

文章编号: 0258-7025(2007)03-0318-05

离焦量对等离子体冲击波力学效应的影响

章玉珠, 王广安, 朱金荣, 沈中华, 倪晓武, 陆 建

(南京理工大学应用物理系, 江苏 南京 210094)

摘要 为研究激光等离子体冲击波力学效应受入射激光及环境因素的影响, 利用波长 $1.06 \mu\text{m}$, 脉冲能量 320 mJ , 脉宽 10 ns 的 Nd:YAG 激光作用在 Al 靶上, 研究了冲量耦合系数 (C_m) 和离焦量 (Z) 之间的关系。实验发现在 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 情况下, 初始时 C_m 随 Z 增大而增大, 到 $Z = -12 \text{ mm}$ 附近达到最大值; 而后 C_m 随 Z 增大而减小。在 4000 Pa 时, C_m 随 Z 的变化关系与 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时相似, 但峰值位置后移。离焦量不同时, 由于作用激光的功率密度不同而影响等离子体屏蔽效果; 光斑大小不同将影响稀疏波作用, 且离焦量正负不同时激光等离子体冲击波对靶的作用机制也明显不同, 这些因素决定了离焦量对等离子体冲击波力学效应的影响。

关键词 激光技术; 离焦量; Nd:YAG 激光器; 冲量耦合系数

中图分类号 O 53; TN 249 文献标识码 A

Influence of Defocusing Distance on Mechanical Effect of Plasma Shock Wave Induced by Laser

ZHANG Yu-zhu, WANG Guang-an, ZHU Jin-rong,

SHEN Zhong-hua, NI Xiao-wu, LU Jian

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract Influence of incoming laser beam and environmental factor on mechanical effect of plasma shock wave was studied. The experiment was performed by focusing output pulses of the Nd:YAG laser at $1.06 \mu\text{m}$ wavelength with 10 ns pulse width and 320 mJ pulse energy on aluminum targets mounted on a ballistic pendulum. The impulse coupling coefficients C_m was determined as a function of target defocusing distance Z at $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$. The impulse coupling coefficient increases slowly with the increasing of defocusing distance, and gets maximum quantity at defocusing distance about -12 mm . And then impulse coupling coefficient decreases sharply with the increasing of defocusing distance. The function at $4 \times 10^3 \text{ Pa}$ is similar to it at $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, except that the maximum at a larger defocusing distance. The intensity and the diameter of the laser spot are different at the different defocusing distance, so the rarefaction wave effect and the plasma shielding effect are different too. And the mechanical effects of plasma shock wave on target at different defocusing distance are also different. All these factors dominate the influence of defocusing distance on mechanical effect of plasma shock wave induced by laser.

Key words laser technique; defocusing distance; Nd:YAG laser; impulse coupling coefficient

1 引 言

激光作用在靶面时, 所产生的等离子体冲击波对靶的反冲作用使靶获得冲量, 完成激光能量向靶材的传递。冲量耦合系数 C_m 是描述单位激光能量

转换动量的物理量, 也是衡量激光等离子体冲击波力学效应的重要物理量。研究表明冲量耦合系数同作用激光参数、靶材具体参数以及环境参数都密切相关。从 20 世纪 60 年代各国研究者就开始了对于

收稿日期: 2006-05-09; 收到修改稿日期: 2006-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(60578015)和高等学校教学科研奖励计划资助项目。

作者简介: 章玉珠(1974—), 女, 辽宁人, 讲师, 博士研究生, 主要从事激光和物质相互作用方面的研究。

E-mail: njzyz@sohu.com

导师简介: 陆 建(1965—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为激光和物质相互作用机制与测试技术研究。

E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn

各种参数的研究。David 等^[1]的研究表明对任一靶材有一个适合的激光能量密度,可使冲量耦合系数达到最大值,继续增加能量密度,耦合系数反而会下降。C. R. Phipps 等^[2,3]提出了激光与靶相互作用的模型可以近似地预测冲量耦合系数,冲量耦合系数和烧蚀压力相关,在真空中由单次脉冲能量密度(I),波长(λ),脉宽(τ)等参数决定。之后在众多实验数据基础上提出完全离子化等离子体情况的冲量耦合系数的模型。Mary Nehls 等^[4]的实验表明同样的靶材料不同的表面情况会导致冲量耦合系数的不同,金属表面发黑处理后,表面吸收率加大,耦合系数也大,之后的多层靶材实验获得了远大于单层靶材的冲量耦合系数。A. V. Pakhomov 等^[5~9]分别用推力直接测量、飞行时间计数器和 ICCD 高速照相三种不同方法测量了激光作用于不同材料靶的比冲。得到比冲随着原子量增加而降低,推力随着原子量的增加而增加的结论。国内近几年也做了大量相关研究,倪晓昌等^[10]、李成斌等^[11]研究了飞秒激光和材料的相互作用;郑义军等^[12]研究了大气压强对冲量耦合系数的影响,测得冲量耦合系数随气压先升高而后下降,且存在峰值。在实际激光和靶材相互作用过程中,靶材所处位置非常重要。若用离焦量表示靶所处位置和激光焦斑的相对位置,则当离焦量不同,且作用激光功率密度、光斑大小均不同时,激光对靶的作用机制也不同,所以根据需要进行选择合适的离焦量是必要的。郑志远等^[13]研究了激光等离子体动量转换效率和靶位置的关系,但和 M. Bass 等^[14]研究的真空中冲量耦合系数和离焦量的关系不甚吻合。本文报道了分别在 1.01×10^5 Pa 和 4000 Pa 环境下离焦量对冲量耦合系数影响的实验结果并进行了相关的讨论。

2 实验装置与原理

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。实验采用 Nd:YAG 脉冲激光器,相关技术参数为波长 $1.06 \mu\text{m}$,脉宽 10 ns,单脉冲能量 320 mJ。激光器输出的脉冲激光经过反射镜和分光镜后,通过一个焦距为 147 mm 的凸透镜经过真空箱的玻璃窗作用在圆形平面铝靶上。真空箱通过真空泵获得不同真空度,且由气压表显示。真空箱内有一单摆,当激光作用时该单摆将产生微摆动,靶的摆速由光电传感器测得。He-Ne 激光器发出的波长为 632.8 nm 激光作为探测光

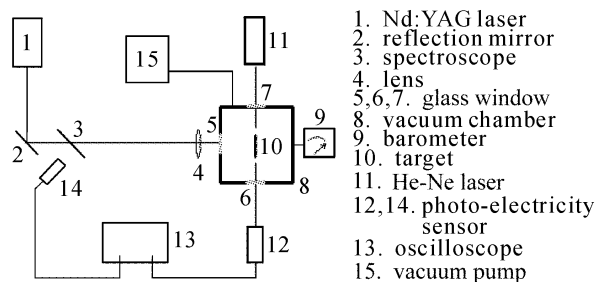


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

束,通过玻璃窗照在靶上。当靶偏离平衡位置时,通过玻璃窗照在光电传感器上的光强最强;当靶回到平衡位置时光电传感器上接收的光强最弱。将光电传感器接入示波器,通过示波器的电位对时间的变化信号得出靶经过光电传感器通光缝宽的时间。

2.2 冲量耦合系数的计算

如图 2 所示,靶通过光电传感器细缝的时间 Δt 由光电传感器测得,靶通过细缝的角位移 $\Delta\theta = \frac{D}{l}$,靶通过时的角速度 $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$,靶的动量 $P = \frac{L}{l} = \frac{I\omega}{l}$ (式中 L 为角动量, I 为靶摆的转动惯量),冲量耦合系数 $C_m = \frac{P}{E} = \frac{I\Delta\theta}{E\Delta t l} = \frac{ID}{E\Delta t l^2}$ 。

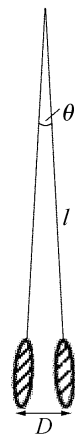


图 2 靶通过透光缝时摆线和摆角、缝宽关系图

Fig. 2 Relationship between pendulum angle, pendulum thread and slot width

3 实验结果和讨论

实验参量示意图如图 3 所示,在离焦量 Z 不同情况下,靶面光斑直径 d ,靶面功率密度 I 的具体参数见表 1。由于 $Z > 0$ 时存在靶前焦斑处的空气击穿,辐照在靶面的实际功率密度难以计算,因而表 1 中仅给出了 $Z \leq 0$ 时的参数。

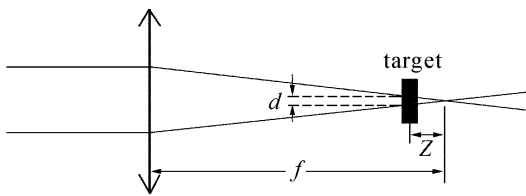


图3 实验参量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experiment parameter

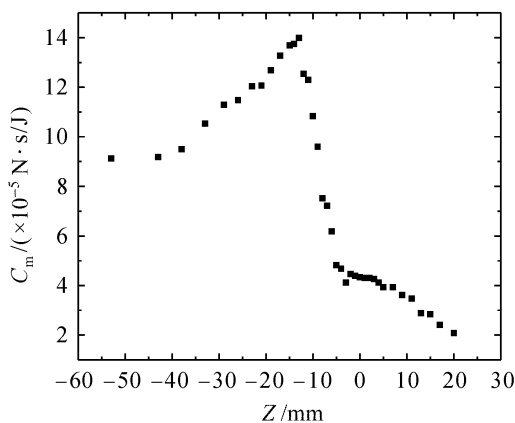
表1 离焦量、光斑直径和作用激光功率密度间的实验数据

Table 1 Experimental data of Z , d and I

Z /mm	d /mm	I /(10^8 W/cm 2)	Z /mm	d /mm	I /(10^8 W/cm 2)
-56	3.36	3.6	-21	1.64	15.1
-54	3.00	4.5	-18	1.38	21.4
-51	2.96	4.6	-15	1.20	28.3
-48	2.85	5.0	-12	1.10	33.6
-45	2.60	6.0	-10	0.90	50.3
-42	2.50	6.5	-8	0.80	63.6
-39	2.30	7.7	-6	0.60	13.2
-36	2.20	8.4	-4	0.56	129.9
-33	2.10	9.2	-2	0.40	254.7
-27	1.92	11.0	0	0.30	452.9
-24	1.84	12.0			

3.1 大气环境

大气环境下冲量耦合系数和离焦量的关系如图4所示。由图4给出的曲线看出冲量耦合系数在离焦量为负值时缓慢上升,在 $Z = -12$ mm左右达到峰值,而后随离焦量的增加迅速降低。

图4 空气中 C_m 和 Z 的关系Fig. 4 Relationship between C_m and Z in air

离焦量 Z 为负值时激光对靶的作用以烧蚀为主,由表1可见当离焦量由 $Z = -56$ mm变化到 $Z = -12$ mm时,作用于靶面的光斑直径由3.36 mm减小到1.10 mm,对应的作用激光功率密度由

3.6×10^8 W/cm 2 增大到 3.36×10^9 W/cm 2 。由 Pirri 的理论^[15]可知,对于给定入射激光功率密度 I_0 时激光支持爆破波(LSD波)的最低波速为 $D = [2(\gamma^2 - 1)I_0/\rho_0]^{1/3}$,根据 Jouguet 条件可以导出激光支持爆破波后等离子体的密度 ρ_1 ,压力 P_1 和粒子速度 u_1 表示式为

$$\begin{cases} \rho_1 = (\gamma + 1)\rho_0/\gamma \\ P_1 = \rho_0 D^2/(\gamma + 1) = \\ 4^{1/3}(\gamma - 1)^{2/3}(\gamma + 1)^{-1/3}\rho_0^{1/3}I_0^{2/3}, \\ u_1 = D/(\gamma + 1) = \\ [2(\gamma^2 - 1)]^{1/3}(\gamma + 1)^{-1}\rho_0^{-1/3}I_0^{1/3} \end{cases} \quad (1)$$

可得等离子体介质对靶表面压力 P_T 为

$$P_T = [(\gamma + 1)/2\gamma]^{2\gamma/(\gamma-1)} P_1, \quad (2)$$

式中 ρ_0, γ 为靶周围大气密度和等熵指数。式(1)和(2)表明,靶面所受压力和 $I_0^{2/3}$ 成正比,即作用激光功率密度增加,冲量耦合系数也相应地增加。由表1可知,当 Z 变大时,靶位置接近焦斑,辐照于靶面的光斑的功率密度增大,根据式(1)和(2),功率密度变大将导致靶面所受压力增大,冲量耦合系数增大。

图4中在冲量耦合系数达到最大之后,随 Z 增大冲量耦合系数减小。可以认为导致冲量耦合系数下降的因素主要有两个:稀疏波的影响和等离子体屏蔽。首先由于本实验焦斑面积较小,按照 Phipps 等^[2]给出的标准,只有在光斑大于一定限制时,才可以不考虑稀疏波的影响,按一维模型计算

$$D_s > 1500A^{7/16}\lambda^{7/4}\tau^{7/8}I_0^{3/4}, \quad (3)$$

$$D_s > 2C_a\tau, \quad (4)$$

式中 D_s 为一维模型光斑最小值, A 为靶材原子量, λ 为激光波长, τ 为激光脉宽, I_0 为激光功率密度, C_a 为声速。

式(3)表明,作用激光功率密度越大,要求光斑半径越大,即功率密度越大,二维稀疏波的影响越大。Elliot L. Klosterman 等^[16]的研究结果表明激光光斑越小,激光支持爆破波速度越快,结合式(4),激光支持爆破波速越快,一维模型要求光斑越大,二维稀疏波影响越强,这也说明随着 Z 变大,光斑变小,稀疏波作用加强,使耦合系数减小。

另外随光斑变小,入射激光功率密度增加,等离子体密度增加,当等离子体密度足够大以后形成了一个对后续激光能量有高吸收率的薄层,造成等离子体屏蔽。由文献[1],每种材料都有对应最大 C_m 的最佳功率密度,大于该功率密度时, C_m 反而会下降。刘常龄等^[17]的研究在理论和实验上均证实等离子体吸收系数随功率密度线性增长,等离子体吸

收系数为

$$K_{\text{abs}} = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0}{I}, \quad (5)$$

式中 L 为蒸气羽的几何厚度, I_0 为入射激光功率密度, I 为透过等离子体羽辐照到靶上的功率密度。即随着功率密度增加, 透射到靶上的激光能量在减小, 则激光能量转化为靶动量的效率在降低, 即 C_m 减小。

当 $Z > 0$ 以后, 激光对靶的作用机制发生变化, 靶受到三种力的作用: 1) 焦点空气发生光学击穿产生的爆轰波的反冲作用; 2) 在空气发生击穿前辐照到靶面的能量, 以及在空气击穿过程中透过到靶面的激光能量导致靶面空气击穿, 由此产生的爆轰波的反冲作用; 3) 质量迁移的反冲作用。由于存在焦斑位置的空气击穿, 能量大部分耗散在空气中, 耦合到靶上的能量随 Z 增大变少, 冲量耦合系数也随之减少。

3.2 低气压环境

当气压为 4000 Pa 时, C_m 随 Z 的变化关系和空气中类似, 但峰值位置向后移到 $Z = 5$ mm 左右, 如图 5 所示。实验获得的曲线在后半段和 M. Bass 等^[14] 在真空中得出的结论一致, 但前半段不甚相符。

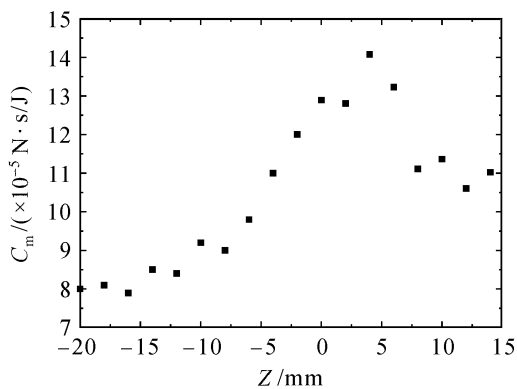


图 5 4000 Pa 时 C_m 和 Z 的关系

Fig. 5 Relationship between C_m and Z at 4000 Pa

在真空环境下, 激光对靶的冲量耦合主要来自激光烧蚀导致靶面质量迁移时产生的反冲作用, 以及靶面物质击穿产生的等离子体冲击波的反冲。A. V. Pakhomov 等^[18] 在实验中发现, 当压强增大到 1330 Pa 时靶面空气击穿产生的等离子体爆轰波的反冲作用已经在靶的冲量耦合中占主导地位, 所以这里已经不能用真空的规律解释。实验结果表明压强为 4000 Pa 时, 激光对靶的作用机制和空气中类似, 而此时由于空气密度小, 环境压强小, 稀疏波影

响较弱, 等离子体密度相对较低, 等离子体屏蔽的影响也较小, 所以 C_m 随功率密度增大而增大。但实验中峰值位置出现在焦斑后, 这说明在 4000 Pa 时出现焦斑处空气击穿产生的爆轰波和靶面空气击穿产生的爆轰波的共同作用效应较强。

4 结 论

通过实验研究了波长为 1.06 μm , 脉冲能量为 320 mJ, 脉宽为 10 ns 的 Nd:YAG 激光作用在 Al 靶时 C_m 和 Z 之间的关系, 并对结果进行了分析。得到的主要结论: 环境压强为 1.01×10^5 Pa 时, 在 $-53 \text{ mm} \leq Z < 23 \text{ mm}$ 区间内, 当 Z 逐渐增大时, C_m 随 Z 增大而增大, 在 $Z = -12 \text{ mm}$ 附近, 达到最大值; 之后 C_m 随 Z 增大而迅速减小。 C_m 峰值对应的离焦量位置不完全与文献^[11] 给出的几何焦点位置相同, 这与入射激光能量相关。

另外, 环境压强为 4000 Pa 时, 激光与靶的相互作用机制和 1.01×10^5 Pa 时相差不大, 这是因为此时稀疏波的作用和等离子体屏蔽作用都较弱, 因而 C_m 峰值后移。研究结果对激光推进中光船造型以及推进模式的选择有积极的意义。

参 考 文 献

- David W. Gregg, Scott J. Thomas. Momentum transfer produced by focused laser Giant pulses [J]. *J. Appl. Phys.*, 1966, **37**:2787~2789
- C. R. Phipps Jr., T. P. Turner, R. F. Harrison *et al.*. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**(3):1083~1096
- C. R. Phipps, J. R. Luke, G. G. Mcduff *et al.*. Laser-driven micro-rocket [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **77**(2):193~201
- Mary Nehls, David Edwards, Perry Gray. Ablative laser propulsion using multi-layered material systems [C]. AIAA, 33rd Plasmadynamics and Lasers Conference, 2002. 2154
- A. V. Pakhomov, M. S. Thompson, D. A. Gregory *et al.*. Specific impulse study of ablative laser propulsion [C]. 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2001. 3663
- Andrew V. Pakhomov, M. Shane Thompson, Don A. Gregory. Ablative laser propulsion efficiency [C]. AIAA, 33rd Palamodynamics and Lasers Conference, 2002. 2157
- Andrew V. Pakhomov, Jun Lin, Timothy Cohen. Two-pulsed ablation of graphite and other elementary propellants for ablative laser propulsion [C]. AIAA, 34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2003. 3863
- Jun Lin, Andrew V. Pakhomov, M. Shane Thompson. The study on plasma plume dynamics and specific impulse using ICCD imaging for ablative laser propulsion [C]. AIAA, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint propulsion Conference and Exhibit, 2003. 4427
- Andrew V. Pakhomov, Jun Lin, M. Shane Thompson. Specific impulse of ablative laser propulsion [C]. AIAA, 42nd

- AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2004. 651
- 10 Xiaochang Ni, Qingyue Wang, Yingzhong Wu. Femtosecond laser ablation of Au film around single pulse threshold [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4):225~227
- 11 Li Chengbin, Jia Tianqing, Sun Haiyi *et al.*. Femtosecond laser-induced damage and ultrafast dynamics in high reflection coating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):458~462
李成斌,贾天卿,孙海轶等. 飞秒激光对高反膜的破坏及其超快动力学过程[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):458~462
- 12 Zheng Yijun, Gong Ping, Tan Rongqing *et al.*. Experimental study of coupling coefficients for air-breathing mode laser propulsion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):879~893
郑义军,龚平,谭荣清等. 大气模式激光推进耦合系数的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):879~893
- 13 Zheng Zhiyuan, Lu Xin, Zhang Jie *et al.*. Experimental study on the momentum coupling efficiency of laser plasma [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(1):192~196
郑志远,鲁欣,张杰等. 激光等离子体动量转换效率的实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(1):192~196
- 14 M. Bass, M. A. Nassar, R. T. Swimm. Impulse coupling to aluminum resulting from Nd: glass laser irradiation induced material removal [J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, **61**(3):1137~1144
- 15 Anthony N. Pirri. Theory for momentum transfer to a surface with a high-power laser [J]. *Phys. Fluids*, 1973, **16**(9):1435~1440
- 16 Elliot L. Klosterman, Stanley R. Byron. Measurement of subsonic laser absorption wave propagation characteristics at 10.6 μm [J]. *J. Appl. Phys.*, 1974, **45**(11):4751~4759.
- 17 Liu Changlin, Luo Fu, Liu Xufa *et al.*. Investigation of incident laser absorption by vapor plume plasmas [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1990, **2**(3):366~371
刘常龄,罗福,刘绪发等. 蒸气羽等离子体对入射激光吸收的研究[J]. *强激光和粒子束*, 1990, **2**(3):366~371
- 18 Andrew V. Pakhomov, Jun Lin, Kenneth A. Herren. Effect of air pressure on propulsion with TEA CO₂ laser [C]. *SPIE*, 2004, **5448**:1017~1027

《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