

文章编号: 1001-3806(2002)04-0258-04

## 激光与液态物质相互作用机理的研究进展\*

倪晓武 陈笑 陆建

(南京理工大学应用物理系, 南京, 210094)

**摘要:** 综述了强激光与液态物质相互作用机理的研究进展和现状。阐述了激光诱导液态物质产生的击穿现象及其伴随着热、声、机械等效应的物理过程。介绍了该机制在工业、医学等应用领域中的重要意义和理论价值。提出了目前尚未解决的问题和未来研究的方向。

**关键词:** 激光; 液态物质; 光学击穿机制; 冲击波; 空泡

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A

## Study on the mechanism of interaction between laser and liquid material

Ni Xiaowu, Chen Xiao, Lu Jian

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, 210094)

**Abstract** The mechanism of interaction between laser and liquid material has been persistently received much attention in a variety of fields, such as medicine, industry. This interaction is a very complex one, accompanying optical, acoustic, mechanical effect and so on. In recent years, study about the laser induced optical breakdown mechanism, shock wave emission and cavitation bubble dynamics, not only in theory, but also by experiments, has developed quickly. This paper mainly presents situation, development and some unsolved problems about the interactional mechanism.

**Key words:** laser; liquid material; mechanism of optical breakdown; shock wave cavitation bubble

### 引言

激光与物质相互作用过程及机理研究一直是激光应用工作者关注的基础理论问题。其中激光与气态和固态物质相互作用机理研究领域起步较早, 至今已有较大的进展, 对应的理论与体系也较为完整, 并在激光加工和激光武器等领域得到广泛的应用。如在激光与固体介质相互作用研究领域中, 被作用靶材不仅涉及单一金属或非金属材料, 还对各种光学元器件<sup>[1,2]</sup> (如半导体, 光学薄膜, CCD 等) 进行了相互作用或破坏机理的研究。60 年代中期, 激光技术在医学领域得到应用<sup>[3,4]</sup>, 考虑到多数生物软组织和体液的含水量平均达到 85%, 有的甚至高达 98%, 此时, 激光与固态物质相互作用模型或理论与实验结果明显不符; 在而后诞生的染料激光器中, 激光在泵浦染料过程中更存在激光对液态物质作用的问题。在此背景下, 有关学者开始了激

光与液态物质相互作用机理方面的理论和实验研究工作<sup>[5]</sup>。迄今为止, 在这一领域无论是理论还是实验研究方面, 其进展明显落后于激光对气态或固态物质相互作用机理的相关研究。考虑到要研究激光与生物组织相互作用机理, 首先应该了解激光与液态物质相互作用机制, 以及流体力学学者常用激光诱导液体产生的空泡来进行理论和模拟实验的研究, 因此, 有必要开展激光与液态物质相互作用机理和实验研究工作。

综述了强激光与液态物质相互作用机理的研究现状和进展, 讨论了有关过程对应的物理机理, 并就激光在工业、医学等应用领域中的意义和理论价值进行了初步的探讨, 进而提出了目前尚未解决的问题和未来研究的方向。

### 1 一般作用过程的描述

就高功率激光对眼组织进行手术作用机理而进行的模拟实验研究时, 首先进行了激光与液态物质相互作用过程的研究。通过理论和模拟实验研究后认为激光诱导液态物质产生击穿的物理过程伴随着热、声、机械效应等一系列物理现象。即当高功率激光聚焦于液体中时, 若作用激光能量密度超过液体

\* 激光技术国家重点实验室开放基金资助项目。

作者简介: 倪晓武, 男, 1955 年 7 月出生。教授。现主要从事激光毁伤机理研究。

收稿日期: 2001-09-30; 收到修改稿日期: 2001-11-13

的击穿阈值时,则在聚焦区域内首先发生光学击穿 (LIB),随之产生高温高压的等离子体,该等离子体吸收后续激光能量向外膨胀,形成初期以超音速传播的冲击波。这一冲击波在传播了几个毫米之后,约有 65%~85% 的冲击波能量就耗散到周围液体中,直至最终衰减为声波<sup>[6,7]</sup>。而后提出的空泡现象也是激光击穿液态物质时伴随的物理现象之一,它主要发生在激光与含水量较多的软组织或液体相互作用过程中,它在经历了膨胀、收缩、反弹等一系列过程之后最终能量全部耗散。如在空泡周围存在固壁面,则空泡在溃灭阶段还会产生高速射流或逆射流<sup>[8]</sup>。它对于激光对物质损伤具有重要作用。

## 2 液体击穿机制

激光技术的进展使激光的脉冲宽度从纳秒量级向飞秒量级发展,因而使局部的液体在较低的作用激光能量范围内就能得到很高的光强。这从本质上改变了激光与物质相互作用机理。目前,击穿机制主要有雪崩电离机制和多光子电离机制。前者要建立雪崩过程,其必要条件是在初期聚焦区域内必须存在一定量的原初电子来充当“种子”电子,“种子”电子可由杂质、热激发电子或多光子电离产生,它由介质和激光参量共同决定。多光子电离是一种非线性光学过程,它只发生在高能量辐射和波长为近红外或更短的区域,其击穿不完全依赖于原初电子的存在或粒子与粒子相互碰撞作用,因此,相比较于由杂质诱导的雪崩电离,多光子诱导的雪崩电离的击穿可能性更大,且能在更短的时间内形成串级电离过程。但当液态物质中自由电子密度大于  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  时,由于此时雪崩电离率与自由电子数的平方成正比,因而雪崩电离要快于多光子电离。

针对强激光对液态物质击穿机制已有一些学者进行了理论研究,但对应的理论模型尚未完善,许多实验现象并没有得到很好的解释。其问题的症结可能是水和其它含水的溶液是一种介于气体和固体间的无定形物质,在某一时刻水分子的聚集度具有较大的随机性,致使准自由电子局部势能的随机涨落,因而给研究问题带来一定的复杂性。为了方便研究,人们将水视为孤对非晶态半导体,参考固体中雪崩电离机制和 Keldysh 的多光子电离机制初步建立了液态水的击穿机制模型<sup>[9]</sup>:

$$\frac{d\rho}{dt} = \left( \frac{d\rho}{dt} \right)_{mp} + \eta_{casc} \rho - g\rho - \eta_{rec} \rho^2 \quad (1)$$

式中,  $\eta_{casc}$ ,  $g$  和  $\eta_{rec}$  分别为雪崩电离系数、扩散系数

和复合系数;若将聚焦区视为半径为  $\omega_0$ , 长为  $\zeta$  的圆柱体时,则有:  $g = \frac{\tau \Delta E}{3m} [(2.4/\omega_0)^2 + (1/\zeta_r)^2]$ ;  $\eta_{rec} = 2 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$ 。

方程(1)右边第 1 项来源于多光子电离,第 2 项来自于雪崩电离机制,第 3 项和第 4 项分别为扩散和复合项。(1)式是普适方程,在特定情况下可适当做一些简化。当入射光频  $\omega$  是远大于隧道效应的频率  $\omega_t$  时, Keldysh 的多光子电离简化为:

$$\left( \frac{d\rho}{dt} \right)_{mp} \approx \frac{2\omega}{9\pi} \left( \frac{m'\omega}{\hbar} \right)^{3/2} \left[ \frac{e^2 I}{16 m' \Delta E \omega^2 c \epsilon_0 n} \right]^K \times \exp(2K) f \left( \sqrt{2K - 2\Delta E / \hbar \omega} \right) \quad (2)$$

$$f(x) = \exp(-x^2) \int_0^x \exp(y^2) dy$$

式中,  $\omega$  为作用激光圆频率;  $m'$  为约化质量;  $I$  为作用光光强;  $\Delta E$  为被作用物质的电离能;  $K$  表示电离需要吸收的最小光子数,且有  $K = \langle \Delta E / \hbar \omega + 1 \rangle$ , 其中  $\langle \rangle$  代表取整。

表 1 纯净水、生理盐水和自来水在不同情况下的击穿阈值

介质	纯净水	生理盐水 0.9%	自来水
脉宽/ps	$10 \times 10^3$	$10 \times 10^3$	$10 \times 10^3$
	40	40	40
	3°	2.4	2.4
波长/nm	1064	1064	1064
	1064	1064	1064
	580	580	580
聚焦直径/ $\mu\text{m}$	4.0	4.0	4.0
	4.0	4.0	4.0
	5.0	21( $\pm 2.5$ )	21( $\pm 2.5$ )
击穿阈值 /( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	3183	3024	1798
	63.69	39.78	3.978
	2.6	1.204	1.198
功率阈值 /( $10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	0.32	0.30	0.18
	1.60	1.00	0.5
	0.85	0.50	0.49

注: \* 处参数引用参考文献[10],其余皆引用参考文献[11]。

理论上判断液体是否产生击穿是以激光聚焦区域内的自由电子密度是否达到  $10^{20} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  量级为标准。若激光脉冲宽度  $\tau \leq 30 \text{ ps}$ , 则对应的阈值电子密度为  $\rho_{cr} = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ; 而脉宽为 ns 级的激光产生击穿对应的电子密度为  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ <sup>[12]</sup>, 这与过去认为自由电子密度达到  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的判据有所不同<sup>[13]</sup>。

实验研究中判断是否产生击穿通常有两种标

准:对作用激光脉冲宽度为 ns 和长 ps 量级的激光在水中是否发生击穿是以等离子体闪光为标志的;而对脉宽为短 ps 和 fs 级的激光而言,则因此时超短脉冲激光发生击穿时伴随的闪光现象已经弱化到无法直接用肉眼观察<sup>[14]</sup>,故以空泡产生为判别依据。

要描述激光诱导液体产生的击穿现象主要需涉及击穿阈值、等离子体密度和等离子体吸收系数等特性参量。表 1 列出纯净水、生理盐水和自来水等 3 种介质在不同情况下的击穿阈值。

由表 1 可见,随着作用激光脉宽变窄,对应的激光能量击穿阈值(单位为  $J/cm^2$ )将下降。但当脉宽为 fs 级时,能量击穿阈值基本保持不变。

### 3 冲击波的产生和空化的形成

在激光与液体相互作用过程中,高温高压的等离子体产生以后,就将对外膨胀。当有惯性的离子在经过一定延迟时间后就跟着自由电子进行运动,此时质量就开始移动了,这就是冲击波产生的基本根源。冲击波在起始阶段是以超音速速度运动的,此时聚焦区内速度达到 5000m/s 量级,经过扩展和衰减后变为声波。空泡属宏观作用,它发生在软组织或流体中。空泡的产生源于高温高压的等离子体,它使得聚焦区的液体首先被汽化,成为饱和蒸气对外膨胀,因此,通常认为空泡的初始直径与激光聚焦区线度同为 50 $\mu$ m 左右,在经历几次收缩,反弹后最终溃灭,同时还伴有多次声波的产生<sup>[7]</sup>。如果空泡周围存在固体壁面,则还将有射流的产生,其强度由无量纲  $\gamma = d/R_{max}$  (其中,  $d$  为空泡中心到固壁面的距离,  $R_{max}$  为最大空泡半径)<sup>[12]</sup>给出。从能量的角度来看,空泡比冲击波更易损伤激光作用区周围的物质。又因冲击波对周围介质的作用多发生在细胞和亚细胞数量级,因而在生物医学中,与等离子体有关的激光手术几种作用效应中,与机械效应相关的作用机理就与空泡及其伴随的射流密切相关,而且冲击波和空泡的机械效应既有有利的一面,又有不利的一面。例如在膀胱碎石,晶状体后囊膜切除术中都是利用其有利的一面;但应当认识到在眼睛内部敏感组织周围进行切割或血管成形术中<sup>[15]</sup>,它作为一种不利的副作用是应尽量减小或避免的。有关研究在与眼科和泌尿科相关的激光手术治疗机理研究、治疗效果的预测和适应症的确定中都具有十分重要的意义。

表 2 给出了不同脉宽和不同能量的作用激光在与液态物质相互作用时,入射激光能量( $E_{TOT}$ )转换

为冲击波能量( $E_s$ )、空泡能量( $E_b$ )和汽化能( $E_v$ )的比例值。由表 2 可见,脉宽为 ps 量级激光对应的  $E_s/(E_s + E_b)$  是 ns 量级激光的 6~7 倍。其中的汽化能部分在医学手术中常用来切割组织,伴随的冲击波和空泡是作为组织损伤的机械副作用应尽量避免。临床证明,采用超短脉冲激光进行医学手术可具有更高的定位精度。由此可见,在激光医学手术中,如何选择最优化的激光参量亦具有十分重要的意义。

表 2 激光能量转化为机械能和汽化能的百分比<sup>[8,10]</sup>

		30ps 50 $\mu$ J	30ps 1mJ	6ns 1mJ	6ns 10mJ
机械能	$E_s/E_{TOT}$	25.1%	10.4%	36.4%	49.3%
	$E_b/E_{TOT}$	23.2%	11.2%	24.9%	29.4%
	$E_s/(E_s + E_b)$	0.457	0.731	0.122	0.082

### 4 实验和测试方法的研究

众所周知,实验和测试方法的研究可推动机理研究的深入。在激光与液态物质相互作用过程的测试技术研究方面,用以探测液态物质中冲击波传播的方法有光声探测法<sup>[11]</sup>、机械测量法(压电传感器)<sup>[16]</sup>、光纤偏转法<sup>[17]</sup>、干涉诊断法<sup>[18]</sup>、高速摄影法等。每种检测方法都有各自的优缺点,分析如下。

#### 4.1 光声探测法

该方法具体分为两种,第 1 种是采用微弱探测光来检测,常用氦氖激光或染料激光作为探测光束。第 2 种是光学延迟法,即探测光束通过分光镜从主光束中分出并且通过光延迟送出。它具有较高的时空分辨率,且不扰动原场。

#### 4.2 机械测量(压电传感器)

它是依靠压电传感器将冲击波的波前压力转变为电压信号。该方法简单易操作。但探头的存在会扰动原场及其分布、传感器的频率响应较低难以满足测试要求等。虽然对于冲击波传输的中场和远场测量有较高的精度,但对聚焦区的近场测量存在较大的误差。

#### 4.3 干涉诊断法

该测量方法主要探测光束通过流场时引起折射率的变化和等离子体的吸收情况来反映出该等离子体场的性质;从干涉条纹的漂移还可计算出等离子体中电子密度、温度和压力等物理量及其分布。该方法对于探测光源的相干性要求不高,它不仅能提供冲击波的波前压强值,而且还能给出完整的压强

变化情况。但是干涉法条纹的图像处理和判读相对繁琐, 还需引进参考条纹, 且只有当等离子体区可以透过探测光束时才能实现检测。

#### 4.4 光纤偏转法

它也是利用探测光通过折射率场时, 折射率致使该光束发生偏转, 从而耦合进光纤的光通量随之改变来对等离子体流场进行测试的。此时输出的信号经光放大之后进入示波器进行信号处理。但该方法比较精细, 对实验操作要求比较高。

#### 4.5 高速摄影法

该方法原理简单, 实验易于操作。它的时间分辨率取决于高速摄影仪的曝光时间和幅间隔, 但主要用于测试冲击波传播速度, 且当摄影频率提高时, 对应的仪器造价昂贵。与光学探针法相比, 它可以得到二维的图像。

### 5 发展方向和存在问题

(1) 随着超短脉宽激光技术和超快过程探测技术的迅速发展, 理论和实验都证明脉宽为 ps 量级的激光治疗效果要优于 ns 量级。这是因为在达到相同功率密度情况下, ps 级激光所需能量密度击穿阈值要小于 ns 级, 而作用的激光能量越小对周围组织产生的副作用就越小, 因而可以用较小的激光能量达到同样的治疗效果。当然, 激光脉宽从 ps 量级发展到 fs 量级时, 这种优越性是否能继续保持尚待研究。还存在一些技术问题: 实验证明, 当激光脉宽窄于 100fs 时, 对应的击穿阈值不再减小, 而保持一常量基本不变; 另外, 激光脉宽达到  $10^{-15}$ s 时, 对应的功率密度高达  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>, 此时的非线性光学效应更为明显, 如自聚焦和自陷等效应不可避免的存在, 它将使得聚焦区域的光强分布不均匀, 即出现局部热点; 此外, 还将出现受激喇曼散射, 以及脉宽小于 5fs 时隧道效应等。这些效应或多或少将影响激光

与组织的相互作用过程。因而与之对应的非线性光学方面的研究工作是今后研究的内容之一。(2) 激光在水中击穿的理论研究的深度和完整性还远不如在固体和气体中相关研究成果, 且在理论上大多只限于借助于计算机的数值模拟, 许多实验现象在理论上尚未得到较好的解释, 因此, 理论模型和理论体系需要进一步完善。(3) 激光在水中与物质相互作用的微观机制以及对应的理论模型尚未完全建立。(4) 虽然目前已有多种实验检测手段和方法, 但是每种方法都有自身的缺陷和不足, 因此, 对检测方法的探索和研究也有待深入。

#### 参 考 文 献

- [1] 倪晓武, 沈中华, 陆建. 光电子·激光, 1997, 8(6): 487~ 490.
- [2] Ni X W, Lu J, He A Z *et al.* Opt Commun, 1992, 90(4/6): 270~ 272.
- [3] Steiner R F, Puliafito C A. The Nd:YAG Laser in Ophthalmology, Principles and Clinical Applications of Photodisruption Philadelphia: Saunders, 1985
- [4] Teng P, Nishioka N S, Anderson R R *et al.* Appl Phys, 1987, B(42): 73~ 78.
- [5] Bell C E, Landt J A. A P L, 1967, 10: 46~ 48.
- [6] Doukas A G, Zweig A D, Frisoli J K *et al.* Appl Phys, 1991, B(53): 237~ 245.
- [7] Vogel A, Busch S, Parlitz U. J A S A, 1996, 100(1): 148~ 165.
- [8] Tomita Y, Shima A. J Fluid Mech, 1986, 169: 535~ 564.
- [9] Noack J, Vogel A. IEEE J Q E, 1999, QE35(8): 1156~ 1167.
- [10] Vogel A, Noack J, Nahen K *et al.* Appl Phys, 1999, B68: 271~ 280.
- [11] Zysset B, Fujimoto J G, Deutsch T F. Appl Phys, 1989, B48: 139~ 147.
- [12] Vogel A, Lauterborn W. J A S A, 1988, 84(2): 719~ 731.
- [13] Sacchi C A. J O S A, 1991, B8(2): 337~ 345.
- [14] Kennedy K. IEEE J Q E, 1995, QE-31(12): 2241~ 2249.
- [15] Van Leeuwen T G, Meertens J H, Velema E *et al.* Circulation, 1993, 87: 1258~ 1263.
- [16] Schoeffmann H. J A P, 1988, 63: 46~ 61.
- [17] Chen J P, Ni X W, Lu J *et al.* Microwave and Optical Technology Letter, 2000, 25(5): 307~ 311.
- [18] 陆建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学. 北京: 机械工业出版社, 1996.

(上接第 257 页)

为实验室服务的, 距离野外使用的要求还有一定的距离。最近几年国外在高速 A/D 采集芯片、高速数据存储器和高速数据处理芯片的研制工作突飞猛进, 如果这些器件能够应用到偏频锁定技术中, 将大大提高单脉冲的鉴频精度, 从而提高锁频精度。

#### 参 考 文 献

- [1] Zhu D Y, Yu X C, Yie N G *et al.* SPIE, 1992, 1635: 330~ 336.
- [2] Hu Y, Li X, Wang K *et al.* SPIE, 1992, 1635: 74~ 80.
- [3] Stace T, Luiten A N, Kovacich R P. Meas Sci Technol UK, 1998, 9: 1635~ 1637.
- [4] Pace P W, Cruickshank J M. IEEE J Q E, 1980, QE16(9): 937~ 944.
- [5] Rutt H N. J Phys E: Sci Instrum, 1984, 17: 704~ 709.
- [6] Rutt H N. Heterodyne frequency offset locking of a miniature TEA laser. XIIIth International Quantum Electronics Conference. UK, 1982.