

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0296-03

超短脉冲激光与生物软组织相互作用机理研究

刘莉, 李正佳

(华中科技大学激光技术研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要 详细研究了超短脉冲激光与生物组织相互作用的机理,建立了生物软组织中激光诱导光学击穿模型;结果表明,对于纳秒或亚纳秒脉冲激光,强吸收介质的热电子发射对电子雪崩电离过程有很大影响,等离子体光学击穿阈值随生物组织吸收的增加而降低;在激光脉宽为亚皮秒量级时,多光子电离成为光学击穿的主要机制,介质的击穿阈值几乎与线性吸收系数无关。

关键词 超短脉冲激光; 生物软组织; 等离子体; 光学击穿; 蚀除

中图分类号 O437 文献标识码 A

Investigation on the Mechanism of Ultrashort Pulse Laser Interacting with Soft Tissues

LIU Li, LI Zheng-jia

(Research Institute of laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The mechanism of ultrashort laser interacting with biological tissues was investigated in detail and a model has been developed to calculate irradiance thresholds for laser induced optical breakdown in biological soft tissues. Calculation results show that for nanosecond or subnanosecond laser pulses, initial heating electrons in strongly absorbing media contribute significantly to avalanche ionization and optical breakdown threshold decreases with increasing tissue absorbance; for subpicosecond laser pulses, multiphoton ionization is the main mechanism for optical breakdown which is insensitive to linear absorption.

Key words ultrashort pulse laser; biological soft tissue; plasma; optical breakdown; ablation

1 引言

由于在显微机械加工和各种物质的高精度蚀除等方面展现出的巨大潜力,超短脉冲激光已经引起人们的极大兴趣。超短脉冲激光具有与长脉冲激光完全不同的物质蚀除特性。对于超短脉冲激光来说,光学击穿引起的等离子体蚀除过程发生得极快,传递给晶格的能量非常少,因而对周围组织的热损伤很小^[1]。对激光诱导光学击穿(LIOB)在眼睛或其它含水组织中产生的损伤进行理论研究,在激光防护和激光医学(超精细激光外科手术)领域有重要意义。

本文详细研究了超短脉冲激光与生物组织相互作用的机理,基于Shen的固体级联击穿的速率方程和Keldysh发展的稠合介质中多光子电离模型,建立了生物软组织中的超短脉冲激光光学击穿模型;研究了不同吸收系数的含水组织中,光学击穿阈值随吸收系数、激光脉宽的变化关系以及激光强度、

吸收的能量密度在组织中的分布规律。

2 理论模型

超短脉冲激光与生物组织相互作用时,自由电子密度随时间的变化可以用下式表示^[1]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = (\beta - \gamma)n + \left(\frac{\partial n}{\partial t} \right)_m \quad (1)$$

其中, n 为自由电子密度。等式右边的第一项表示了电子雪崩放大, β (s^{-1})是电子雪崩速率;第二项表示了复合、俘获和从聚焦区向周围扩散导致的电子流失, γ (s^{-1})为电子流失速率,综合了上述几个过程带来的效应。 $(\partial n / \partial t)_m$ 项代表了多光子电离对电子密度的贡献。

电子雪崩速率 β :在shen的模型中,电子雪崩速率是从自由电子-电场相互作用的经典模型得到的。电子只有在与分子或原子碰撞时才从电场中吸收能量,电子能量增加率为:

作者简介: 刘莉(1972-),女,华中科技大学激光技术研究院在站博士后,主要从事激光光谱、非线性光学、激光医学方面的研究。E-mail: li_liu2002@sian.com.cn

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{g'} = \frac{e^2 E^2 v}{m(\omega^2 + \nu^2)} \quad (2)$$

其中 m, e 分别为电子的质量与电量; E 为电场强度, ω 为电场频率; ν 为有效碰撞频率。高能电子与重粒子相碰时, 如不吸收光子, 将导致能量损耗。弹性碰撞引起的能量损耗率为:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{I'} = \frac{2m\varepsilon_{av}w^2}{M(\omega^2 + \nu^2)} \quad (3)$$

M 为分子或原子的质量, ε_{av} 为电子平均能量。电子的总的能量变化率可表示为:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{g'} + \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{I'} = \frac{\tau}{\omega^2 \tau^2 + 1} \left(\frac{e^2 E^2}{m} - \frac{2m\varepsilon_{av} \omega^2}{M}\right) \quad (4)$$

$\tau = 1/\nu$, 为动量转移碰撞时间。设电子的电离能为 E_{ion} , 则电子雪崩速率可表示为:

$$\beta = \frac{1}{E_{ion}} \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta I - g' \quad (5)$$

其中, $\eta = \frac{e^2 \tau}{mc n_0 \varepsilon_0 E_{ion} (\omega^2 \tau^2 + 1)}$, $g' = \frac{2m\varepsilon_{av} \omega^2 \tau}{ME_{ion} (\omega^2 \tau^2 + 1)}$, $I = cn_0 \varepsilon_0 E^2$, 为入射光强, c 为真空中光速, ε_0 为真空的介电常数, n_0 为介质折射率(频率 ω 处)。

电子流失速率 g : 电子流失包括了复合、俘获、扩散等的自由电子损耗, 非弹性碰撞和从聚焦区向周围扩散是自由电子流失的主要机理。

$$g = 1/\tau_d + \gamma n \quad (6)$$

τ_d 为平均扩散时间常数, γ 为非弹性碰撞率。由于发生非弹性碰撞的截面与自由电子数密度 n 成线性关系, 故比率参数 γ 乘以 n 。

多光子电离速率 $\left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_m$: Keldysh 推导出了气体和稠合介质中多光子电离几率的近似表达式^[2,3],

$$\left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)_m = A I^K \quad (7)$$

其中, A 为多光子电离几率常数, σ_K 为多光子吸收截面, N 为原子密度, K 为电离所需的光子数。

3 模拟结果与分析

无法给出(1)式分析解的表达式, 因此我们对(2)数值求解以获得光学击穿阈值的变化规律。对于角膜组织, 采用了纯水模型(吸收系数 $\alpha = 0.61$, $\lambda = 1064$ nm), 同时也研究了吸收系数不同的含水组织的情况。计算参数列于表 1 中^[4]。

图 1 给出了三种不同吸收系数的含水介质中 ($\alpha = 0, 0.61 \text{ cm}^{-1}, 10 \text{ cm}^{-1}$), 损伤阈值随激光脉宽的变化。可以看到, 对于超短脉冲激光, 介质的线性吸收系数对光学击穿阈值的影响很小。在这个脉宽范围内 (< 1 ps), 多光子电离产生的自由电子密度随着

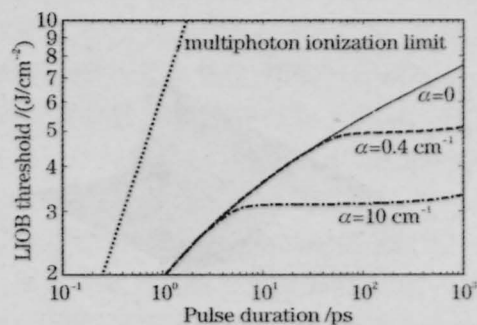


图 1 不同吸收系数下光学击穿阈值随激光脉宽的变化, 点线为纯多光子电离限

Fig.1 LIOP threshold as a function of laser pulse width at different absorption coefficients, dotted lines indicate the multiphoton ionization limits

表 1 用于计算水中光学击穿的参数

Tab.1 Parameters for optical breakdown calculation in water

λ	n_0	M	τ	τ_d	γ	E_{ion}	A
1064	1.32	3×10^{26}	10^{-12}	500	10^{-18}	6.5	1.599×10^{16}
nm		Kg	ps	ps	$\text{cm}^3 \text{ps}^{-1}$	eV	$(\text{cm}^2/\text{TW})^6 \text{ps}^{-1}$

脉宽的减小而迅速增长, 这个增长速度要远快于热电离(线性吸收激光)提供的初始电子雪崩产生的自由电子密度。图 1 也给出了纯多光子电离阈值随激光脉宽的变化。在长脉宽范围 (> 1 ns), 雪崩电离占主导地位, 对于透明的介质, 初始电子必须由多光子电离提供, 其比热电离提供的初始电子密度要小很多, 因此其击穿阈值要高于吸收系数不为 0 的介质; 在 1 ps~1 ns 脉宽范围, 在整个等离子体形成过程中, 多光子电离对自由电子的产生贡献增大, 透明介质的光学击穿阈值逐渐接近于吸收系数不为 0 的介质; 在超短脉冲范围, 激光入射的功率密度很高, 高强度激光辐射产生的多光子电离速率远远大于电离雪崩速率, 多光子电离成为光学击穿的主要机制, 光学击穿阈值渐近接近于多光子电离限。

激光能量沿光轴的分布变化是雪崩电离过程中激光与电子能量交换引起的, 图 2 为激光脉宽 10 ps, 峰值光强为阈值光强时, 功率密度随时间、入射深度的三维分布。为了便于说明激光光强在组织中的变化规律, 等离子体密度以及 $z=0, z=3 \mu\text{m}$ 处的激光波形也在图 3 中给出。由于峰值光强为击穿阈值光强, 等离子体密度只在峰值附近才显著增加, 并达到足够高的密度于入射激光发生强相互作用。可以看出, 在脉冲峰值强度到来之前, 激光波形前沿几乎无变化地在生物组织中传播。峰值强度入射后, 产生了光学击穿, 高密度的等离子体强烈吸收后续激光能量, 使激光脉冲的后半部被急剧衰减。从 $z =$

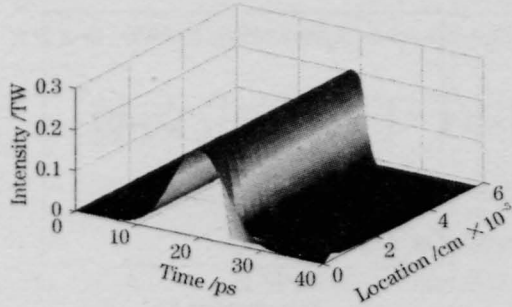


图2 生物组织中激光强度随时间和透射深度的变化

Fig.2 Variation of laser intensity with time and transmission depth in tissue

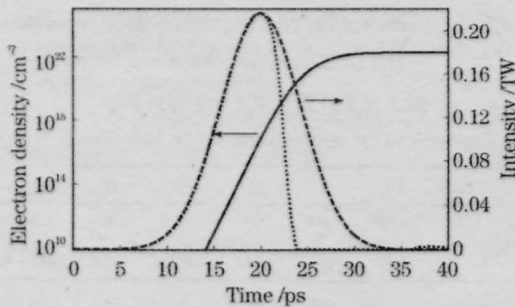


图3 电子密度(实线)随时间的变化以及组织中 $z=0$ (虚线)和 $z=3 \mu\text{m}$ (点线)处的高斯脉冲波形

Fig.3 Variation of electron density with time(solid line) and Gaussian pulse shape at $z=0$ (dashed line), $z=3 \mu\text{m}$ (dotted line) in tissue

$3 \mu\text{m}$ 处的激光波形看到,脉冲后沿已经完全被等离子体屏蔽。激光波形后沿的衰减是在 μm 量级的薄层内实现的(图2),超过这个薄层范围,波形后沿同样几乎无变化的在组织中传播,即入射激光能量的强烈吸收被限制在这个薄层内。随着入射深度的增加,吸收的能量密度迅速减小,薄层的厚度 δ 可以通过计算吸收的能量密度减小到 $1/e$ 的位置来获得。在本次计算采用的参数下, $\delta \approx 1.7 \mu\text{m}$ 。计算表

明,当入射激光能量显著高于光学击穿阈值时,有效的透射深度变薄($<1 \mu\text{m}$)。

4 结论

基于 Shen 的固体级联击穿的速率方程和 Keldysh 发展的稠合介质中多光子电离模型,建立了生物软组织的超短脉冲激光光学击穿模型;研究了不同吸收系数的含水组织中,光学击穿阈值随吸收系数、激光脉宽的变化关系以及激光强度、吸收的能量密度在组织中的分布规律。结果表明,对于纳秒或亚纳秒脉冲激光,强吸收介质的热电子发射对电子雪崩电离过程有很大影响,等离子体光学击穿阈值随生物组织吸收的增加而降低;在激光脉宽为亚皮秒量级时,多光子电离成为光学击穿的主要机制,介质的击穿阈值几乎与线性吸收系数无关,光学击穿阈值渐近接近于多光子电离阈值。

参考文献

- 1 P. K. Kennedy. A first-order model for computation of laser-induced breakdown thresholds in ocular and aqueous media: part I-theory[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, 31(12): 2241-2249
- 2 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): 1749-1761
- 3 B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik *et al.*. Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74(12): 2248-2251
- 4 A. A. Oraevsky, L. B. Da Sliva, A. M. Rubenchik *et al.*. Plasma mediated ablation of biological tissues with nanosecond-to-femtosecond laser pulses: relative role of linear and nonlinear absorption[J]. *IEEE J. Selected Top. Quantum Electron.*, 1996, 2(4): 801-809