

# 高功率 YAG 激光在生理盐水中产生微等离子体的研究

陆 建 倪晓武 贺安之

(南京理工大学应用物理系, 南京 210014)

**摘要** 利用光学阴影探测方法研究了调 Q-YAG 脉冲激光在生理盐水光学击穿阈值附近诱导微等离子体和冲击波产生的过程, 得到了微等离子体和冲击波随入射激光能量和延迟时间而变的系列光学阴影图, 并且指出了冲击波的机械作用在脉冲激光眼科医疗中的影响。

**关键词** 激光与组织相互作用, 激光产生微等离子体, 眼科学, 激光应用

## 1 引 言

高功率调 Q-YAG 激光在眼科中的应用在近十年内得到迅速发展, 如虹膜切除术、虹膜打孔和白内障切除术等。在激光眼科治疗过程中, 人们感到其治疗的物理、化学和生物等机理研究变得愈来愈重要和迫切。本文旨在对高功率激光眼科医疗物理机理进行基本的实验研究, 这一研究对于激光微切割、穿孔和局部汽化等有临床指导意义。

C. A. Puliafito 等人<sup>[1]</sup>和 M. A. Mainster 等人<sup>[2]</sup>都曾讨论过高功率激光微外科的物理机理, 认为等离子体、冲击波、热效应和电磁辐射均对眼内组织有作用。但是谁起主要作用尚未有实质性的实验研究。本文采用光学阴影探测方法研究了高功率激光在生理盐水光学击穿阈值附近产生微等离子体的瞬态物理过程, 获得了这一过程中微等离子体和冲击波的产生和发展的系列光学阴影照片。

## 2 实 验

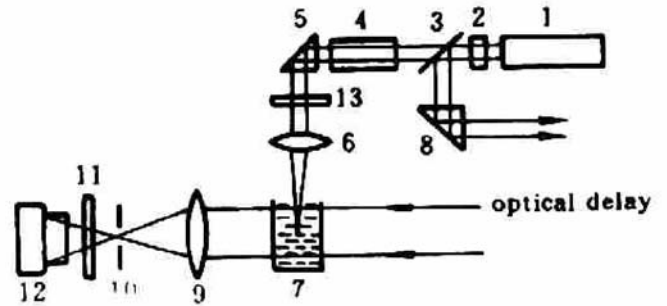
### 2.1 实验装置

实验装置示于图 1。我们采用电光调 Q-YAG 振荡放大激光器产生脉宽 15 ns 波长 1.06  $\mu\text{m}$  的激光。从振荡级输出的光经过倍频晶体后, 用 0.53  $\mu\text{m}$  全反射、1.06  $\mu\text{m}$  全透射平面镜把绿光分离出来, 经过光路延迟装置作为阴影系统的光源。而从放大级输出的 1.06  $\mu\text{m}$  激光作为作用光。因为生理盐水的物理特性与眼内房水类似, 所以选用它来模拟眼内房水。在作用光路中放置一个偏振片(13), 用来调节作用激光能量大小。把生理盐水盛于一透明玻璃器皿并放

入阴影探测光路中。为了消除衍射效应对实验结果的不良影响,击穿区域的微等离子体与照相机(12)相对于成像透镜(9)成物像关系。探测激光通过生理盐水中击穿区域的时间由延迟装置可在 150 ns 以内调节,以便能探测到击穿过程的发展情况。

Fig. 1 Experimental set-up scheme

1—oscillator; 2—frequency-doubled crystal; 3—dichroic mirror;  
4—amplifier; 5, 8—right-angle prism; 6—focusing lens; 7—glass  
vessel; 9—imaging lens; 10—diaphragm; 11—filter; 12—camera;  
13—polariser



## 2.2 实验过程和结果

当入射到生理盐水中的  $1.06 \mu\text{m}$  激光的功率密度达到或超过其光学击穿阈值时,其作用点会发生光学击穿现象,并产生微等离子体和冲击波。因此,通过调节偏振片,由生理盐水的击穿过程中产生的等离子体的闪光特性确定生理盐水的击穿阈值。采用  $f = 38 \text{ mm}$  的会聚透镜时,能量击穿阈值  $E_{\text{th}} = 3.4 \text{ mJ}$ 。而一般在临床脉冲激光眼科医疗中,作用激光能量稍大于生理盐水击穿阈值,以产生足够强的微等离子体和冲击波。实验中选取了几个入射能量均大于阈值的作用光束分别引起生理盐水击穿以产生等离子体和冲击波而进行比较,实验结果如图 2 和图 3 所示。图 2 中的序列光学阴影图表示入射激光能量为  $5.9 \text{ mJ}$  时生理盐水击穿产生的微等离子体和冲击波发展的全过程。图 3 则表示在确定的延迟时间下,改变入射激光能量时的序列的击穿阴影照片。

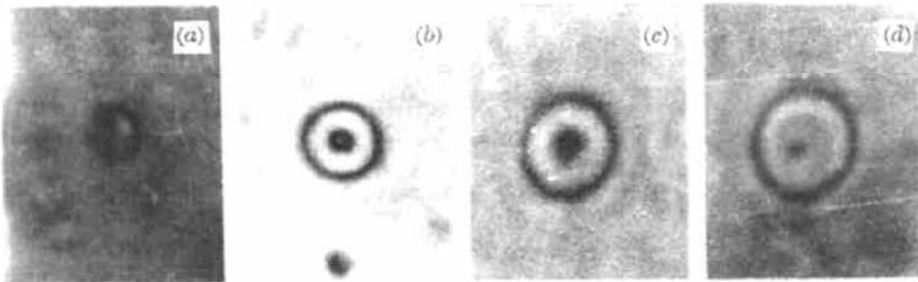


Fig. 2 Optical shadowgraphs of shock waves in physiological saline under a laser energy of  $5.9 \text{ mJ}$  at different delay times, the amplification ratio is of 28

(a)  $64 \text{ ns}$ , (b)  $90 \text{ ns}$ , (c)  $116 \text{ ns}$ , (d)  $142 \text{ ns}$

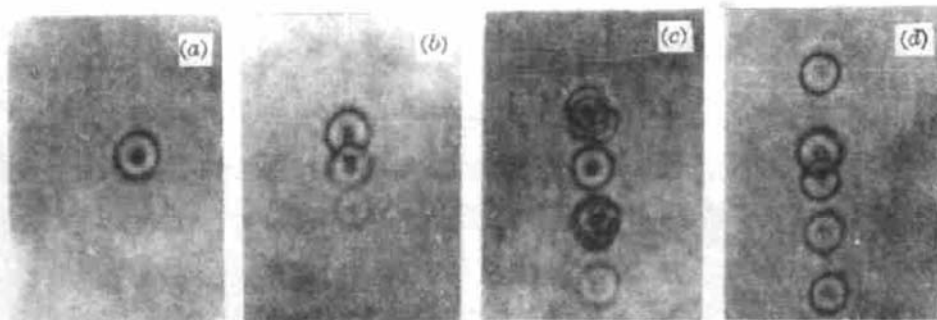


Fig. 3 Optical shadowgraphs of shock waves in physiological saline under different laser energies at a delay time of  $116 \text{ ns}$ , the amplification is of 13.3

(a)  $5.9 \text{ mJ}$ , (b)  $8.1 \text{ mJ}$ , (c)  $13.0 \text{ mJ}$ , (d)  $16.2 \text{ mJ}$

### 3 实验结果的分析与讨论

高功率脉冲激光经过会聚透镜后,在其焦点区域功率密度达到  $10^9 \text{ W/cm}^2$  以上,当它超过生理盐水的激光击穿阈值时,发生击穿现象,即作用物质在很短时间内吸收了激光能量,引起串级电离,产生等离子体,并且局部温度剧增引起等离子体膨胀,产生强大的冲击波,与水中击穿类似<sup>[3]</sup>。从图 2 照片中可以看出近似球形的黑白反差强烈的环代表等离子体膨胀产生的冲击波,随着时间的增大,冲击波逐步向四周扩展。由这些阴影照片上冲击波的形状可测量冲击波位置即半径,进而估算出冲击波在某一时间内的平均速率。比如,  $t_1 = 90 \text{ ns}$  时,  $r_1 = 0.15 \text{ mm}$ ;  $t_2 = 116 \text{ ns}$  时,  $r_2 = 0.19 \text{ mm}$ ,由平均速率公式

$$\bar{v} = (r_2 - r_1) / (t_2 - t_1)$$

求出  $t_1$  到  $t_2$  时间内冲击波平均速率为  $1.54 \times 10^3 \text{ m/s}$ ,稍大于水中声速  $1.45 \times 10^3 \text{ m/s}$ 。实际上,在冲击波传播的初始阶段其速度远比声速大。图 4 给出了冲击波传播半径随延迟时间的变化情况,曲线中上一点的切线斜率代表对应时刻冲击波的速率大小。

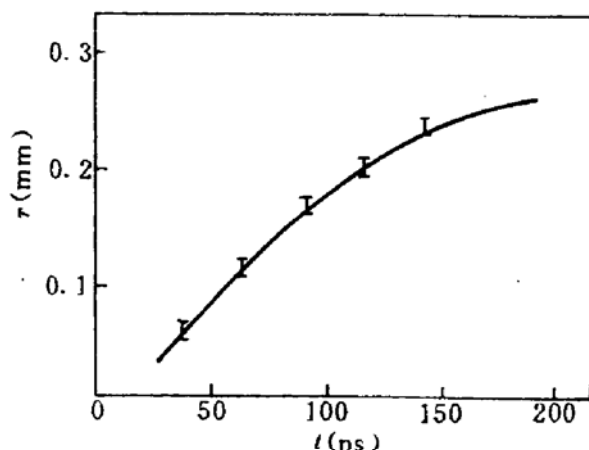


Fig. 4 The radius of the shock wave versus the delay time under a laser energy of 5.9 mJ

在脉冲激光眼科手术中,把激光聚焦在虹膜或其他组织上,虹膜上焦点区域击穿产生等离子体和冲击波,而撕裂或穿破局部虹膜。我们认为这一过程的定性解释是,由于击穿而产生的微等离子体迅速扩张而产生的冲击波和声波形成巨大的压力梯度,分裂了膜组织结构。压力的大小与该处冲击波速率成正比。再一个冲击波传播到膜中转变为应力波,到其膜边界成为张力波,若这个张力波强度大于膜材料的局部弹性极限时,焦点附近组织就会被撕裂,这一过程仅在几十毫秒内就结束了。此时热效应在这么短时间内影响甚小可不考虑,而对于长脉冲或连续激光,就必须考虑热效应。

从图 3 照片可以看出,随着作用能量的加大,生理盐水中击穿区域发生了变化,焦点附近也击穿了。这是因为焦点区域击穿过程对邻近点产生积极影响而引起串级击穿,作用能量愈大,这种现象愈明显。我们认为这种现象在眼科激光手术中很有实用价值,因为眼内组织膜都有一定厚度,厚度在  $1 \text{ mm}$  量级,如果权用阈值大小的激光能量作用必然达不到医学最佳效果,但是若选用稍大一些的能量使其在生理盐水中击穿区域的线度与膜厚度相当,那么穿破或撕裂一个组织膜就变得容易了。选取适当的作用激光能量,一是要尽量取得最佳效果,二是不对眼内其他组织产生伤害和影响。我们认为选取  $13 \text{ mJ}$  比较适合,这时击穿区域线度在  $1.4$

mm 左右。

我们认为冲击波对膜组织的作用主要在垂直于入射激光方向上即平行于膜表面方向上，而在膜厚方向，两相邻点击穿产生的冲击波作用相互抵消，所以在作用区域，冲击波的作用是沿膜表面方向向两侧撕拉而达到医疗效果。

### 参 考 文 献

- 1 C. A. Puliafito, R. F. Steinert. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1984, **QE-20**(12): 1442
- 2 M. A. Mainster, D. H. Sliney *et al.*. *Ophthalmology*, 1983, **90**(8): 973
- 3 C. E. Bell, J. A. Landt. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **10**(1): 46

## Investigation of Microplasma in Physiological Saline Produced by a High-power YAG Laser

Lu Jian Ni Xiaowu He Anzhi

(*Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210014*)

**Abstract** Microplasma and shock waves in the physiological saline produced by a  $Q$ -switched pulse YAG laser with nearby optical breakdown threshold energy are investigated by using optical shadowing exploring method, and a series of optical shadowgraphs of microplasma and shock waves versus the incident laser energy and the delay time are obtained. Influence of mechanical action of shock waves for the high-power pulse laser on the ophthalmic treatment is discussed.

**Key words** laser-tissue interaction, laser producing microplasma, ophthalmology, laser application