

文章编号: 0253-2239(2008)08-1547-05

激光诱导介质击穿中的脉冲截断问题

韩敬华^{1,2} 冯国英¹ 杨李茗² 张秋慧¹ 贾俊¹ 王绍朋¹ 谢旭东² 朱启华²

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064; ² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 强激光与介质相互作用过程中,当自由电子的密度达到介质的损伤阈值时,介质将被击穿,脉冲的后续能量被激光等离子体强烈吸收而引发截断,这个时间点定义为截断时间点。脉冲的截断时间点对激光脉冲能量的传输有很大的影响。理论研究了入射激光脉冲能量对脉冲截断时间点分布的影响,定量分析和模拟了截断时间点对脉冲能量透过率的影响,模拟结果和实验结果符合很好。研究发现:激光脉冲能量透过率由脉冲截断时间点的位置决定。当脉冲截断时间点分布在脉冲前沿、峰值和后沿时,激光脉冲能量的透过率分别对应小于 50%,等于 50% 和大于 50%。在线测量激光脉冲能量的透过率也可作为一种在线检测光学元件是否发生破坏的方法。

关键词 激光技术; 激光诱导击穿; 截断时间点; 移动损伤模型; 能量透过率

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082808.1547

Study on Cut-Off Laser Pulse of Laser-Induced Dielectric Breakdown

Han Jinghua^{1,2} Feng Guoying¹ Yang Liming² Zhang Qiuhui¹ Jia Jun¹

Wang Shaopeng¹ Xie Xudong² Zhu Qihua²

(¹ School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)
(² Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In the process of the laser-matter interaction, when the density of the free electron reaches the damage threshold, the dielectrics will be broken down. Then, the subsequent part of the pulse energy will be strongly absorbed by the laser plasma, the light will be suspended, and this moment is defined as the cut-off time. The cut-off time makes a tremendous impact on the transmission of laser pulse energy. The effects of the input pulse energy on the cut-off time and the cut-off time on the pulse energy transmissivity are discussed. The corresponding quantitative analysis and simulation are carried out, the simulation results and experimental results fit well. The pulse energy transmissivity is determined by the location of cut-off time. When the distribution of cut-off time at the pulse front edge, on the peak value and at the pulse back edge, the laser pulse energy transmittance will be less than 50%, equal to 50% and greater than 50% respectively. The on-line measurement of the laser pulse energy transmissivity also can be used for online inspection of damage of optical elements.

Key words laser technique; laser induced breakdown; cut-off time; moving breakdown model; energy transmissivity

1 引 言

当入射激光脉冲能量较小时,透明介质对激光能量的吸收很小。当脉冲能量足够大时,介质将通过多光子电离和雪崩电离作用产生大量自由电子,自由电子密度对介质和后续激光脉冲能量都有很大的影响^[1~6]。激光等离子体对介质的作用主要有击

穿作用、激光等离子体膨胀产生的冲击波破坏作用等,对后续脉冲能量的作用主要是在高自由电子密度下的逆韧致吸收作用,但这两者是相互联系、不可分离的过程^[7~15]。

当高功率激光脉冲在介质中传输时,脉冲前沿首先与介质作用激发大量自由电子,当自由电子密

收稿日期: 2007-12-12; 收到修改稿日期: 2008-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(10676023)资助课题。

作者简介: 韩敬华(1976—),男,博士研究生,主要从事光与物质相互作用方面的研究。E-mail: hjh_scu@163.com

导师简介: 冯国英(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事激光与光通信、新型激光技术等方面的研究。

E-mail: guoying_feng@yahoo.com.cn (通信联系人)

度达到介质的损伤阈值(一般透明介质为 10^{17} cm^{-3} 到 10^{18} cm^{-3})时,激光等离子体会对后续激光能量产生强烈吸收,使得后续激光脉冲的透过能量极小,通过示波器可以观察到脉冲透过能量在时间上发生了截断^[13,16]。脉冲截断后,后续激光与激光等离子体的相互作用可以分为被沉积、反射、散射和透过,其中反射、透过和散射的激光能量较少,大部分能量沉积在激光等离子体中^[7~9]。沉积在介质中能量的多少直接影响了介质损伤的程度和范围,因此,激光脉冲的透过率可作为判定介质是否发生击穿以及击穿范围大小的一个重要参考量。

本文首先对不同激光脉冲能量聚焦通过 K9 玻璃时脉冲的透过能量和透过率进行了测量。采用移动损伤模型,针对实验所用的激光脉冲能量、脉宽等参量,从理论上确定相应的截断时间点,在脉冲作用时间上的位置,给出截断时间点的分布规律,进一步定量模拟了相应的激光脉冲能量透过率。理论结果和实验结果符合较好。

2 实 验

采用图 1 所示的实验装置来研究激光脉冲的透过能量随入射激光脉冲能量变化的规律。采用的激光器为镭宝光电技术有限公司(LABest Optronics Co. Ltd)的 SGR-10 固体脉冲激光器,其输出的激光脉冲为近高斯脉冲,波长为 1064 nm,脉宽(半峰全宽)为 18 ns,输出能量的波动小于 3%。He-Ne 激光器用于整个光路的调整,输出的激光脉冲通过凸透镜(焦距 $f=10 \text{ cm}$)聚焦进入 K9 玻璃的中间。玻璃尺寸为 $17 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$,表面粗糙度小于 5 nm。透过的激光脉冲能量先通过分光镜,再通过衰减片衰减后进入能量计探头,探头将测得的数据输入计算机后自动保存。其中分光镜对脉冲能量的

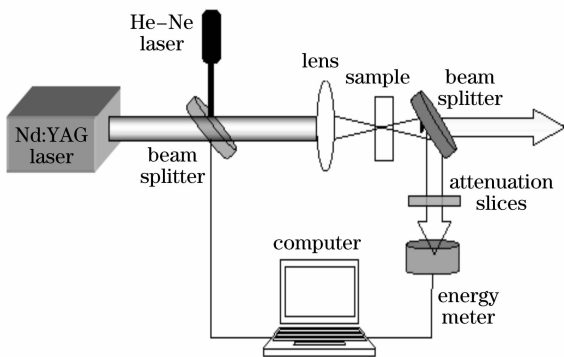


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

反射率和透过率之比为 2:8,衰减片的能量透过率为 10%,能量计的测量范围为 $200 \mu\text{J} \sim 10 \text{ J}$ 。

直径为 D 的高斯光束经聚焦后,其聚焦半径 w'_0 和 1/2 瑞利距离 z_R 与波长 λ 、透镜焦距 f 、介质折射率 n 的关系为

$$w'_0 \approx f\lambda/D, \quad (1)$$

$$z_R = n \cdot \frac{\pi w'_0{}^2}{\lambda}, \quad (2)$$

实验中采用的参量为 $D = 0.75 \text{ cm}$ 、 $f = 10 \text{ cm}$ 、 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 、 $n = 1.52$,则 $w'_0 = 14.2 \mu\text{m}$ 、 $z_R = 905 \mu\text{m}$ 。

3 理论分析

激光脉冲在时间上为高斯型分布时可表示为^[17]

$$P(t) = P_{\max} \exp[-(4 \ln 2)(t/\tau_p)^2], \quad (3)$$

式中 P_{\max} 为脉冲峰值功率, τ_p 为脉冲半峰全宽(FWHM), t 为脉冲作用时间。假设介质最先发生击穿的时间点为 T_{cut} ,则对应的激光脉冲能量透过率 η_{tr} 和透过能量 Q_{tr} 分别为

$$\eta_{\text{tr}} = \frac{\int_{-\infty}^{T_{\text{cut}}} \exp[-(4 \ln 2)(t/\tau_p)^2] dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-(4 \ln 2)(t/\tau_p)^2] dt}, \quad (4)$$

$$Q_{\text{tr}} = Q\eta_{\text{tr}}, \quad (5)$$

式中 Q 为单个激光脉冲的能量。脉冲的截断时间点,在脉冲作用时间上的位置决定了相应的激光脉冲透过率。

3.1 脉冲的截断时间点与入射脉冲能量的关系

高斯脉冲经过聚焦后,功率密度随脉冲距离焦点位置 z 以及脉冲作用时间 t 的关系为

$$I(z, t) = \frac{P_{\max}}{\pi w^2(z)} \exp[-(4 \ln 2)(t/\tau_p)^2], \quad (6)$$

由(6)式可见,当脉冲峰值功率一定时,在焦点处($z = 0$)激光脉冲的功率密度最大。因此当介质损伤阈值一定时,在焦点处最先发生击穿。若不考虑发生击穿所需的时间,假设激光脉冲的强度一旦超过该损伤阈值介质即发生破坏,则在介质内部产生损伤的时间点和空间位置随入射激光能量的变化关系可以由移动损伤模型^[17~19]推导得出

$$t_{\text{B}}(z) = -\tau_p \left\{ \frac{1}{4 \ln 2} \ln \left[\beta \left(1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2 \right) \right] \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

式中 $\beta = P_{\max}/P_{\text{th}} = Q_{\max}/Q_{\text{th}}$ 为输出激光峰值脉冲

功率(能量)与阈值功率(能量)的比值, P_{th} 和 Q_{th} 分别为介质发生损伤的阈值脉冲功率和能量, $t_B(z)$ 为在 z 点产生损伤的时间点。

聚焦激光脉冲强度的时间和空间分布决定了介质的损伤位置和时间。利用实验参量对不同位置产生击穿的时间点进行模拟, 结果如图 2 所示。

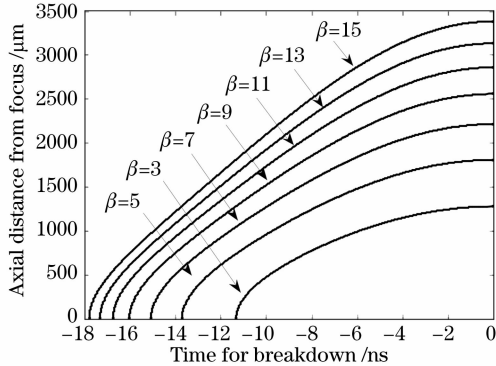


图 2 击穿时间点随聚焦距离的变化

Fig. 2 Time of breakdown versus distance from focus

由图 2 可见, 高斯激光脉冲聚焦通过介质时, 当激光能量小于阈值 ($\beta < 1$) 时, 不会产生损伤, 对应于脉冲阶段时间为 $T_{cut} = +\infty$; 当激光脉冲的峰值光强恰好等于阈值时 ($\beta = 1$), 在峰值经过焦点时发生击穿, 也即在脉冲峰值处发生脉冲能量截断; 随着输入激光脉冲能量的增加 ($\beta > 1$), 脉冲首先在焦点处发生击穿, 随着时间的推移逐渐向逆着激光传输的方向移动。在相同的位置激光脉冲能量越大, 发生击穿的时间越早; 在相同的击穿时间点上, 激光脉冲的能量越大, 产生损伤的位置越远。

当 $\beta \geq 1$ 时, 介质在焦点处首先发生击穿, 击穿时的激光等离子体对后续激光能量会强烈地吸收和反射, 使等离子体对后续激光能量的透过率很小, 可认为是脉冲能量的截断^[16]。所以可定义焦点发生击穿时, 激光脉冲的后续能量发生截断, 则设该时间点为 T_{cut} , 该点就对应于脉冲在焦点处 ($z = 0$) 发生击穿的时间点 $T_{cut} = t_B(0)$ 。当 $\beta = 1$ 时, 恰好在脉冲的峰值处发生击穿, 激光脉冲的后半部分能量被吸收截断, 此时激光脉冲能量透过率为 50%, 实验中测得对应的脉冲能量为 31 mJ。图 3 是离焦点的距离分别为 0、200 μm 、400 μm 、600 μm 和 800 μm 处发生击穿的时间随入射激光脉冲能量的变化关系。

由图 3 可见激光脉冲能量的截断时间 T_{cut} 决定于入射激光脉冲的能量, T_{cut} 随入射脉冲能量的分布可以明显分为两个部分: I 区域和 II 区域。I 区域为入射激光脉冲能量较小 ($\beta < 1$) 时, 由于脉冲的

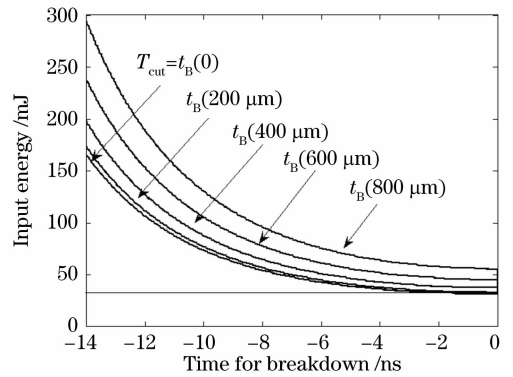


图 3 击穿时间点随入射激光脉冲能量的变化

Fig. 3 Time of breakdown versus incident laser energy
峰值功率达不到介质的损伤阈值, 所以此时脉冲的截断时间点对应于 $T_{cut} \rightarrow +\infty$, 也就是介质不会发生击穿。II 区域为入射激光脉冲能量增大时, 在焦点最先发生击穿的情况, 对应于 $T_{cut} \leq 0$, 而且随着脉冲能量的增大, 发生击穿的时间点提前。Jean-Luc Boduneau 等^[10]曾通过对介质击穿发生的时间随脉冲能量的变化规律进行了实验测试, 变化规律与以上分析相同。

3.2 激光脉冲能量透过特性的变化规律

根据入射激光脉冲的能量, 可以利用移动损伤模型确定发生击穿的时间点 T_{cut} , 进而可以根据 (4) 式和 (5) 式来确定相应能量下激光脉冲的透过能量和透过率。利用实验中的参量, 模拟了激光脉冲的透过能量和透过率随入射激光脉冲能量的变化曲线, 模拟结果和实验结果如图 4、图 5 所示。

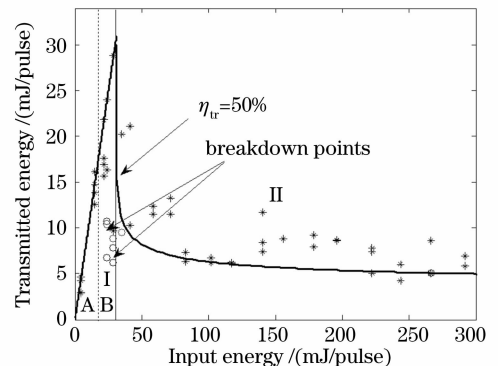


图 4 激光脉冲透过量随入射激光脉冲能量的变化

Fig. 4 Transmitted energy versus input energy of laser pulse

由图 4、图 5 可见, 激光透过能量和透过率曲线可以分为 I (A 和 B 区域) 和 II 两个区域: I 区域对应于 $T_{cut} \rightarrow +\infty$, 此时激光脉冲的峰值功率没有达到介质的损伤阈值 ($\beta < 1$), 所以激光能量全部透过。当 $\beta = 1$ 时, 恰好是在脉冲峰值通过焦点时发生击

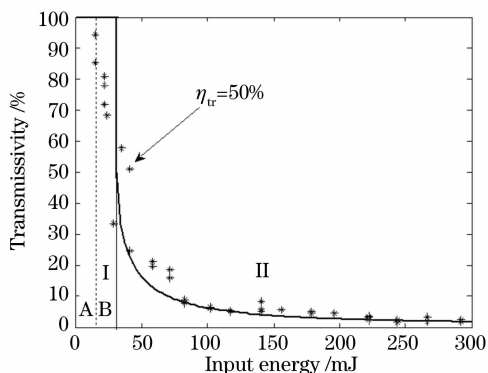


图5 激光脉冲透过率随入射激光脉冲能量的变化

Fig. 5 Transmissivity versus input energy of laser pulse

穿,也就是在峰值处发生击穿,此时脉冲的后续部分被吸收而截断,则激光脉冲能量透过率恰好为50%。当 $\beta > 1$ 时,击穿发生在脉冲前沿,此时激光脉冲能量透过率小于50%,而且随着入射脉冲能量的增加,击穿时间点越向前沿移动,激光脉冲能量透过率越小。

4 理论模拟和实验结果的讨论

对比理论模拟和实验结果可以发现,当激光脉冲透过率小于50%时两者符合很好。但是在I区域明显有两部分(A和B区域),其中A区域对应激光能量脉冲能量透过率为100%,而B区域透过率在 $50\% < \eta_{tr} < 100\%$ 之间,即在脉冲后沿发生击穿。其关键原因在于移动损伤模型对介质击穿的定义是建立在光强是否达到介质损伤阈值的基础上的,一旦光强超过介质的损伤阈值就马上发生破坏^[18,19]。但是介质击穿的本质是自由电子密度增加引起的介质膨胀或熔化,从作用过程分析:首先介质通过非线性电离作用吸收激光能量使介质中自由电子密度增加,自由电子再通过碰撞作用把能量传给晶格,晶格吸收激光能量发生破坏,即物质击穿。由此可见,介质击穿有一个动力学过程。从所需时间范围来分析:光子与电子相互作用的时间大约为1 fs,电子与晶格碰撞直到两者温度平衡的时间大约为几个皮秒,这一弛豫时间远远小于激光的脉宽,所以完全可以认为是瞬时击穿,即当自由电子密度达到一定值(一般为 10^{18} cm^{-3})时介质马上发生击穿破坏^[9,21~23]。

非线性电离作用包括多光子电离和雪崩电离,电离速度与激光脉冲的强度、脉冲宽度以及介质特性等有关^[1,2,23]。当脉冲强度足够大时,自由电子密度积累较快,在脉冲前沿即达到介质击穿的阈值,

就在脉冲前沿发生击穿,此时对应于II区域。若恰好在脉冲的峰值处自由电子密度达到介质的破坏阈值,则在峰值处发生击穿,此时高斯脉冲后半能量被截断,对应于激光脉冲能量透过率为50%。随着激光能量的进一步降低,由于弛豫时间的存在和电子密度的复合作用,会在脉冲后沿达到介质损伤的自由电子密度,则在后沿发生击穿,激光透过率大于50%。当脉冲能量足够小,以至于在整个脉冲作用时间内脉冲激发的自由电子密度不能达到介质击穿的阈值,则激光能量将全部透过,对应于透过率为100%。因此,根据脉冲能量截断发生的时间点的分布可以将其分为脉冲前沿、峰值功率处、后沿和无穷大四种情况,依次对应的激光脉冲能量透过率分别为小于50%、等于50%、大于50%和等于100%。在以上几种情况下已多次观测到脉冲强度的时间截断波形^[13,16]。

5 结 论

从脉冲能量透过率的角度提出了判定介质是否发生击穿的一种新途径,该方法为在线监控高功率激光系统中光学元件的损伤情况提供了一种新的思路。基于移动损伤模型,针对特定的激光脉冲能量、脉宽等参量,确定相应的截断时间点,给出截断时间点的分布规律。理论研究表明,脉冲截断时间点对脉冲能量的透过率起到决定性的作用。而脉冲截断时间的分布,又由脉冲能量和介质击穿阈值决定。当介质的击穿阈值和激光脉宽为定值时,脉冲能量的大小决定了脉冲截断时间点的位置,也就决定了相应的激光脉冲能量的透过率。相应的激光诱导击穿的能量透过率实验研究表明,理论与实验结果符合很好。高功率激光器中的光学元件一般工作在强激光脉冲的作用下,光学元件一旦产生损伤,沉积在玻璃中的激光脉冲能量就会剧增,脉冲能量透过率就会相应地发生剧烈下降,引起光学元件更大范围的破坏。本文的结果提供了一种通过监控激光脉冲透过率和脉冲波形来判断光学元件是否产生损伤的途径。

致谢 感谢李大义教授、陈建国教授的有益讨论。

参 考 文 献

- 1 B. C. Stuart, M. D. Feit, S. Herman *et al.*. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics[J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **53**(4): 1749~1762
- 2 Nicolaas Bloembergen. Laser induced electric breakdown in solids

- [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1974, **QE-10**(3): 375~386
- 3 E. Yablonovitch, N. Bloembergen. Avalanche ionization and the limiting diameter of filaments induced by light pulses in transparent media[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1972, **29**(4): 907~910
 - 4 E. W. Van Stryland, M. J. Soileau, Arthur L. Smirl. Pulse-width and focal-volume dependence of laser-induced breakdown [J]. *Phys. Rev. B*, 1981, **23**(5): 2144~2167
 - 5 Luo Fu, Sun Chengwei, Du Xiangwan. Stress relaxation damage in K9 glass plate irradiated by 1.06 μm CW laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(1): 19~23
罗福, 孙承伟, 杜祥琬. 1.06 μm 连续激光照射下 K9 玻璃板的应力松弛破坏[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(1): 19~23
 - 6 Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Cheng Xiangai *et al.*. Spot size effect of CW laser induced damage threshold in optical materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1055~1058
郭少锋, 陆启生, 程湘爱等. 连续激光辐照下光学材料损伤阈值的光斑效应[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1055~1058
 - 7 J. Noack, A. Vogel. Laser-induced plasma formation in water at nanosecond to femtosecond time scales: calculation of thresholds, absorption coefficients, and energy density[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(8): 1156~1167
 - 8 A. Vopel, K. Nahen, D. Theisen *et al.*. Plasma formation in water by picosecond and nanosecond Nd:YAG laser pulses—Part I. Optical breakdown at threshold and superthreshold irradiance[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 1996, **2**(4): 847~860
 - 9 R. G. Meyerand, Jr., A. F. Haught. Optical-energy absorption and high-density plasma production[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1964, **13**(1): 7~9
 - 10 Jean-Luc Beduneau, Yuji Ikeda. Spatial characterization of laser-induced sparks in air [J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2004, **84**: 123~139
 - 11 D. Du, X. Liu, G. Korn *et al.*. Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO₂ with pulse widths from 7 ns to 150 fs [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(23): 3071~3073
 - 12 K. Nahen, A. Vogel. Plasma formation in water by picosecond and nanosecond Nd:YAG laserpulses. II. Transmission, scattering, and reflection [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 1996, **2**(4): 861~871
 - 13 Y.-L. Chen, J. W. L. Lewis, C. Parigger. Spatial and temporal profiles of pulsed laser-induced air plasma emissions [J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2000, **67**: 91~103
 - 14 Zhou Qinling, Liu Liying, Xu Lei *et al.*. Femtosecond laser induced darkening and refractive index change in K9 glass[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(1): 119~122
周秦岭, 刘丽英, 徐雷等. 飞秒激光辐照 K9 玻璃引起的暗化和折射率的变化[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 119~122
 - 15 Yu Huade, Chen Zhaoyang, Tu Qinfen *et al.*. Non-relativistic intense laser propagation characteristics in the plasmas[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 1~5
余华德, 陈朝阳, 屠琴芬等. 强激光在等离子体中的传播特性[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 1~5
 - 16 D. W. Fradin, Eli Yablonovitch, Michael Bass. Confirmation of an electron avalanche causing laser-induced bulk damage at 1.06 μm [J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(4): 700~709
 - 17 Ching-Hua Fan, Jon P. Longtin. Modeling optical breakdown in dielectrics during ultrafast laser processing [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **27**(17): 3124~3131
 - 18 F. Docchio, P. Regondi, M. R. C. Capon *et al.*. Study of the temporal and spatial dynamics of plasmas induced in liquids by nanosecond Nd:YAG laser pulses. 1: Analysis of the plasma starting times[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(17): 3661~3668
 - 19 F. Docchio, P. Regondi, M. R. C. Capon. Plasmas induced in liquids by nanosecond Nd:YAG laser pulses. 2: Plasma luminescence and shielding[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(17): 3669~3674
 - 20 C. H. Fan, J. Sun, J. P. Longtin. Plasma absorption of femtosecond laser pulses in dielectrics [J]. *J. Heat Transf.*, 2002, **124/125**: 275~283
 - 21 C. W. Carr, H. B. Radousky, A. M. Rubenchik *et al.*. Localized dynamics during laser-induced damage in optical materials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(8): 087401
 - 22 E. G. Gamaly, S. Juodkzakis, K. Nishimura *et al.*. Laser-matter interaction in the bulk of a transparent solid: Confined microexplosion and void formation[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(21): 214101
 - 23 K. Sokolowski-Tinten, J. Bialkowski, A. Cavalleri *et al.*. Transient states of matter during short pulse laser ablation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**: 224~227
 - 24 Dawei Zhang, Shuhai Fan, Weidong Gao *et al.*. Study on absorbance and laser damage threshold of HfO₂ films prepared by ion-assisted reaction deposition [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(5): 305~307