

文章编号:1001-5078(2025)04-0533-07

· 激光应用技术 ·

# 激光诱发等离子体中强磁场产生与演化机制

周爱华, 吴静进, 吴馨芳

(南昌大学 科学技术学院, 江西 南昌 332020)

**摘要:**为充分研究激光诱发等离子体强磁场的时间演化机制,对激光诱发等离子体中强磁场产生机制展开研究。通过激光等离子相互作用机理,分析二者互相作用时,产生的多光非线性 Compton 散射和强磁场的入射和散射光耦合频率,得到激光诱发等离子体中强磁场的诱发机制。在诱发机制下,计算强磁场温度梯度与密度梯度在强磁场空间内分布时的磁场强度,从而得到两者在强磁场空间内分布的具体时间演化机制。具体应用实验表明:在二种机制下,通过计算离子体电流密度分量变化和电子密度分布状态,且在电流波动条件下熵值结果为 0.28,具有较高的稳定性,验证了两种机制。

**关键词:**等离子体;强磁场;产生机制;相互作用;激光电场;耦合频率

中图分类号:TN249;O435 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.008

## Mechanism of strong magnetic field generation and evolution in laser induced plasma

ZHOU Ai-hua, WU Jing-jin, WU Xin-fang

(College of Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 332020, China)

**Abstract:**To fully study the temporal evolution mechanism of strong magnetic fields in laser-induced plasma, the mechanism of strong magnetic field generation in laser-induced plasma is investigated. By analyzing the mechanism of laser plasma interaction, the coupling frequency of incident and scattered light generated by multi light nonlinear Compton scattering and strong magnetic field during their interaction is analyzed, and the induction mechanism of strong magnetic field in laser-induced plasma is obtained. Under the induction mechanism, the magnetic field strengths of the strong magnetic field temperature gradient and density gradient are calculated when they are distributed in the strong magnetic field space, so as to obtain the specific temporal evolution mechanism of the distribution of the two in the strong magnetic field space. Specific application experiments show that the two mechanisms are verified by calculating the changes in the ion current density component and the distribution of electron density, and the entropy value results in 0.28 under the current fluctuation conditions, which has high stability.

**Keywords:** plasma; strong magnetic field; generation mechanism; interaction; laser electric field; coupling frequency

### 1 引言

激光与物质相互作用是现代物理学中的一个重要研究领域。高功率激光可以产生高温、高密度的

等离子体,这种等离子体具有极高的能量和粒子数密度<sup>[1]</sup>。这种等离子体在很多应用中都扮演着关键角色,比如惯性约束核聚变、天体物理、国防科技

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(No. GJJ2203901)资助。

作者简介:周爱华(1986-),女,硕士,讲师,研究方向为激光等离子体物理技术。E-mail:Zhouah36993@163.com

收稿日期:2024-08-13

等。激光在等离子体中强磁场产生的作用与机理是其中非常重要的领域,在这一领域,很多相关学者展开研究,如:

赵洋等人<sup>[2]</sup>提出二元激光等离子体的时空演化机制研究方法,该方法建立激光支持燃烧与轰爆波等离子体后,观察等离子体形态、结构以及粒子寿命等参数,结合激光与等离子体的物理特性,得到激光与离子体中强磁场内离子元的相互作用,以获得激光诱发等离子体中强磁场后的时空演化机制。该方法可产生较高的能量密度和较强的等离子体效应,但其仅针对高激光辐照度脉冲激光展开实验,其实验角度较为单一,得到的激光诱发等离子体中强磁场产生机制结果较为片面,应用效果欠佳。王桂才等人<sup>[3]</sup>提出激光等离子体在发散磁场中的机制研究方法,该方法将螺线管磁场引入到激光等离子体的扩散区域内,对激光等离子体运动进行了约束,再通过设置不同激光能量,在不同初始条件下对等离子体中强磁场进行诱发,通过分析等离子体横向、纵向分布情况,得到激光诱发等离子体中强磁场产生机制。该方法通过引入螺线管磁场更好地控制了等离子体的行为,增加了实验的可控性,但该方法在实际操作过程中只能获得特定条件下的结果,并不能全面反映激光诱发等离子体中强磁场产生机制的所有方面,应用效果欠佳。王媛媛等人<sup>[4]</sup>提出激光在均匀等离子体中磁场放大机制研究方法,该方法运用一维离子模拟程序模拟激光波长为800nm时,激光对等离子体中强磁场产生的背向拉曼散射放大机制。该方法可有效对激光与等离子体之间的相互作用进行深入分析,但并未考虑等离子体密度、温度等变化因素存在的影响,导致该方法应用效果不佳。

面对上述情况,本文进一步研究激光诱发等离子体中强磁场产生与演化的相关机制,以进一步理解激光与物质相互作用的过程。为此,将采用理论建模和数值模拟相结合的方法,对激光诱发等离子体中磁场两大机制进行详细地分析和研究。

## 2 激光诱发等离子体中强磁场产生机制研究

### 2.1 S 激光诱发等离子体中电磁波的色散关系分析

当较高功率的激光光束照射到靶物上时,激光能量一部分会被靶物吸收<sup>[5-6]</sup>,产生热等离子体。具体的表述如下:

令  $I_L$  表示高功率激光强度,其计算公式如下:

$$I_L = \frac{Y_L}{S\tau} \quad (1)$$

式中,  $Y_L$  表示靶物接收到高功率激光的能量数值;  $S$  表示靶物接收激光能量的面积;  $\tau$  表示激光脉冲时间宽度。

令  $C$  表示激光光速;  $\varepsilon_0$  表示真空介电常数,通过激光电场的方式描述高功率激光强度,则计算公式如下:

$$I'_L = \frac{\varepsilon_0 Y_0^2}{2} \quad (2)$$

式中,  $Y_0$  为激光电场,其计算公式如下:

$$Y_0 = 2.73 \times 10^3 I'_L \quad (3)$$

激光诱发等离子聚变时,其强度需要达到  $10^{14} \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$  左右,此时等离子体的温度可达到几千万度,在超高温情况下,激光诱发的等离子体会以高度向真空膨胀,形成等离子体区<sup>[7]</sup>,在该区域内,等离子体的密度呈现不均匀分布情况。激光诱发等离子体中的电磁波满足色散关系,其表达式如下:

$$\begin{cases} \omega^2 = \omega_p^2 g_e + \zeta^2 \kappa^2 Y_0 \\ \kappa = \frac{2\pi I'_L}{\lambda \omega^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\omega$  表示等离子体强磁场电磁波园频率;  $\lambda$  表示电磁波波长;  $\omega_p$  表示等离子体频率;  $\zeta$  表示色散因数;  $\kappa$  表示波矢的衍射损失因子。令  $e$  表示电子电荷,参数  $g_e$  表示单位体积电子密度,单位体积电子密度表达式如下:

$$g_e = \frac{\varepsilon_0 m_e \omega^2}{\kappa e^2} \quad (5)$$

式中,  $m_e$  表示静止质量。

依据公式(5)可知,在低于临界密度的等离子体内,激光脉冲才可以穿透,此时激光的波长与离子体中强磁场临界密度数值成负相关关系,从色散的角度分析,在等离子密度不同<sup>[8-9]</sup>,对激光脉冲传播也存在影响,激光的频率在传播过程中可看作是恒定数值,在激光诱发等离子体时,等离子体的状态才会从时间尺度上变化<sup>[10]</sup>,此时激光在诱发的等离子强磁场内传播的频率才具有意义。

### 2.2 激光诱发等离子体中强磁场机制

依据色散关系,分析激光诱发等离子体中强磁场的机制。激光和等离子体互相作用时,结合色散关系,

会发生多光非线性 Compton 散射。具体过程如下:

$\phi$  表示电子与散射光运动方向夹角;  $\phi'_1$  表示电子与散射方向夹角;  $\phi'$  光子散射角,  $\omega_s$  表示散射的光频,  $\omega_s$  计算公式如下:

$$\omega_s = \frac{N\omega_0(1 + Z\cos\phi)(1 - Z_f\cos\phi'_1)}{\delta^2 + \frac{\delta N\hbar\omega_0(1 + Z\cos\phi)(1 - \cos\phi')}{g_e m_0 \zeta^2}} \quad (6)$$

式中,  $N$  表示激光和电子同时作用的光子数量;  $\omega_0$  分别表示入射光频;  $\delta$  表示量度散射非弹性参数;  $Z, Z_f$  分别表示电子散射前后的 Lorentz 因子速度;  $\hbar$  表示普朗克常数;  $m_0$  表示电子静质量。令  $\omega_c$  表示激光诱发等离子体中强磁场的入射和散射光耦合频率, 其计算公式如下:

$$\omega_c = \omega_s - \omega_0 \quad (7)$$

将公式(6)代入到公式(7)内, 则有:

$$\omega_c = \frac{N\omega_0^2(1 + \beta\cos\phi)(1 - \beta_f\cos\phi'_1)}{\delta^2 + \frac{\delta N\hbar\omega_0(1 + \beta\cos\phi)(1 - \cos\phi')}{m_0\zeta^2}} - \omega_0 \quad (8)$$

将公式(8)的耦合光作为等离子体产生磁场的机制。

### 2.3 激光诱发等离子体中强磁场的时间演化机制分析

激光脉冲与等离子体相互作用的区域内会形成自生磁场, 磁场形状为环形, 该磁场可导致激光的热电子受阻改变激光诱发等离子体冕区电子密度轮廓分布形状。依据 2.2 节的激光诱发等离子体中强磁机制, 激光发射到靶物表面上, 导致靶物表面等离子体的温度和密度的梯度方向不一, 该情况为等离子膨胀, 等离子体的膨胀方向与靶物表面的法线方向一致, 而受靶物电子热传导影响, 等离子温度梯度方向和靶物面平行, 在该情况下热电动势转换成热电流, 诱发磁场发生演化, 该磁场在激光发射的持续时间内会保持稳定状态。具体演化机制如下:

令  $\frac{\partial\Phi}{\partial t}$  表示激光诱发等离子体中强磁场产生热电源项, 在激光发射持续时间内, 激光诱发等离子体中强磁场产生热电源项计算公式如下:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} = \frac{\omega_c(\nabla T_e \times \nabla n_e)}{g_e e} \quad (9)$$

式中,  $\Phi$  表示激光诱发等离子体中的自生磁场;  $t$  表

示时间;  $\nabla T_e, \nabla n_e$  分别表示温度与电子密度变量。

在激光诱发等离子体强磁场中, 密度梯度方向与靶物面法线方向相同, 温度梯度是以激光发射的焦点为中心向四周辐射, 因此温度梯度和密度梯度又乘后, 会得到激光诱发等离子体强磁场的环形结构。激光在诱发等离子体时, 超热电子运动形成准静态磁场。在准静态磁场作用下, 电子的动量方程表达公式如下:

$$\frac{\partial P_e}{\partial t} = -eE - \frac{ev_e\Phi}{\zeta} - \frac{\nabla T_e}{g_e} \quad (10)$$

式中,  $P_e$  表示电子相对论动量;  $E$  表示激光在诱发等离子体中强磁场电场强度;  $v_e$  表示电子分布函数。

对激光诱发等离子体中强磁场进行线性化时, 令其时间尺度分别由脉动激光表征的快时间尺度和由粒子声频率表征的慢时间尺度组成, 然后分别将电子分布函数、电场和磁场拆分为快时间尺度和慢时间尺度, 表达公式如下:

$$\begin{cases} v_e = \langle v_e \rangle + v_{ef} \\ E = \langle E \rangle + E_f \\ \Phi = \langle \Phi \rangle + \Phi_f \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\langle v_e \rangle, \langle E \rangle, \langle \Phi \rangle$  表示电子分布函数、电场和磁场的慢时间尺度;  $v_{ef}, E_f, \Phi_f$  表示电子分布函数、电场和磁场的快时间尺度。

将公式(11)代入到公式(10)内, 则可得到动量演变的慢变分量方程, 表达公式如下:

$$\frac{\partial \langle P_e \rangle}{\partial t} = -e \langle E \rangle - \frac{e \langle v_e \rangle \langle \Phi \rangle}{\zeta} + H - \frac{\nabla T_e}{g_e} \quad (12)$$

式中,  $A$  表示激光波矢量;  $H$  表示磁场强度。

按照法拉第与安培原理, 可从公式(12)推导出激光诱发等离子体中强磁场的时间演化方程如下:

$$\nabla \langle \Phi \rangle = \frac{\pi e g (\langle v_i \rangle - \langle v_e \rangle) \partial \langle P_e \rangle}{\zeta \partial t} \quad (13)$$

式中,  $g = g_e$ , 其是激光诱发等离子体的初始密度;  $v_i$  表示非相对论粒子的平均速度。

依据公式(13), 可推导出慢变分量情况下激光等

$$\frac{\partial \langle \Phi \rangle}{\partial t} = \frac{\zeta \nabla (\langle \Phi \rangle \frac{\nabla \langle \Phi \rangle}{n_e})}{4\pi e} + \zeta \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\zeta^3 \nabla T_e m_e}{e\gamma^2} \quad (14)$$

式中,  $\gamma$  表示衰减速率, 右侧第二、三项均为激光诱发等离子体强磁场的热源项。

对公式(14)第二、三项激光诱发等离子体强磁场热源项进行分解, 可得到激光诱发等离子体强磁场强度的时间演化方程, 表达公式如下:

$$\frac{\partial \langle \Phi_1 \rangle}{\partial t} \equiv \frac{\zeta \omega_c (\nabla T_e \times \nabla n_e)}{g_e e} + \frac{\zeta^3 \nabla T_e m_e}{e \gamma^2} \quad (15)$$

式中,  $\equiv$  表示求和符号;  $\frac{\partial \langle \Phi_1 \rangle}{\partial t}$  表示激光诱发等离子体强磁场强度。

经过上述过程, 可分析出其温度梯度与密度梯度在强磁场空间内分布的时间演化机制。

### 3 结果与分析

#### 3.1 实验环境

以 20 TW 钛蓝宝石激光器作为实验对象, 其参数如表 1 所示。实验环境如图 1 所示。

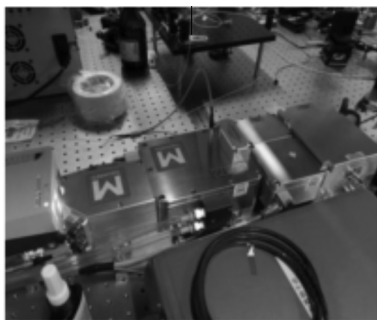


图 1 实验环境

Fig. 1 Experimental environment

表 1 20 TW 钛蓝宝石激光器详细参数

Tab. 1 Detailed parameters of 20 TW titanium sapphire laser

参数名称	参数值	参数名称	参数值
激光类型	钛蓝宝石激光器	波长范围/nm	530 ~ 560
最大功率/TW	20	光束质量	$M^2 < 1.5$
脉冲能量/J	100 ~ 200	光束直径/mm	2 ~ 3
脉冲宽度/ns	10 ~ 20	冷却方式	水冷系统
重复频率/Hz	1 ~ 5	使用环境	常温常压环境

#### 3.2 实验流程

实验靶物为圆柱形铜膜靶, 其厚度为 20  $\mu\text{m}$ , 将圆柱形铜膜靶上具有一个法兰, 通过法兰口将压缩后的激光引入靶室内, 为保证每一次激光均打到铜膜靶上, 使用五维步进电机控制圆柱形铜膜靶位置, 利用抛物镜将压缩后的激光聚焦到圆柱形铜膜靶上。实验过程中, 激光焦斑使用针孔摄像机与 X 射

线工业相机配合测量, 使用 OMA 光学多道分析谱仪获得激光光谱, 在实验过程中, 设置激光与圆柱形铜膜靶的法线夹角为  $35^\circ$ , 展开测试。运用本文方法分析上述实验过程中激光诱发等离子体中强磁场产生与演化机制。

#### 3.3 实验结果分析

运用本文方法对上述实验过程中激光诱发等离子体中强磁场产生机制展开分析, 以某次实验结果作为研究对象, 运用本文方法获取该次实验激光诱发等离子体产生的自生强磁场, 如图 2 所示。

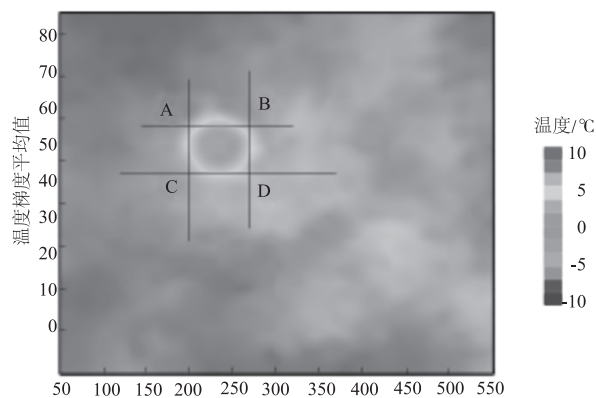


图 2 激光诱发等离子体产生的自生强磁场

Fig. 2 Self-generated strong magnetic field generated by laser-induced plasma

分析图 2 可知, 当激光发射到圆柱形铜膜靶上时, 圆柱形铜膜靶吸收一部分高强激光能量, 圆柱形铜膜靶表面在高温和电离的作用下产生等离子体。这种能量转换导致等离子体中的电荷分离, 产生电流和电场。在电流和电场的作用下, 等离子体会产生自生磁场。这个磁场是由电流在空间中产生的磁力线组成的, 它们会对等离子体产生力的作用, 进一步影响等离子体的运动和行。而在该次实验, 圆柱形铜膜靶表面点 A、B、C、D 中间位置形成自生强磁场, 该结果说明运用本文方法可有效获得激光诱发等离子体中强磁场, 为分析其产生机制提供数据分析基础。

接下来, 为验证所提方法的应用效果, 将文献[3]方法和文献[4]方法作为对比方法, 分别从等离子体的电流密度分量变化角度和电子密度分布角度与所提方法进行对比分析。

首先, 分别分析所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法激光诱发等离子体中强磁场过程中, 等离子体的电流密度分量变化情况。在实际情况中, 当激光诱发等离子体产生自生强磁场时, 等离子体迅

速吸收强激光能量,将激光的能量转换成等离子体的内能和动能,使等离子体内的电荷分离产生大量的电流,促使激光诱发等离子体自生强磁场的进一步增强,导致磁场的电流密度分量会发生较大的突变。而所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法激光诱发等离子体中强磁场过程中,等离子体的电流密度分量变化情况如图3所示。

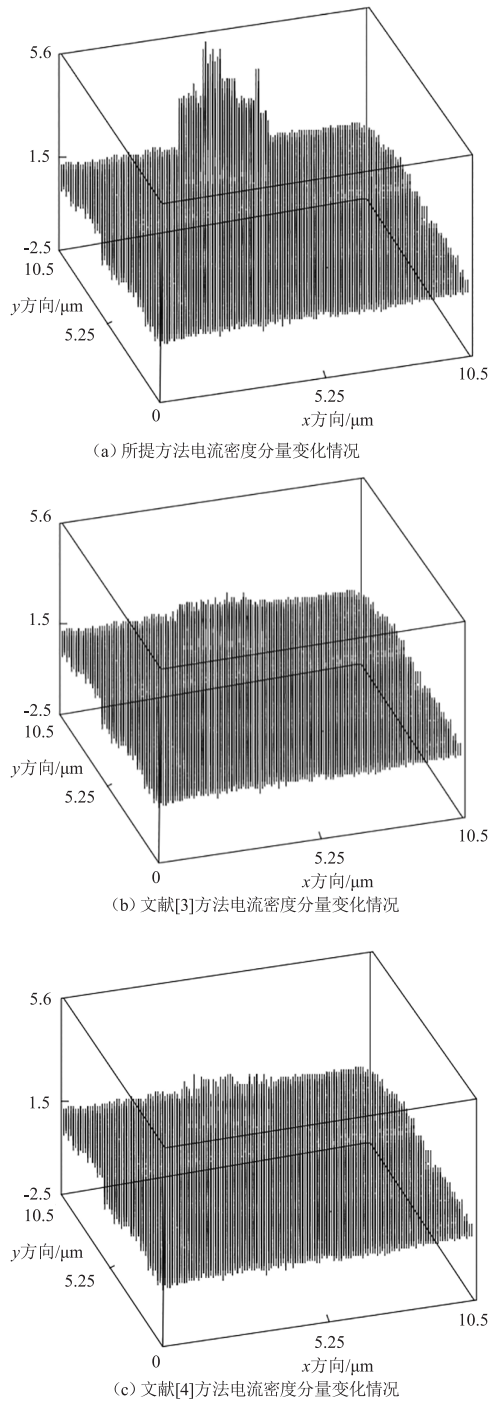


图3 等离子体电流密度分量

Fig.3 Plasma current density component

分析图3可知,利用所提方法所得到的等离子

体的电流密度分量变化情况与实际描述相符,当激光诱发等离子体产生自生强磁场时,磁场的电流密度分量发生了较大的突变。而文献[3]方法和文献[4]方法的等离子体的电流密度分量变化情况均未发生明显的电流密度分量,应用效果不佳。是因为文献[3]方法不能全面反映激光诱发等离子体中强磁场产生机制的所有方面,导致电流密度分量变化情况呈现不佳;文献[4]方法并未考虑等离子体密度变化因素的影响,从而不能呈现出电流密度分量变化情况。由此说明,所提方法具备较为显著的应用效果,可准确的呈现出激光诱发等离子体中强磁场过程中,等离子体的电流密度分量变化情况。

接着,从电子密度分布角度进一步分析上述三种方法的应用效果,分别给出圆柱形铜膜靶表面点C、D自生强磁场位置处的电子密度分布状态,分析电子密度在激光诱发等离子体中强磁场的时空分布机制。一般在激光诱发等离子体强磁场的不同位置,电子密度分布状态也不相同,当激光脉冲射击到靶物表面时,激光与等离子体互相作用并传播,此时自生磁场电子会加速运行,导致激光诱发等离子体自体磁场上出现凹坑,随着时间的增加,凹坑会逐渐加大。由此,三种方法的电子密度分布状态结果如图4~图6所示。

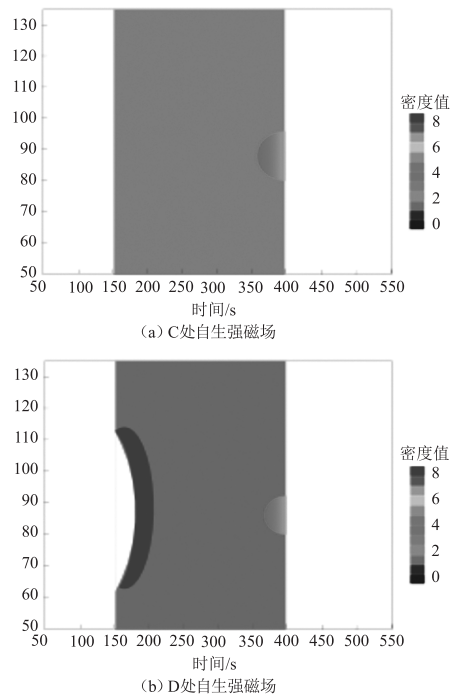


图4 所提方法自生强磁场不同位置电子密度分布状态

Fig.4 The state of electron density distribution at different positions in the autogenous strong magnetic field of the proposed method

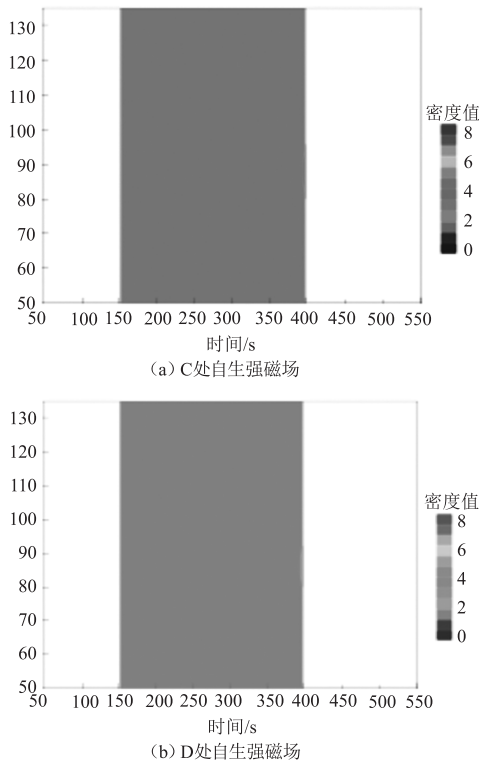


图 5 文献[3]方法自生强磁场不同位置电子密度分布状态

Fig. 5 Distribution of electron density at different positions in a self-generated strong magnetic field using the method described in reference[3]

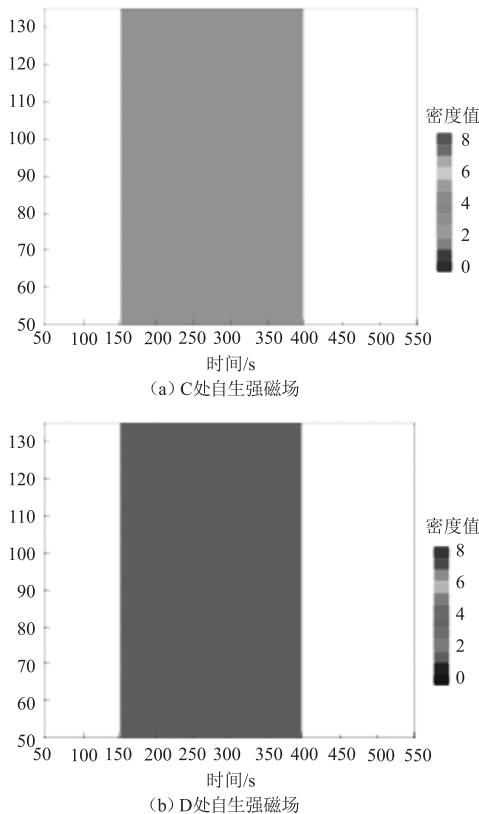


图 6 文献[4]方法自生强磁场不同位置电子密度分布状态

Fig. 6 Distribution of electron density at different positions in a self-generated strong magnetic field using the method described in reference[4]

分析图 4 ~ 图 6 可知,利用所提方法自生强磁场不同位置电子密度分布状态情况与实际描述相符,当激光脉冲射击到靶物表面时,激光诱发等离子体磁场上出现凹坑,随着时间的增加,D 处自生强磁场上的凹坑会逐渐加大。而文献[3]方法的电子密度分布状态也出现了凹坑,但其体现不明显,且随着时间的增加,D 处自生强磁场上的凹坑并未出现增大的情况;文献[4]方法的电子密度分布状态并未出现变化,是因为其未考虑等离子体密度、温度等变化因素的影响,导致不能体现相应的变化结果。由此,综上结果可得出,所提方法应用效果较佳,可准确的呈现出激光诱发等离子体强磁场电子密度变化。

为进一步验证所提方法的应用性能,仍以文献[3]方法和文献[4]方法作为对比方法,对三种方法的应用稳定性进行测试,统计三种方法在不同的电流波动下的磁场强度熵值结果,熵值越低,说明方法越稳定。则三种方法的结果如下表 2 所示。

表 2 三种方法的场强度熵值结果

Tab. 2 Field intensity entropy results of three methods

电流波动/%	所提方法	文献[3]方法	文献[4]方法
1	0.04	0.1	0.15
2	0.09	0.18	0.26
3	0.12	0.26	0.37
4	0.19	0.36	0.50
5	0.28	0.49	0.63

分别表 2 结果可知,随着电流波动的增加,三种方法的磁场强度熵值结果均呈现增加的趋势,但三种方法相比,所提方法的熵值结果增长幅度较小。当电流波动达到 5 % 时,所提方法的磁场强度熵值结果为 0.28,文献[3]方法和文献[4]方法的磁场强度熵值结果分别为 0.49 和 0.63。对比三种方法的山治结果可知,所提方法的熵值结果较低,由此说明所提方法具有较高的稳定性,能够适应电流波动情况下的条件变化,确保结果的准确性和可靠性,具有较强的应用性能。

#### 4 结 论

激光诱发等离子体中的强磁场产生与演化机制研究是一项具有重要物理意义的课题。在激光与物质相互作用的过程中,高能量激光可以激发出大量电子,这些电子在极短时间内聚集形成了

等离子体。而在这个过程中,磁场的作用不可忽视。通过研究,发现强磁场在激光诱发等离子体中起到了关键作用。磁场可以影响电子的运动轨迹,进而影响激光与物质的相互作用方式。此外,磁场还可以影响等离子体的状态,如温度、密度等,这些因素都会对最终的实验结果产生重要影响。为了更好地理解激光诱发等离子体中的强磁场产生机制,采用了数值计算方式得到了磁场的变化规律。经过实验验证,本文研究结果不仅有助于深入理解激光与物质的相互作用机制,也为未来的相关研究提供了重要的参考。

### 参考文献:

- [1] Mou Yanfei, Zhang Qiyuan, Liang Qingqing. Investigation of femtosecond laser-induced air plasma shock waves[J]. *Optical Instruments*, 2023, 45(2): 69–74. (in Chinese)  
牟彦霏, 张岐源, 梁青青. 飞秒激光诱导的空气等离子体冲击波探究[J]. *光学仪器*, 2023, 45(2): 69–74.
- [2] Zhao Yang, Zhang Lei, Cheng Niankai, et al. Study on the spatiotemporal evolution mechanism of binary laser plasma [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(7): 2067–2073. (in Chinese)  
赵洋, 张雷, 程年恺, 等. 二元激光等离子体的时空演化机制研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(7): 2067–2073.
- [3] Wang Guicai, Zhao Huanyu, Qian Jinyu, et al. Laser plasma emitted by a solenoid coil research on characteristics in scattered magnetic fields[J]. *Nuclear Physics Review*, 2021, 38(3): 270–276. (in Chinese)  
王桂才, 赵环昱, 金钱玉, 等. 激光等离子体在螺线管发散磁场中的特性研究[J]. *原子核物理评论*, 2021, 38(3): 270–276.
- [4] Wang Yuanyuan, Wang Xianzhi, Song Jiajun, et al. The back Raman scattering amplification mechanism of super intense laser in uniform plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(5): 227–232. (in Chinese)  
王媛媛, 王羨之, 宋贾俊, 等. 超强激光在均匀等离子体中的背向拉曼散射放大机制[J]. *物理学报*, 2022, 71(5): 227–232.
- [5] Ma Yunyun, Liu Guorong, Wei Xiufang, et al. Study on the self absorption effect of laser induced zinc plasma [J]. *Journal of Northwest Normal University: Natural Science Edition*, 2022, 58(4): 45–4957. (in Chinese)  
马云云, 刘国荣, 魏秀芳, 等. 激光诱导锌等离子体的自吸收效应研究[J]. *西北师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 58(4): 45–4957.
- [6] Wang Tianwu, Zhang Kai, Wei Wenyin, et al. Generation of strong terahertz waves and their applications in nonlinear research [J]. *Chinese Laser* 2023, 50(17): 139–155. (in Chinese)  
王天武, 张凯, 魏文寅, 等. 强大赫兹波的产生及其在非线形研究中的应用[J]. *中国激光*. 2023, 50(17): 139–155.
- [7] Wang Weijiang, Jia Kai, Fang Ruina, et al. A review of research on laser-induced plasma radiation characteristics [J]. *Laser Technology*, 2022, 46(4): 499–510. (in Chinese)  
王卫江, 贾凯, 房瑞娜, 等. 激光诱导等离子体辐射特性的研究综述[J]. *激光技术*, 2022, 46(4): 499–510.
- [8] Lu Yu, Zhang Hao, Zhang Liangqi, et al. Research progress on X/γ radiation based on laser plasma [J]. *Strong Laser and Particle Beam*, 2023, 35(1): 63–78. (in Chinese)  
鲁瑜, 张昊, 张亮琪, 等. 基于激光等离子体的 X/γ 辐射研究进展 [J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35(1): 63–78.
- [9] Cao Xue. Study on dispersion compensation of wavelength division multiplexing system using chirped grating [J]. *Optoelectronics and Laser*, 2021, 32(2): 217–222. (in Chinese)  
曹雪. 以啁啾光栅对波分复用系统色散补偿的研究 [J]. *光电子·激光*, 2021, 32(2): 217–222.
- [10] Jiang Hai, Wang Wentao, Feng Ke, et al. New progress in free electron laser research based on laser plasma acceleration [J]. *Strong Laser and Particle Beam*, 2022, 34(10): 82–88. (in Chinese)  
姜海, 王文涛, 冯珂, 等. 基于激光等离子体加速的自由电子激光研究新进展 [J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(10): 82–88.