, η_p 为抽运量子效率, 通常都认为是 1, η_a 为激光晶体吸收的入射抽运光能量的效率, 若 α 为吸收系数, 则有 $\eta_a = 1 - \exp(-\alpha l)$, P_p 为抽运光功率, $h\nu_p$ 为抽运光子能量。

由(1),(2)式表示的速率方程忽略了可能存在的空间烧孔效应, 并假设抽运激光只通过激光晶体一次。若假设抽运光和振荡光都是高斯形状的, 归一化的抽运能量空间分布 $r_p(r,z)$ 和光子密度 $\phi_0(r,z)$ 分别为

$$r_p(r,z) = \frac{2\alpha}{\pi\omega_p^2\eta_a} \exp(-\alpha z) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right), \quad (3)$$

$$\phi_0(r,z) = \frac{2}{\pi\omega_0^2 l_c} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (4)$$

式中 ω_p 为抽运光的束腰半径, ω_0 为振荡光的束腰半径。

由于 ω_0 的取值对速率方程的求解结果很重要, 所以在求解过程中应当考虑 ω_0 随抽运能量的变化。

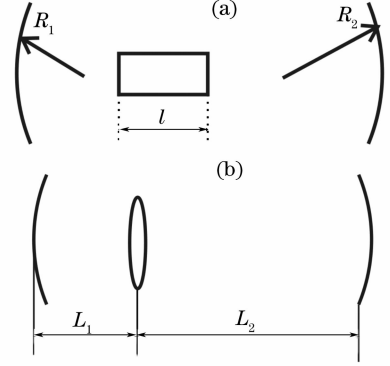


图1 激光谐振腔。(a) 两个腔镜和激光晶体; (b) 带有热透镜的等效谐振腔

Fig. 1 Laser cavity setup. (a) laser crystal with two curved mirrors; (b) equivalent cavity with thermal lens

图1(b)为(a)所示的激光谐振腔的等效腔, 把激光晶体看作一个具有焦距 f_{th} 的热透镜。由文献[7]知

$$f_{\text{th}} = K/P_p, \quad (5)$$

式中 K 为热透镜系数。

对于高斯光束抽运的晶体, 热透镜系数为^[8]

$$K = \frac{2\pi\omega_p^2 K_c}{\eta_h \eta_p \chi} = K' \omega_p^2, \quad (6)$$

式中 η_h 为热载荷分布系数, χ 为热光系数, K_c 为热传导率。由(6)式知 $K' = \frac{2\pi K_c}{\eta_h \eta_p \chi}$ 仅由激光晶体的性质决定, 当激光晶体取定了, K' 为一个常数。对于 Yb:YAG 晶体^[8], K_c 为 11 W/(m·K), $\eta_h = 1 - \frac{\eta_e}{\eta_l}$ 由量子缺陷决定, χ 为 10^{-5} K^{-1} 。

由文献[8]有

$$\omega_0^2 = \frac{\lambda_L}{\pi} \left[\frac{4u_1 u_2 g_1 g_2 + (u_1 - u_2)^2}{(1 - g_1 g_2) g_1 g_2} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

式中参数 $g_1 = 1 - L_2/f_{\text{thermal}} - L'/R_1$, $g_2 = 1 - L_1/f_{\text{thermal}} - L'/R_2$, 其中 $L' = L_1 + L_2 - L_1 L_2 / f_{\text{thermal}}$ 为有效腔长; 为了简化, 定义 $u_1 = L_1(1 - L_1/R_1)$, $u_2 = L_2(1 - L_2/R_2)$ 。

由(5)~(7)式可知由于考虑了热透镜效应, 使 ω_0 随腔型、抽运光功率以及抽运光束腰半径的变化而变化。图2给出了 ω_0 和 P_p 的关系图。

由图2可以看到, 当抽运光功率变化时, 振荡光

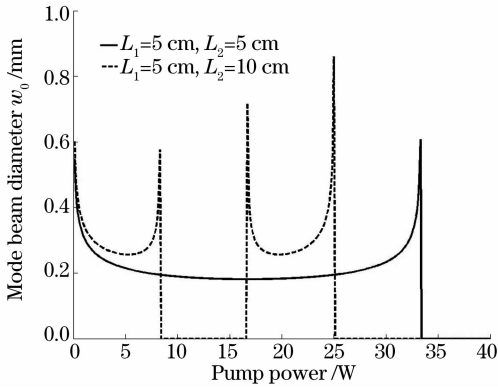


图 2 振荡光光斑半径随抽运光功率的变化

Fig. 2 Variation of laser beam diameter with pump power
光斑半径变化很大,当求解速率方程时,必须考虑这一变化。

由(1)~(7)式可以得到振荡光输出功率和抽运光功率间的关系式

$$\frac{w_p^2}{w_0^2 l_c} \left\{ \frac{2\tau_f(f_1 + f_2)\eta_b \eta_a P_p}{h\nu_p \pi w_p^2} \times \int_0^\infty \frac{\exp\left[-\left(\frac{w_p^2}{w_0^2} + 1\right)x\right]}{1 + \frac{4f\sigma\tau_f P_{out}}{n\pi w_0^2 Th\nu_L} \exp\left(-\frac{w_p^2}{w_0^2}x\right)} dx - \frac{ln\left(1 + \frac{4f\sigma\tau_f P_{out}}{n\pi w_0^2 Th\nu_L}\right)}{\frac{w_p^2}{w_0^2} \times \frac{4f\sigma\tau_f P_{out}}{n\pi w_0^2 Th\nu_L}} \right\} = \frac{n}{\tau_c \sigma}, \quad (8)$$

式中 w_0 为 P_p 的函数。

当抽运光功率和谐振腔腔型已知时,可以由(5)~(7)式求出振荡光的光斑半径。将其代入(8)式可求出总的光子数,即输出光功率。同样以平腔为例,求解(8)式。

图 3 给出了不同抽运光半径大小,同一腔型结构 (L_1, L_2 都为 5 cm, $R_1, R_2 = +\infty$) 情况下,输出功率和抽运光功率的关系图。从图 3(b)可知,当抽运光功率较小时, w_p 越小,输出功率越高。但是随着抽运光功率的增加,较大的抽运光光斑半径 w_p 反而能获得更高的输出功率。由图 3(c)可知,较小 w_p 情况下的抽运光具有的稳定工作区也较小。所以,在实际应用中,对应于不同的抽运光功率,最佳的 w_p 是不同的。

图 4 给出了抽运光半径为 100 μm 时在不同腔型结构下输出功率随抽运光功率的关系。由图 4 可知,当 $L_1 = 5 \text{ cm}, L_2 = 10 \text{ cm}$ 时,随着抽运功率的增加,输出激光开始振荡,然后消失,最后又出现。

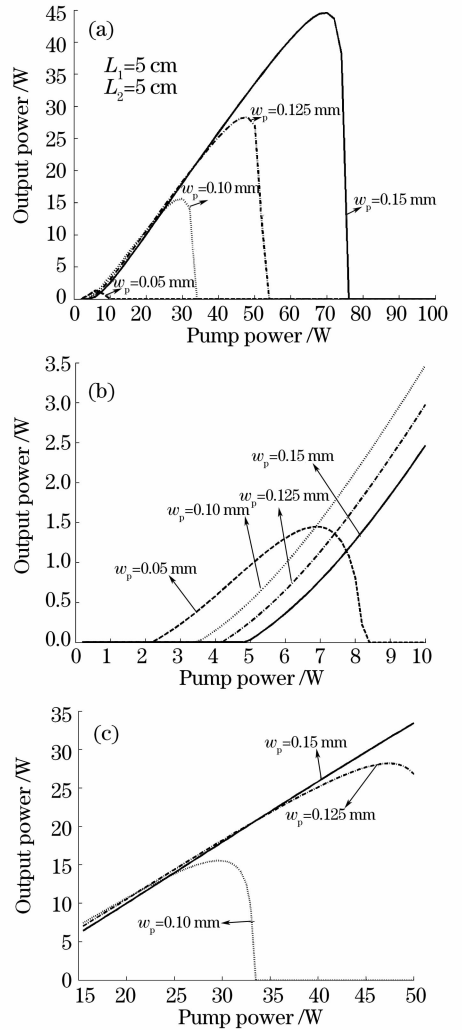


图 3 w_p 不同时输出光功率随抽运光功率的变化

Fig. 3 Variations of output laser power with the pump power under the condition of different w_p

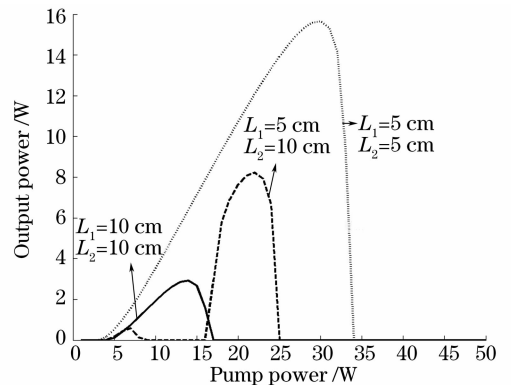


图 4 不同腔型结构下输出光功率随抽运光功率的变化
Fig. 4 Variation of output laser power with the pump power under the condition of different cavity structures

这是因为,激光开始工作在第一稳定区,后来随着抽运光功率的增大,进入非稳区,不再有激光输出;抽

运光功率再增大后,进入了第二稳定区,再次出光。另外,当腔长增大后,激光输出功率降低,这是因为腔长增大,振荡光斑半径增大,改变了 ω_p 和 ω_0 的比值。

图5给出了当 L_1 和 L_2 都为5 cm时,不同激光晶体长度情况下,抽运光功率和输出功率的关系。由图5可知,当抽运光功率相同时,不同晶体长度下将获得不同的输出功率。所以,为获得最大的输出功率,选择最佳晶体长度时需要考虑抽运光功率。这里所说的最佳晶体长度不同于2.1节中提到的最佳工作长度,也就是说,获得最小阈值的晶体长度并不是能获得最高输出的晶体长度。

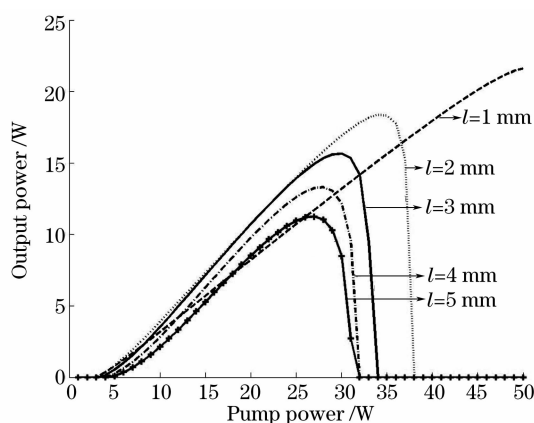


图5 不同晶体长度下输出光功率随抽运光功率的变化
Fig. 5 Variation of output laser power with the pump power under the condition of different laser crystal lengths

3 实 验

室温下抽运了一块3 mm长,掺杂原子数分数为5%的Yb:YAG晶体,其总粒子数为 $N_0 = 6.9 \times 10^{20}$ ions/cm³。其 $f_1 = 0.046$, $f_2 = 0.70$ 。抽运激光的波长为930 nm,测量的吸收系数为 $\alpha = 3.31$ cm⁻¹。耦合输出镜的反射率为95.4%。发射截面 $\sigma = 3.3 \times 10^{-20}$ cm² ($\sigma_{\text{eff}} = f_2 \times \sigma \sim 2.3 \times 10^{-20}$ cm²),上能级寿命 $\tau_t = 0.951$ ms。实验中采用了脉冲宽度为1000 μ s,重复频率为10 Hz的激光二极管(LD)抽运光源。因为抽运源并非连续光源,所以在计算与热透镜相关的项时采用的是平均功率,在计算与速率方程有关的项时采用的是峰值功率。而理论分析都是在连续抽运的情况下进行的。由于脉冲宽度大于晶体的上能级寿命,且晶体处于自由运转状态,所以当抽运功率较大于阈值时,可以近似认为工作在稳定状态。

在 $L_1 = 35$ mm, $L_2 = 90$ mm, $L_1 = 35$ mm, $L_2 = 350$ mm以及 $L_1 = 35$ mm, $L_2 = 500$ mm的三种腔型结构下,测量了输出光功率。实验的抽运光斑半径为500 μ m,由(6)式可以算得 K 为37。将其代入求解,图6分别给出了三种腔型下的实验和模拟结果。

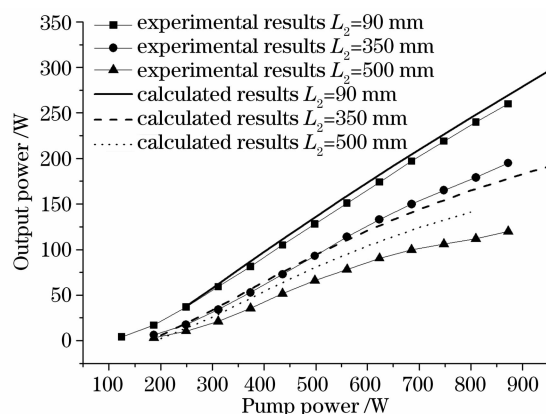


图6 实验和模拟输出光功率随抽运光功率的变化关系
Fig. 6 Variation of output laser power with the pump power both in experiments and stimulations

由图6可以看到,模拟结果和实验结果基本相符,但有一定偏差,这是因为实际的热透镜系数 K 和由(6)式计算的 K 有一定的偏差,(6)式只是一个近似计算,只有在几个严格的条件下才成立^[7]。且模型是建立在连续运转的条件下的,而实际采用的是具有较长脉宽的准连续抽运光,并没有完全工作在稳定状态,所以若采用稳定状态下的解必然和实验会有误差。由图6可见,在同样的抽运功率下,激光输出功率不一样。这是因为不同腔型下由激光晶体的热透镜效应所获得的激光光斑半径不一样,从而影响了激光输出的功率。因此在抽运光功率一定的情况下,应该设计腔型以获得合适的光斑半径从而得到最大输出功率。需要指出的是,倘若抽运光功率进一步增加,激光光斑半径会出现较大变化(如图2所示),因此输出功率与抽运功率再也不是线形增加关系(如图4所示),所以当腔型一定时,并不是抽运光功率越大越好,但由于抽运源峰值功率最高只有约900 W,所以并没有看到输出功率下降的部分。

4 结 论

介绍了一种LD端面抽运准三能级Yb:YAG激光器的新模型。提出了考虑振荡光斑半径随抽运功率变化的速率方程,并进行了数值求解及分析。由该模型可知,腔型结构不同,即使抽运光功率相

同,输出光功率大小也不同。因此,当设计连续抽运的激光器腔型结构时,应该考虑抽运光功率,以选择合适的腔型、激光晶体长度及抽运光斑半径,以获得最大的输出功率。

参 考 文 献

- 1 Yang Peizhi, Deng Peizhen, Xu Jun *et al.*. Spectroscopy and laser performance of Yb³⁺ doped YAG crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1):132~135
杨培志,邓佩珍,徐 军等. Yb:YAG 晶体的光谱和激光性能[J]. 光学学报, 1999, **19**(1):132~135
- 2 Liu Qiang, Lu Fuyuan, Gong Mali *et al.*. kW-class laser diode pumped Yb:YAG slab lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33** (Suppl.):1~5
柳 强,陆富源,巩马理等. 千瓦级激光二极管抽运 Yb:YAG 板条激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(增刊):1~5
- 3 Qiu Hongwei, Yang Peizhi, Zhao Guangjun *et al.*. Thermal properties of Yb:YAG crystal and its influence on laser

- properties [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4):501~504
邱宏伟,杨培志,赵广军等. Yb:YAG 晶体的热学性质及其对激光性能的影响[J]. 光学学报, 2002, **22**(4):501~504
- 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 Takunori Taira, William M. Tulloch, Robert L. Byer. Modeling of quasi-three-level lasers and operation of CW Yb:YAG lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(9):1867~1874
 - 6 F. Augé, F. Druon, F. Balembois *et al.*. Theoretical and experimental investigations of a diode-pumped quasi-three-level laser: the Yb³⁺-doped Ca₄GdO(BO₃)₃ (Yb:GdCOB) laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(5):598~606
 - 7 Vittorio Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1):107~117
 - 8 Sebastien Chenais, Frederic Druon, Sebastien Forget *et al.*. On thermal effects in solid-state lasers: the case of ytterbium-doped materials [J]. *Progress in Quantum Electron.*, 2006, **30**:89~153

《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:zhgig@mail.shenc.ac.cn

咨询电话:021-69918427