

# 激光与光电子学进展

## 激光辅助水中脉冲放电生成等离子体的数值模拟

钱杨, 冯音琦, 黄民双\*, 许友文

北京石油化工学院光机电装备技术北京市重点实验室, 北京 102617

**摘要** 提出了激光辅助水中脉冲放电生成等离子体的方法, 结合经典的Drude模型, 建立激光注入水中脉冲放电系统生成等离子体的二维流体数学模型, 给出相应的数学方程, 利用COMSOL Multiphysics软件模拟带电粒子与垂直注入等离子体通道的激光的相互作用过程, 探讨了一定能量的激光作用于水介质脉冲放电系统时局部电子密度所受的影响。由初步的仿真结果可知, 在电场放电通道中, 加入能量为50 mJ、光斑直径为0.1 mm的激光到等离子体通道内, 其电子密度峰值从 $1.65 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 突增到 $8.29 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 。该过程对于提高等离子体的电离率起到了显著作用, 说明激光辅助水中脉冲放电生成等离子体的技术方案是可行的。

**关键词** 等离子体; 激光诱导; 数值模拟; 激光与物质相互作用

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0735001

## Numerical Simulation of Plasma Generated by Laser-Assisted Pulsed Discharge in Water

Qian Yang, Feng Yinqi, Huang Minshuang\*, Xu Youwen

Beijing Area Major Laboratory Opto-Mechatronic Equipment Technology, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617

**Abstract** A laser-assisted pulsed discharge method for generating plasma in water is proposed. Combining with the classical Drude model, a two-dimensional fluid mathematical model of the plasma generated by laser injected into the water pulsed discharge system is established, and the corresponding mathematical equations are given. The COMSOL Multiphysics software is used to simulate the interaction process between charged particles and laser vertically injected into the plasma channel. The local electron density when the laser with a certain energy is applied to the water dielectric pulse discharge system is studied. The preliminary simulation results show that the peak value of electron density increases from  $1.65 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  to  $8.29 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  when a laser with 50 mJ energy and 0.1 mm spot diameter is added into the plasma channel. This process plays a significant role in improving the ionization rate of plasma, which indicates that the technical scheme of laser assisted pulse discharge in water to generate plasma is feasible.

**Key words** plasma; laser induction; numerical simulation; laser-matter interaction

**OCIS codes** 350.5400; 140.3390; 140.3440

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-08-09; 录用日期: 2020-08-27

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3172012)

\*E-mail: huangminshuang@bipt.edu.cn

## 1 引言

水中直接放电是指电极浸入液体中的一种放电形式。水中直接放电可以在简便、经济的条件下产生非平衡低温等离子体,可广泛应用于各种不同的工业应用环境,已经成为近年来微加工<sup>[1]</sup>、纳米颗粒合成<sup>[2]</sup>、废水处理<sup>[3]</sup>等领域的一项效率高、功能强、应用广的新技术。

但是,目前用于化工等领域的低温非平衡等离子体技术均采用电场放电(如电晕放电、滑动电弧放电、介质阻挡放电、微波放电等<sup>[4-8]</sup>)来实现,存在电源效率低等问题。近年来,人们提出了利用光能进行水电离制氢的课题,例如利用太阳光分解水制氢的技术,但该项技术的光转换效率更低,不能用于实际生产中。因此本文探讨利用激光诱导<sup>[9]</sup>与电场的共同作用产生等离子体的方法,期望获得一种新的等离子体产生方法。

关于激光与电场相互作用产生等离子体的研究目前主要是以固体介质为研究对象,例如激光诱导增强电弧等离子体的放电<sup>[10]</sup>、火花放电辅助-激光诱导击穿放电<sup>[11]</sup>,尚未出现在水中激光与电场相互作用下产生等离子体的研究报道,并且已有的研究均为实验研究,并未涉及理论模型和理论分析。将一定能量的激光注入水介质的放电实验过程,可看作激光诱导水击穿<sup>[12-13]</sup>与水中脉冲电压放电两种效应的结合,水介质中的带电粒子特别是高能电子将受到激光的时谐变化电场与脉冲电压下电极间电场的耦合作用,这将使在脉冲放电中未被电离的水分子进一步电离,且使更多的电子得到更高的能量,即高能电子的数量得以提高,相应地等离子体的电离率(等离子体中电子密度占离子和中性粒子密度之和的比例)也得以提高。

电子密度是衡量低温非平衡等离子体的一个重要特征参数,它反映了等离子体的电离率。低温非平衡等离子体是一种低电离率的等离子体,其中包含电子、离子、激发态原子(或分子)等高能粒子以及中性粒子,在外电场作用下,电场使电子加速、成为快电子,快电子与中性粒子的碰撞导致新的电离发生,因此电场分布直接影响等离子体的电离率。本文通过建立激光注入水中脉冲放电系统生成等离子体的二维流体数学模型,利用 COMSOL Multiphysics 软件进行仿真,探究激光辅助作用对等离子体通道中的电子密度、电场强度分布的影响,分析光斑大小、激光注入位置对等离子体通道中电子密度的影响,这对于实际实验以及激光与电场相互作用产生等离子体的研究具有一定的参考意义。

## 2 实验装置

脉冲激光辅助水中脉冲放电生成等离子体的实验装置如图 1 所示,该实验装置由反应器、脉冲电源、脉冲激光器等部分组成。脉冲电源的电压为 33 kV,输出电压和脉宽可调。脉冲激光是将 Nd:YAG 的输出激光进行倍频得到,激光波长为 532 nm,脉宽为 10 ns,且激光为线偏振光<sup>[14]</sup>;介质为液态去离子水。通过能量调节系统改变激光器发射的激光的能量,激光光束经透镜聚焦后注入到水中电场放电区域,聚焦光斑在 0.1~0.5 mm 的范围可调。脉冲触发器产生控制信号,使激光脉冲与电压脉冲同步。反应器由针-板电极构成,针电极采用金属钨棒,其直径为 0.5 mm,针尖曲率半径为 40  $\mu\text{m}$ ,平板电极为直径为 2 mm 的金属圆盘,电极间距为 1 mm,反应器内溶液总量为 300 mL,设平板电极平面为  $xy$  坐标平面, $z$  轴在针电极至板电极的延长线上。

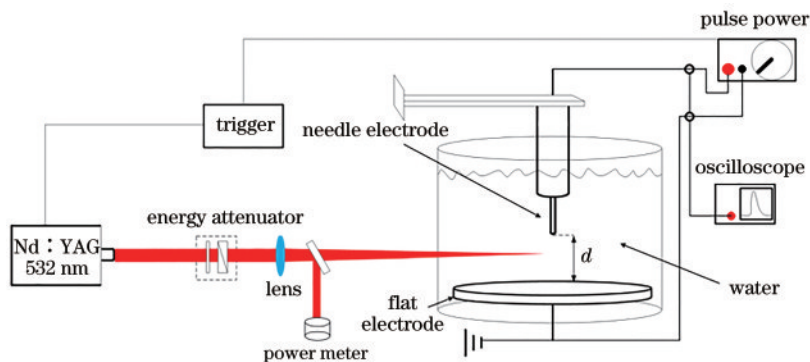


图 1 激光注入水中脉冲放电实验装置

Fig. 1 Experimental setup of pulse discharge when laser is injected in water

在建立几何模型时,为方便计算,设激光轴线与针电极延长线的交点为坐标原点(针-板电极间隙中点)。在针电极与平板电极上加上脉冲的高压,该电压产生的电场与激光相交于以坐标原点为中心的区域,如图 2 所示。在这个区域,激光与脉冲电压形成的电场叠加,使得电场强度增加,因此导致

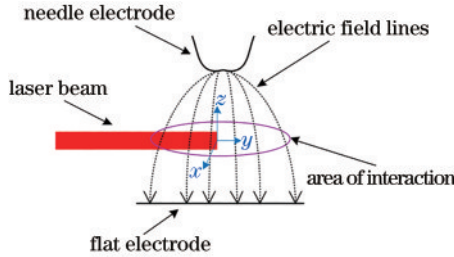


图 2 激光与电场相互作用区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of interaction between laser and electric field

更多的水分子被裂解,并导致更多的高能量电子、氢离子、氢氧根离子以及氧化性强的自由基团产生。

本文研究了在激光与电场的共同作用下,这一区域中等离子体通道内电子密度、电场强度随时间和空间的分布情况。

### 3 数学模型的建立

采用流体模型来描述带电粒子的集体运动,即将反应装置中的水分子视为背景粒子,而将电子、氢离子和氢氧根离子这三种带电粒子视为流体质点,这些质点在脉冲电压与激光电场两种外场及浓度差的作用下发生漂移扩散运动,整个运动过程被视作连续流体介质的流动过程,其带电粒子漂移扩散的连续方程<sup>[15]</sup>为

$$\frac{\partial n_{H^+}}{\partial t} + \nabla \cdot (n_{H^+} \mu_{H^+} \mathbf{E}_t) - D_{H^+} \cdot \nabla^2 n_{H^+} = G_1(|\mathbf{E}_t|) - \frac{n_{H^+} n_{OH^-} k_{H^+OH^-}}{e} - \frac{n_{H^+} n_e k_{H^+e}}{e}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_{OH^-}}{\partial t} + \nabla \cdot (n_{OH^-} \mu_{OH^-} \mathbf{E}_t) - D_{OH^-} \nabla^2 n_{OH^-} = \frac{n_e}{\tau} - \frac{n_{H^+} n_{OH^-} k_{H^+OH^-}}{e}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (n_e \mu_e \mathbf{E}_t) - D_e \cdot \nabla^2 n_e = G_1(|\mathbf{E}_t|) - \frac{n_{H^+} n_e k_{H^+e}}{e} - \frac{n_e}{\tau}, \quad (3)$$

式中: $n_{H^+}$ 表示氢离子密度; $t$ 为时间; $\mu_{H^+}$ 为氢离子迁移率; $D_{H^+}$ 为氢离子扩散率; $n_{OH^-}$ 表示氢氧根离子密度; $e$ 为电子电荷电量; $n_e$ 表示电子密度; $D_{OH^-}$ 与 $D_e$ 分别表示氢氧根离子与电子的扩散率; $\mu_e$ 为电子的迁移率; $G_1(|\mathbf{E}_t|)$ 为氢离子与电子的生成项; $k_{H^+OH^-}$ 为氢离子与氢氧根离子的复合速率; $k_{H^+e}$ 为氢离子电子复合速率; $\tau$ 为电子附着时间。

假设电场强度 $\mathbf{E}_t$ 为脉冲电压与激光两种外场相互叠加形成的总场,即

$$\mathbf{E}_t = -\nabla V + \mathbf{E}_l, \quad (4)$$

式中: $V$ 为外施脉冲电压下电极间的电势分布; $\mathbf{E}_l$ 为激光电场。

激光在与场的作用区域内传播时,其电场强度 $\mathbf{E}_l(\mathbf{r}, t)$ ( $\mathbf{r}$ 表示位矢)与磁场强度 $\mathbf{H}_l(\mathbf{r}, t)$ 的变化情况应满足 Maxwell 方程组<sup>[16]</sup>:

$$\nabla \times \mathbf{E}_l = \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}_l}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}_l = \sigma \mathbf{E}_l + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}_l}{\partial t}, \quad (6)$$

式中: $\epsilon_0$ 为真空介电常数; $\mu_0$ 为真空磁导率; $\epsilon_r$ 为作用区域介质的相对介电系数( $F \cdot m^{-1}$ ); $\mu_r$ 为相对磁

导率( $H \cdot m^{-1}$ ); $\sigma$ 为电导率( $C \cdot m^{-3}$ )。设电导率由三种带电粒子的密度和迁移率共同决定,即

$$\sigma = \mu_{H^+} n_{H^+} + \mu_{OH^-} n_{OH^-} + \mu_e n_e. \quad (7)$$

考虑到空间电荷之间的静电场存在相互作用,用泊松方程描述空间电荷使总场 $\mathbf{E}_t$ 发生的畸变:

$$\nabla \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}_t = n_{H^+} + n_{OH^-} + n_e. \quad (8)$$

描述水中传导电流对水环境温升影响的方程为

$$n_{H_2O} c_v \frac{\partial T}{\partial t} = k_T \nabla^2 T + \mathbf{E}_t \cdot \mathbf{j}, \quad (9)$$

式中: $n_{H_2O}$ 表示水的密度; $c_v$ 表示水比热容; $T$ 为水温; $k_T$ 表示水中的热传导系数; $\mathbf{j}$ 为电流密度。

而等离子体的相对介电系数和电导率则与激光(时谐场)的注入与激光频率密切相关,根据 Drude 模型<sup>[17]</sup>推导出等离子体等效相对介电常数 $\bar{\epsilon}_r(\omega)$ 和等离子体的有效电导率 $\sigma(\omega)$ ,等离子体有效电导率 $\sigma(\omega)$ 的表达式为

$$\sigma(\omega) = \frac{\omega_p^2}{i\omega + \nu_m}, \quad (10)$$

等离子体等效相对介电常数 $\bar{\epsilon}_r(\omega)$ 的表达式为

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_m^2} - i \frac{\nu_m}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_m^2}, \quad (11)$$

式中： $\omega$  为激光频率； $\nu_m$  为等离子体通道内的电子与氢离子、氢氧根离子、中性粒子（蒸汽水分子）的碰撞频率，其中， $m$  为电子质量； $\omega_p$  为等离子体固有频率，其大小为

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m \epsilon_0}}. \quad (12)$$

从(10)、(11)式可以看出，等离子体作为一种色散介质，对不同频率的激光会有截然不同的介电响应。由(5)、(6)式可推导出描述激光电场的传输方程<sup>[18]</sup>为

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}_1) - \frac{\omega^2}{c^2} \left[ \epsilon_r(\omega) - \frac{i\sigma(\omega)}{\epsilon_0 \omega} \right] \mathbf{E}_1 = 0, \quad (13)$$

式中： $c$  为真空中的光速。

将(10)、(11)式代入(13)式，得到激光在等离子体中的传播方程。从(12)式中可以看出激光频率  $\omega$ 、电导率  $\sigma(\omega)$  以及等效相对介电常数  $\epsilon_r(\omega)$  决定了激光在等离子体通道内的传播行为。

## 4 仿真结果及分析

### 4.1 仿真条件及内容

模型中的带电粒子密度变化将增加模型求解难度，因为强激光击穿水介质并发生电离是一个复杂的物理过程，这一过程中将产生高温高压等离子体，等离子体向外膨胀形成冲击波或超声波，同时在水中形成空泡，这导致介质密度发生很大变化。若不考虑放电过程对介质密度的影响，将模型中作用区域的介质密度视为不变，从而简化计算。事实上，在激光与水介质作用的前 24 ns 内<sup>[14]</sup>，随着激光的不断注入，作用区域内介质的峰值压力和峰值温度是逐渐增加的，在这段时间内，激光能量的增加仅会导致压力和温度上升率增加，在 24 ns 后介质开始膨胀，压力和温度也开始逐渐下降，这意味着在激光开始作用的前 24 ns 内水介质的密度变化是可忽略的。本文中只对激光脉冲持续作用 10 ns 内的过程进行模拟仿真，其结果完全可以说明激光与电场共同作用下水介质产生等离子体的可行性，这样就不需要考虑放电过程对介质密度的影响。

等离子体通道对脉冲电压的屏蔽作用，使放电击穿时通道内的电场强度近乎于零。通道内高能电子做无规则热运动，氢离子、氢氧根离子以及水

蒸气分子的运动速度则很小（近似于静止状态）。因此，在模拟激光与等离子体通道的相互作用过程中，忽略脉冲电压的作用，将该相互作用过程简化为激光与具有一定初始电子密度的等离子体通道的相互作用过程。

根据仿真模拟计算，当加载在电极间的脉冲电压峰值为 33 kV 时，经过 295 ns 后电子密度达到稳定值，在坐标原点（激光与电场作用区域的中心）的初始电子密度为  $1.65 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ <sup>[15]</sup>。此时加入激光脉冲，在激光脉冲持续作用 10 ns 内，模拟仿真等离子体通道内电子密度、电场强度随时间和空间的分布情况；选取激光波长为 532 nm，因为密度在  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  数量级以上的稠密等离子体对波长为 532 nm 的激光有较强的吸收作用<sup>[19]</sup>；将激光调节到垂直线偏振，即调节激光的偏振方向与针电极尖端到平面电极的垂直线（ $z$  轴）方向一致，这样可使得激光场与电场有效叠加。

### 4.2 激光辅助作用对等离子体通道电子密度的影响

在注入激光能量为 50 mJ、光斑直径为 0.1 mm 时，等离子体通道内电子密度变化的情况如图 3 所示。可见，在  $t = 0 \text{ ns}$  时刻[图 3(a)]，即在激光脉冲前沿的冲击作用下，在激光与电场作用区域的边界附近有一块电子密度突增区域，其电子密度峰值从  $1.65 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  突增到  $8.29 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ，这表明激光辅助作用对电场放电中提高等离子体的电离率的效果是很明显的。在  $t = 5 \text{ ns}$ [图 3(b)]和  $t = 10 \text{ ns}$ [图 3(c)]时，通道边界附近的电子密度突增区域面积明显增大，但电子密度峰值增加不大，分别为  $9.18 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  和  $9.27 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ，这说明电子密度的增强区域是由中心向外扩展的区域。

图 4 给出了注入激光能量为 50 mJ 时等离子体通道内电子密度沿  $z$  轴的分布情况。三条曲线

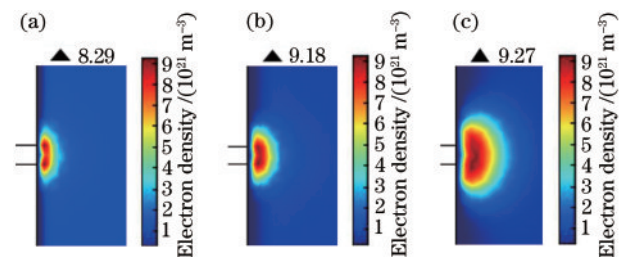


图 3 注入激光能量为 50 mJ 时等离子体通道内电子密度的变化情况。(a) 0 ns; (b) 5 ns; (c) 10 ns

Fig. 3 Changes of electron densities in plasma channel for injected laser energy of 50 mJ. (a) 0 ns; (b) 5 ns; (c) 10 ns

分别对应  $t=0, 5, 10$  ns 时刻。可以看出, 曲线的基本形状是相同的, 为钟形分布, 大部分的电子都集中在以  $z=0.01$  为中心、以曲线最大值的  $1/2$  处所对应的宽度  $w$  范围内。不同之处在于: 随着激光作用时间的延长, 曲线上各点的电子密度增加, 曲线宽度  $w$  增大, 这说明在注入激光能量为 50 mJ 的条件下, 突增区域面积随时间的推移而增大。由图 4 还可看出, 电子密度分布并不对称于横坐标  $z=0$  点, 这是由针板电极形成的电场分布不均匀所致。

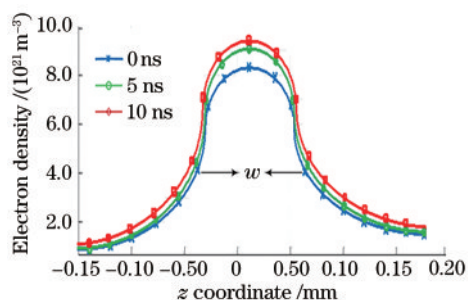


图 4 注入激光能量为 50 mJ 时等离子体通道内电子密度沿  $z$  轴的分布

Fig. 4 Distribution of electron density at  $z$  axis in plasma channel for injected laser energy of 50 mJ

逐步增大注入激光能量, 电子密度的演化过程与图 3 所发现的规律一样, 但是当注入激光能量增大到 80 mJ 时, 等离子体通道内电子密度却呈现出异常的变化规律, 如图 5 所示。在  $t=5$  ns 时电子密度突增区域的面积增大, 峰值达到了  $10 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ , 但是在  $t=10$  ns 时, 电子密度突增区域面积竟然减小了, 密度峰值也减小为  $9.61 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 。

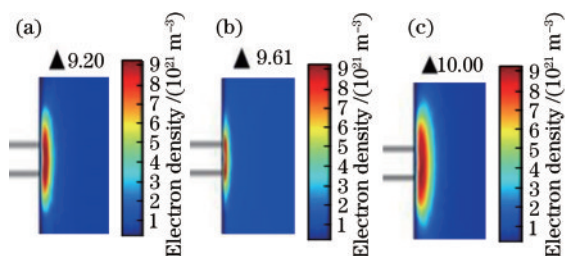


图 5 注入激光能量为 80 mJ 时等离子体通道内电子密度变化情况。(a) 0 ns; (b) 5 ns; (c) 10 ns

Fig. 5 Change of electron density in plasma channel for injected laser energy of 80 mJ. (a) 0 ns; (b) 5 ns; (c) 10 ns

激光注入到等离子体通道, 等离子体通过多种机制吸收激光能量, 其中一个重要的机制是逆韧致吸收, 即电子在激光作用下产生振荡, 以一定的概

率与重粒子(离子和中性粒子)碰撞, 把能量传递给重粒子。等离子体也可通过非碰撞吸收机制吸收激光能量, 例如共振吸收和各种非线性参量不稳定性产生的吸收。

激光在等离子体中传播时, 激光的频率  $\omega$  和波数  $k$  需要满足色散条件<sup>[20]</sup>:  $\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2$ , 这里  $k = 2\pi/\lambda$ ; 由(12)式可知, 等离子体频率与等离子体通道中的电子密度(电子数  $n_e$ )的平方根成正比, 即等离子体频率随电子密度的增加而增大, 当等离子体频率大于激光频率时, 即  $\omega^2 < \omega_p^2$  时,  $k^2 < 0$ ,  $k = \pm i|k|$  (其中  $k$  为波矢量), 激光传播因子变为  $\exp(ikx - i\omega t) = \exp(-i|k|x - i\omega t)$ , 振幅将随空间很快衰减。这意味着激光只能在低于临界密度等离子体中传播, 否则激光将被反射, 这个等离子体临界密度是指等离子体频率等于激光频率时的密度, 换言之, 稠密等离子体将对激光起到屏蔽作用。由(12)式可得临界密度为

$$n_c = \frac{\epsilon_0 m \omega_p^2}{e^2} \approx \frac{10^{21}}{\lambda^2}, \quad (14)$$

(14)式说明激光波长越短, 临界电子密度越高, 例如, 采用 YAG 倍频激光, 其波长  $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ , 计算出临界电子密度约为  $3.533 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 。

在图 3 中, 注入激光能量为 50 mJ, 在  $t=0$  ns 和  $t=5$  ns 后, 突增中心区域的电子密度大于临界密度, 使得激光不能直接穿越这一中心区域, 但是等离子体波引起电子密度轮廓的变化, 导致激光在等离子体传输中发生反射、折射和散射等过程, 激光仍然能够沿突增中心区域边缘向前或周围传播, 并被周围电子密度较低的等离子体吸收。图 3(b)、(c) 为突增区域面积增大的图像, 而电子密度峰值增加幅度不大。

图 5 中, 注入激光能量增加到 80 mJ, 使电子密度升高过快, 激光注入瞬间 ( $t=0$  ns 时), 出现了一块较大的电子密度的突增区域, 如图 5(a) 所示, 虽然这个区域电子密度已经超过等离子体临界密度, 但是稳定的激光屏蔽(即等离子体频率大于激光频率)还未建立起来, 激光还可通过这个突增区域继续向前传输, 因此电子密度的突增区域比  $t=0$  ns 时大, 其峰值密度也增加, 如图 5(b) 所示。而在  $t=10$  ns 时, 稳定的激光屏蔽已经建立, 使得激光在传播极其微小的一段距离后被等离子体介质吸收并迅速衰减, 即产生所谓的等离子体中的趋肤效应<sup>[21-23]</sup>, 因此导致图 5(c) 中突增区域面积以及电子密度不但不增加, 反而下降。

### 4.3 激光辅助作用对等离子体通道电场强度分布的影响

图 6 为 50 mJ 激光注入等离子体通道内时电场强度的变化情况。可以看出,在  $t=0$  ns 时 [图 6(a)],通道内大面积区域的电场强度能够达到  $1.00 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  以上,这说明部分激光可注入到等离子体通道的较深区域。在  $t=5$  ns 时 [图 6(b)],通道内的电场强度明显减小,大部分区域的电场强度都在  $1.00 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  以下,场强集中在激光注入位置附近。在  $t=10$  ns 时 [图 6(c)],电场强度出现了进一步的畸变,场强被完全压缩在注入边界一个非常窄小的区域内,激光几乎被完全局限在注入边界附近,很显然,在脉冲激光的作用下,电场强度也呈现出趋肤效应。

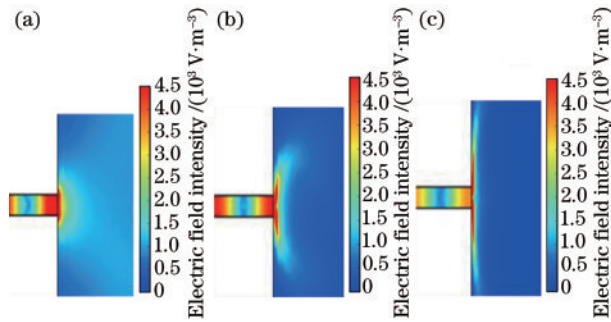


图 6 激光注入等离子体通过程中电场强度的变化情况。  
(a) 0 ns; (b) 5 ns; (c) 10 ns

Fig. 6 Distributions of electric field intensity in laser leading-in plasma channel. (a) 0 ns; (b) 5 ns; (c) 10 ns

### 4.4 光斑大小对等离子体通道电子密度的影响

当注入激光能量为 50 mJ, 调节光斑直径大小分别为 0.1, 0.2, 0.3 mm, 给出了光斑大小对等离子体通道电子密度的影响, 如图 7 所示。可以看到, 电子密度的突增区域会随着激光光斑直径的增大而增大。显然, 激光光斑的增大使得通道内更大面积区域的电子受到电场作用与周围的中性水分子碰撞电离出新的电子, 导致等离子体通道内电子密度突增区域的面积变大。但是, 光斑的增大使能量更为发散, 单位面积上的光强(电场强度)减弱, 因此, 电子密度增强区域的峰值会随着光斑直径的增大而下降。

图 8 给出了光斑直径为 0.1, 0.2, 0.3 mm 时, 电子密度沿  $z$  轴的分布。随着激光光斑直径的增大, 单位面积上的光变得发散, 致使曲线宽度  $w$  增大, 突增区域电子密度变小。电子密度最大值和曲线宽度  $w$  如表 1 所示。

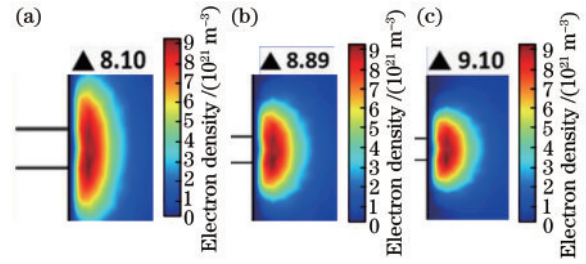


图 7 光斑大小对等离子体通道中电子密度的影响。

(a) 0.1 mm; (b) 0.2 mm; (c) 0.3 mm

Fig. 7 Effect of spot size on electron density in plasma channel. (a) 0.1 mm; (b) 0.2 mm; (c) 0.3 mm

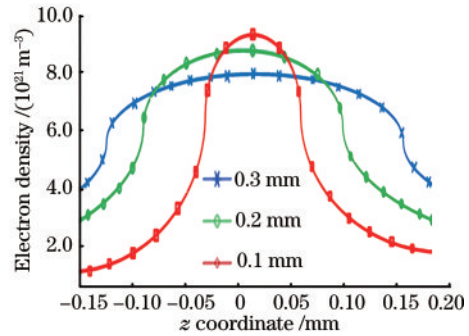


图 8 光斑大小对等离子体通道电子密度( $z$ 轴)的影响

Fig. 8 Effect of spot size on electron density in plasma channel ( $z$  axis)

表 1 光斑直径对电子密度与宽度的影响

Table 1 Effect of spot diameter on electron density and width

Spot diameter/mm	0.1	0.2	0.3
Peak electron density / ( $10^{21} \text{ m}^{-3}$ )	9.10	8.89	8.10
Width $w$ / mm	0.018	0.025	0.034

### 4.5 激光注入位置对等离子体通道电子密度的影响

在针-板电极结构中, 电场分布是不均匀的, 在  $z$  轴上, 电场从起点 0 开始沿着  $z$  轴正方向逐渐增强, 在针尖处电场最强, 仿真计算出  $z$  坐标为 -0.2, 0.5, 0.8 mm 三个位置上的初始电子密度分别为  $1.51 \times 10^{21}$ ,  $1.65 \times 10^{21}$ ,  $5.56 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  [15]。图 9 给出了这三个位置的电子密度分布, 对应的电子密度峰值分别为  $9.44 \times 10^{21}$ ,  $9.56 \times 10^{21}$ ,  $10.46 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ , 这说明激光注入位置从板电极沿  $z$  轴正方向移动时, 电子密度的峰值不断增大, 最大峰值位于 0.8 mm 处, 达到最大峰值后, 针电极附近形成等离子体鞘层, 但当激光注入位置继续从 0.8 mm 移动到 1.0 mm (针电极处) 时, 电子密度峰值开始下降, 曲线终点对应的函数值与初始电子密度值相差不大。

继续分析图 9 还会发现, 激光注入位置  $z$  坐标为

0.2 mm、0.5 mm 两个位置的电子密度的增幅(最大值与初始值之差)相差不大,分别为  $7.93 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  和  $7.91 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 。而激光注入  $z$  坐标为 0.8 mm 位置的电子密度的增幅仅为  $4.90 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ,明显小于之前两种情况。

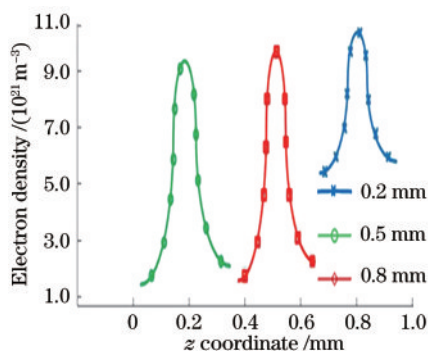


图 9 激光注入位置不同对等离子体通道电子密度的影响  
Fig. 9 Effect of laser incident position on electron density in plasma channel

上述现象说明,激光的辅助作用导致的电子密度的增加幅度与注入位置的初始电子密度密切相关。初始电子密度相对较低时,等离子体对激光的屏蔽作用不明显,通道内的电子大量吸收光能电离出新的电子。而初始电子密度越高,等离子体对激光的屏蔽作用越明显,只有少量激光可进入通道内部,电子密度的增幅就会减小。但是,当改变激光入射位置时,在等离子体通道不同区域的电子密度峰值相差不是很大,这说明电子密度已经趋于饱和状态。

## 5 结 论

通过建立激光在等离子体内传播的物理模型,通过仿真模拟了激光和电场共同作用导致的电子密度、电场强度的变化。将能量为 50 mJ、光斑直径为 0.1 mm 的激光入射到电场预放电的通道内,其电子密度峰值从  $1.65 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  突增到  $8.29 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ,这说明在电场放电中加入激光对于提高等离子体的电离率有显著作用,也就是说,在激光与电场共同作用下将水电离的方案是可行的。但是要将本技术方案实用化,还有许多问题需要解决,例如,如何克服或避免激光与电场共同作用下水电离存在的屏蔽效应、趋肤效应等。相对于目前采用单一的水中电场放电电离或激光诱导水击穿电离产生等离子体的方法而言,本文研究提供了一种新的思路和方案。

## 参 考 文 献

- [1] Wüthrich R, Fascio V. Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon-an overview [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(9): 1095-1108.
- [2] Lal A, Bleuler H, Wüthrich R. Fabrication of metallic nanoparticles by electrochemical discharges [J]. Electrochemistry Communications, 2008, 10(3): 488-491.
- [3] Wang L, Jiang X Z. Plasma-induced reduction of chromium (VI) in an aqueous solution [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(22): 8492-8497.
- [4] Taghvaei H, Shirazi M M, Hooshmand N, et al. Experimental investigation of hydrogen production through heavy naphtha cracking in pulsed DBD reactor [J]. Applied Energy, 2012, 98: 3-10.
- [5] Hou T F, Zhang S Y, Chen Y D, et al. Hydrogen production from ethanol reforming: catalysts and reaction mechanism [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 132-148.
- [6] Chanburanasiri N, Ribeiro A M, Rodrigues A E, et al. Hydrogen production via sorption enhanced steam methane reforming process using Ni/CaO multifunctional catalyst [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(24): 13662-13671.
- [7] Czykowski D, Hrycak B, Miotk R, et al. Hydrogen production by conversion of ethanol using atmospheric pressure microwave plasmas [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(40): 14039-14044.
- [8] Sun B, Zhao X T, Xin Y B, et al. Large capacity hydrogen production by microwave discharge plasma in liquid fuels ethanol [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(38): 24047-24054.
- [9] Zhou S S, Wang X B, Zuo D L. Characteristics of carbon plasma induced by pulsed laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0111001.  
周素素, 王新兵, 左都罗. 脉冲激光诱导碳等离子体的特性 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0111001.
- [10] Chen M H, Li C B, Liu L M. Discharge state of laser induced and enhanced arc plasma [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(7): 1661-1667.  
陈明华, 李陈宾, 刘黎明. 激光诱导增强电弧等离子体的放电状态研究 [J]. 高电压技术, 2013, 39(7): 1661-1667.

- [11] Dong B, He X Y, Wang Y R, et al. Characteristics of discharge channel in spark discharge assisted laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(8): 0847006.  
董博, 何小勇, 王亚蕊, 等. 火花放电辅助-激光诱导击穿光谱技术中的放电通道特性研究[J]. 光子学报, 2018, 47(8): 0847006.
- [12] Yu J L, Li C, Yao G X, et al. Spatial evolution characteristics of laser-induced plasma in liquid matrix[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0802001.  
余建立, 李乘, 姚关心, 等. 激光诱导液相基质等离子体的空间演化特性[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0802001.
- [13] Liu Y, Chen Z S, Shi J M. Research progress on electromagnetic wave transmission via femtosecond-laser plasma channel [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 090002.  
刘洋, 陈宗胜, 时家明. 飞秒激光等离子体通道电磁波传输研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 090002.
- [14] Lu J Y, Geng D S, Chen L. Numerical simulation of high intensity of laser induced plasma shock wave in water [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0902001.  
鲁建英, 耿德坤, 陈朗. 强激光水中诱导等离子体冲击波数值模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902001.
- [15] Qian Y, Feng Y Q, Huang M S, et al. Formation and growth of plasma channels generated by discharge of high voltage nanosecond pulse in water: a simulation study [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2019, 39(12): 1119-1129.  
钱杨, 冯音琦, 黄民双, 等. 水中脉冲电压放电形成等离子体通道模拟分析[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(12): 1119-1129.
- [16] Yu F C, Zheng C K. Electrodynamics[M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2003.  
虞福春, 郑春开. 电动力学[M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [17] Su J, Sun C, Wang X Q. A metallic dispersion model for numerical simulation[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(2): 408-414.  
苏杰, 孙诚, 王晓秋. 一个适用于数值计算的金属色散模型分析研究[J]. 光电子·激光, 2013, 24(2): 408-414.
- [18] Li L, Wu H, Ma X Q. Research on propagation mechanism of electromagnetic wave in magnetized plasma[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(20): 30-34.  
李力, 吴寒, 马修泉. 电磁波在磁化等离子体中传输机理研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(20): 30-34.
- [19] Zhang H O, Wang K, Wang G L. Numerical simulation of laser plasma interaction [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(12): 2039-2042.  
张海鸥, 王琨, 王桂兰. 激光等离子体相互作用的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(12): 2039-2042.
- [20] Chang T Q. Laser plasma interaction and laser fusion [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1991.  
常铁强. 激光等离子体相互作用与激光聚变[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1991.
- [21] Weibel E S. Anomalous skin effect in a plasma[J]. Physics of Fluids, 1967, 10(4): 741.
- [22] Gamaliy E G, Dragila R. Interaction of ultrashort laser pulses at relativistic intensities with solid targets: relativistic skin effect[J]. Physical Review A, 1990, 42(2): 929-935.
- [23] Rozmus W, Tikhonchuk V T. Skin effect and interaction of short laser pulses with dense plasmas [J]. Physical Review A, 1990, 42(12): 7401-7412.