

纳秒激光烧蚀固体靶产生的等离子体在外加横向磁场中膨胀时的温度和密度参数演化

梁亦寒 胡广月 袁鹏 王雨林 赵斌 宋法伦 陆全明 郑坚

Temporal evolutions of the plasma density and temperature of laser-produced plasma expansion in an external transverse magnetic field

Liang Yi-Han Hu Guang-Yue Yuan Peng Wang Yu-Lin Zhao Bin Song Fa-Lun Lu Quan-Ming Zheng Jian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 125204 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.125204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.125204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电磁波在非磁化等离子体中衰减效应的实验研究

Experimental investigation on attenuation effects of electromagnetic waves in an unmagnetized plasma

物理学报.2015, 64(5): 055201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.055201>

Z箍缩Al等离子体X辐射谱线的分离及电子温度的提取

Separating the Z-pinch plasma X-ray radiation and attaining the electron temperature

物理学报.2014, 63(9): 095201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.095201>

激光烧蚀高纯Zn形成的微米金属球体对后续脉冲激光的耦合增强效应

Effect of laser-induced zinc micro-spheres on enhanced absorption of subsequent pulse laser

物理学报.2013, 62(16): 165202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.165202>

射频电感耦合夹层等离子体中的模式转换

Mode transition of inductively coupled plasma in interlayer chamber

物理学报.2012, 61(19): 195206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.195206>

辐射输运实验中的Al等离子体发射光谱研究

Characteristics of emission spectroscopy of radiatively heated Al plasma

物理学报.2011, 60(4): 045210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.045210>

# 纳秒激光烧蚀固体靶产生的等离子体在外加横向磁场中膨胀时的温度和密度参数演化\*

梁亦寒<sup>1)</sup> 胡广月<sup>1)†</sup> 袁鹏<sup>1)</sup> 王雨林<sup>1)</sup> 赵斌<sup>1)</sup> 宋法伦<sup>3)</sup>  
陆全明<sup>2)</sup> 郑坚<sup>1)</sup>

1) (中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

2) (中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026)

3) (中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621000)

(2014年12月1日收到; 2015年1月5日收到修改稿)

利用等离子体光学波段自发光成像、光学光谱和光学探针干涉等诊断手段, 观察了纳秒脉冲激光烧蚀固体靶产生的等离子体在外加横向磁场中的膨胀过程. 根据实验参数特征建立了简化的磁流体物理模型, 结合自发光强度的时间演化, 理论计算了等离子体温度和密度参数的时间演化, 理论计算结果与实验测量结果基本符合, 证实了碰撞磁扩散过程在等离子体演化中发挥了关键作用.

**关键词:** 磁化激光等离子体, 等离子体自发光成像, 光谱诊断, 光学干涉

**PACS:** 52.72.+v

**DOI:** 10.7498/aps.64.125204

## 1 引言

最近几年, 激光产生的等离子体与强磁场的耦合得到了广泛关注. 磁场在惯性约束聚变、实验室天体物理和激光粒子加速等研究领域扮演着重要的角色. 在磁化惯性约束聚变方面, 外加磁场可以抑制冕区等离子体激光通道的横向电子热传导, 从而增加激光通道的电子温度<sup>[1]</sup>; 在内爆靶丸加入外磁场, 可以在内爆压缩过程中通过磁冻结效应在靶丸内部形成强磁场, 抑制中心热斑区的电子热传导能量损失, 从而增加离子温度和聚变中子产额<sup>[2]</sup>. 在激光等离子体电子加速方面, 磁场可以控制电子注入和等离子体波导结构<sup>[3,4]</sup>, 也可以用来准直激光加速的质子束<sup>[5]</sup>. 磁化的激光等离子体可用于研究众多的天体物理过程, 包括磁化天体射流<sup>[6]</sup>和磁场重联等<sup>[7,8]</sup>.

关于激光作用于固体靶产生的等离子体在外加磁场中演化方面的研究, 过去主要集中在利用永

磁体产生的  $<1$  T 强度的较弱磁场参数区域<sup>[9]</sup>, 更高磁场强度的研究报导较少<sup>[10]</sup>. 为了进行强磁场下激光等离子体演化过程的研究, 我们建造了一套 7 T 峰值强度的脉冲强磁场产生装置<sup>[11]</sup>, 并与纳秒和飞秒激光束耦合获得了一些新奇的实验结果, 发现纳秒激光烧蚀固体靶产生的等离子体在外加横向磁场中膨胀时会出现分叉和汇聚等现象, 本文主要关注等离子体在外加横向磁场中膨胀时的温度和密度参数的演化过程. 根据实验参数特征, 建立了一个简化的磁流体物理模型, 利用实验测量的自发光强度随时间演化的数据, 推断了等离子体温度和密度参数随时间的演化. 理论结果与实验测量数据基本符合, 说明在本文的实验参数条件下, 碰撞在等离子体演化过程中发挥了关键作用.

## 2 实验安排

图 1 为实验安排示意图. 脉冲功率系统对直径

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11105147, 11375197, 11475171, 11275202) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gyhu@ustc.edu.cn

为6 mm、线圈间距为3 mm的亥姆赫兹线圈放电,产生峰值强度为7.5 T、上升沿为230 ns的一维均匀脉冲磁场<sup>[11]</sup>. 40 μm厚的铝薄膜靶平行于磁力线方向放置在亥姆赫兹线圈中间. 纳秒脉冲激光束(波长为532 nm,脉宽为4.5 ns,偏振方向平行于z轴,能量为0.3 J,焦斑为50 μm,激光强度为 $3.4 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>)沿着-y方向作用于薄膜靶,产生高温等离子体;等离子体沿着y方向横越磁力线膨胀.产生的等离子体温度低于100 eV,等离子体膨胀的特征速度在 $10^5$  m/s量级.

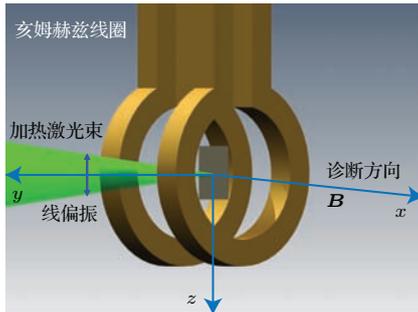


图1 实验安排示意图

Fig. 1. Experimental setup.

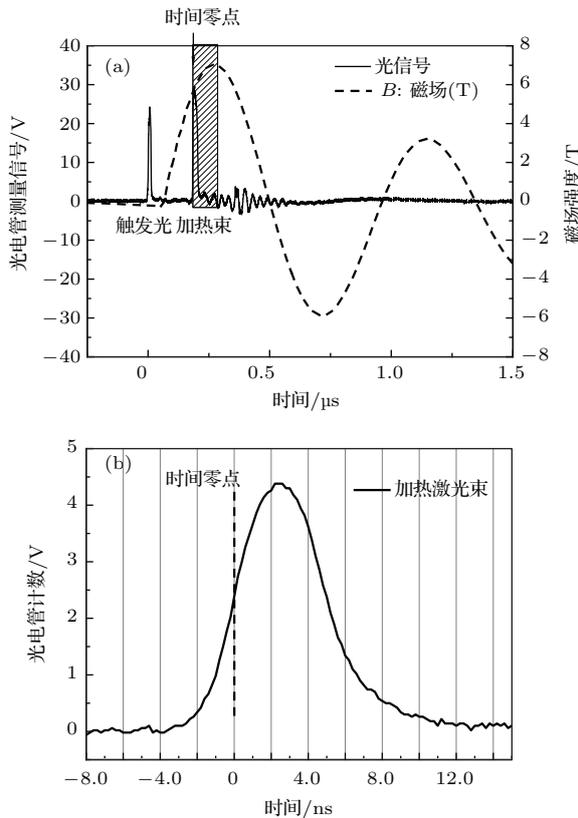


图2 (a) 加热激光束与磁场波形间的时序关系,其中阴影区为本实验关注的时间范围;(b) 时间零点与加热激光束的时序关系

Fig. 2. (a) The time order of the heating laser, trigger laser, and the magnetic field pulse; (b) the position of time zero.

图2(a)给出了加热激光束、磁场产生装置的触发激光和磁场脉冲的时序,加热激光束相对于磁场脉冲的时间抖动在10 ns之内.本文中,时间零点定义为加热激光束上升沿的半高位置,见图2(b).我们关注激光作用之后200 ns之内的等离子体演化特征.从图2(a)可以发现,在实验关注的时间范围内,磁场强度保持在6—7 T,变化较小.

在x轴方向,利用消色差透镜将等离子体在532 nm波长附近的光学波段的自发光图像成像于增强型电荷耦合器件(ICCD)上,ICCD门宽设为4 ns,成像系统放大3.7倍,空间分辨约为10 μm.在x轴方向,利用光谱仪配合ICCD记录等离子体不同时刻的光学波段的自发光光谱,光谱仪狭缝所截取的空间位置位于靶前180 μm处(图3).实验中用一台标准光源对整套光谱诊断系统的相对谱响应进行标定;用脉宽为100 fs、波长为800 nm的短脉冲激光束沿着x轴方向对等离子体进行干涉成像,以测量不同时刻的等离子体面密度分布.

### 3 实验结果

图3给出了ICCD测量的不同时刻等离子体的自发光图像.从图3可以发现:激光脉冲结束(10 ns)时,等离子体发光区域呈现半球形分布,这种特征与无磁场情况一致;此后,等离子体发光区域不再像无磁场时那样保持半球形膨胀直至密度降低到看不见自发光,而是出现上下分离的两臂结构;在20 ns之内出现了运动速度较高、发光较弱的两臂结构,两臂在中心汇聚形成射流结构,此射流结构沿着靶法线方向运动,一直维持到逸出探测视场,这种两臂结构和射流结构与前人观察到的现象一致<sup>[10]</sup>,被认为是抗磁过程和电漂移过程共同作用的结果;在20 ns之后,从靶面位置又产生了第二个上下分离的两臂结构,这个两臂结构运动速度较慢,但发光强度更强,其基本沿着第一个两臂结构通道运动,随后也在中间汇聚形成射流结构.初步判断第二个两臂结构形成的原因是高温的激光等离子体膨胀后,通过电子热传导烧蚀靶面产生更低温的等离子体.该判断尚需进一步的实验验证.

本文主要关注第二个两臂结构的演化过程.为了细致分析其中的物理机理,我们用飞秒激光干涉

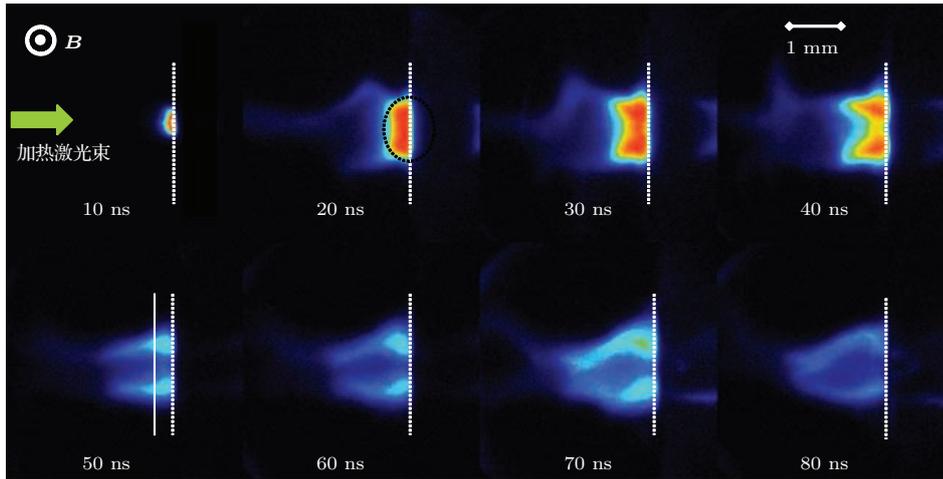


图3 (网刊彩色) 外加磁场下等离子体的自发光演化. 白色虚线为靶的位置, 20 ns 图像中的黑色虚线描述的是等离子体的半球近似, 50 ns 图像中竖线位置为光学谱仪对应的位置

Fig. 3. (color online) The temporal evolution of the plasma self-luminescence images in an external magnetic field. The white dot lines show the position of the target. The black dot line in 20 ns image indicates the hemisphere approximation for the plasma region. The white line in 50 ns image shows the position of the slit of the spectrometer.

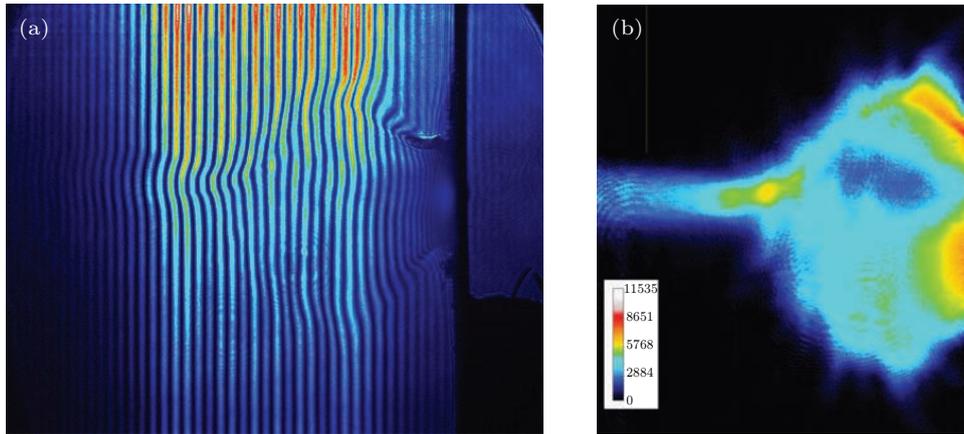


图4 (网刊彩色) 干涉诊断获得的 (a) 20 ns 条纹图以及对应的 (b) 相位图. 色标为  $\Phi_p = \text{相位} \times 1000$

Fig. 4. (color online) The result of interferometry diagnostic at 20 ns: (a) fringe image; (b) phase image. The color bar  $\Phi_p = \text{phase} \times 1000$ .

手段和等离子体光谱诊断对第二个两臂结构的密度和温度参数进行了测量. 图4为飞秒激光测量的20 ns时刻等离子体的干涉诊断条纹图, 经过数据处理, 可以从条纹图得到探针束穿越等离子体后相位改变量的空间分布.

因为此时的等离子体不是轴对称分布, 需要结合其他诊断手段推测等离子体尺度, 进而给出等离子体密度. 从另一个方向( $y$ )的自发光图像发现, 此时干涉图像的探针激光穿越的等离子体尺度在1 mm附近. 干涉图像中相位变化与等离子体电子密度和弦积分长度有如下关系:

$$n_e = \frac{\Phi_p}{2.26 \times 10^{-15} l} [\text{cm}^{-3}],$$

其中,  $l$ 为弦积分长度, 单位为 mm;  $\Phi_p$ 为相位图中的计数. 由此推断出20 ns时刻两臂的电子密度约为  $2.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . 从图4(b)的相位图也可以看出, 在两臂上等离子体密度呈现中间高边缘低的分布, 与图3的自发光分布特性一致. 即在图3中所观察的自发光强的区域中等离子体有更高的密度.

为了进一步得到等离子体温度信息, 我们测量了30和50 ns时刻靶前180  $\mu\text{m}$ (图3)的等离子体自发光光谱, 结果如图5所示.

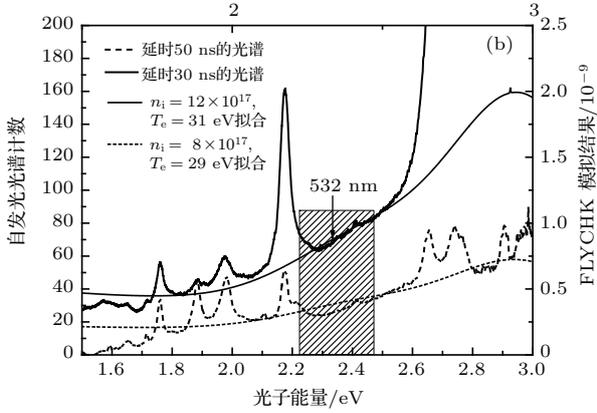
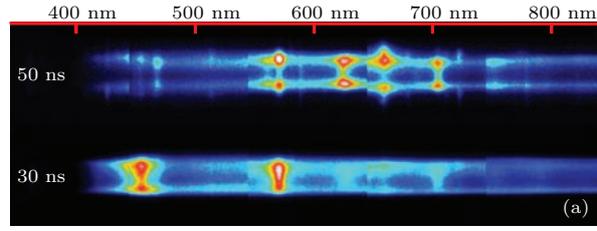


图5 (网刊彩色) (a) 30和50 ns时刻测量的靶前180 μm位置等离子体的自发发光光谱; (b) 利用FLYCHK程序对连续谱区域的拟合结果, 横轴为光谱波长400—800 nm范围所对应的光子能量, 单位为eV, 阴影区对应光学成像诊断的波长532 nm ± 30 nm

Fig. 5. (color online) (a) The spectra of the plasma self-luminescence at 180 μm before the target (30 ns and 50 ns); (b) the fitting results of the continuous spectrum by using FLYCHK code, the horizontal axis displays the spectral range from 400 nm to 800 nm, the shaded area is the wavelength range of the self-luminescence images (532 nm ± 30 nm).

从图5(a)可以看出, 等离子体光谱在两臂中心区域上呈现光滑连续谱结构, 而在两臂边缘则出现线谱结构. 初步分析显示, 等离子体温度较高(>20 eV)时光谱会呈现连续结构, 温度较低(<10 eV)时会呈现线谱结构. 因此在两臂中心区域等离子体温度较高, 两臂边缘区域等离子体温度较低, 即图3所观察到的自发发光强的区域中等离子体温度更高. 为了得到等离子体的温度参数, 我们使用FLYCHK程序<sup>[12]</sup>对两臂产生的连续谱进行了拟合, 如图5(b)所示. 拟合结果显示, 在30 ns时刻, 等离子体电子温度约为31 eV, 电子密度约为 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 电子密度相对于干涉测量的20 ns时刻有所降低. 此后电子温度和密度都逐渐降低, 在50 ns时刻, 等离子体电子温度降为29 eV, 电子密度降为 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . FLYCHK程序拟合参数显示, 1 mm尺度状态下的等离子体, 对我们所测量的光谱范围的自发光是光性薄的, 可以忽略等离子体自吸收的影响. 图3中的自发发光图像选取

的波长是532 nm, 主要是>20 eV的高温等离子体辐射的连续谱的贡献, 因此自发发光图像主要反映了>20 eV的高温等离子体区域的空间分布特征.

#### 4 简化的磁流体物理模型

本文主要关注第二个两臂结构的等离子体的整体温度和密度参数演化, 因此, 暂时忽略等离子体的细致结构, 将等离子体近似为均匀的等离子体半球, 如图3虚线所示. 近似认为均匀的等离子体半球在磁场中膨胀时, 等离子体热压力和磁压力总和基本保持平衡, 演化过程中等离子体的体积由初始外加磁场强度和等离子体温度密度参数决定. 这样可以将等离子体体积、外加磁场强度、等离子体温度和密度参数通过磁流体方程关联起来. 初始外加磁场强度已知, 等离子体体积和自发发光总强度计数随时间的演化可以从图3的自发发光图像得到. 因此, 通过有目的地改变磁流体方程中的某些物理效应, 观察理论预言的温度和密度参数演化与实验测量结果的一致性, 从而确定在等离子体演化过程中哪些物理效应起关键的作用.

采用磁流体动量方程和磁场演化方程来描述等离子体和磁场演化过程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla \left( P + \frac{B^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{4\pi} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \frac{c^2}{4\pi\sigma} \nabla^2 \mathbf{B}. \quad (2)$$

由于采用半球形膨胀近似, 忽略了等离子体的细致结构, 因此方程(1)中忽略磁张力项, 仅保留磁压力项, 即将磁场当作标量来处理. 同时也由于半球形膨胀近似, 方程中的梯度项可以用梯度标长 $L$ 来近似.  $L$ 等于等离子体半球的半径,  $L$ 的增大速度等于等离子体流速 $u_r$ , 加速度等于流速的时间偏导. 因此方程(1), (2)可以写为

$$m_i n \frac{\Delta u_r}{\Delta t} = -\frac{1}{L} \left( m_i n u_r^2 + nT + \frac{B^2}{8\pi} \right), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta B}{\Delta t} &= \frac{1}{2L} (uB) + \frac{c^2}{4\pi\sigma} \frac{B_0 - B}{(2L)^2} \\ &= \frac{B}{\tau_c} + \frac{B_0 - B}{\tau_d}. \end{aligned} \quad (4)$$

这里采用了理想气体状态方程,  $n$  为等离子体密度,  $T$  为等离子体温度,  $m_i$  为铝离子质量,  $B$  为等离子体内部的磁场,  $B_0$  为边界外的磁场, 时间偏导项对应前后两个时刻的差,  $\tau_c$  和  $\tau_d$  分别是磁冻结特征时间和磁扩散特征时间. 电导率选取经典公式:

$$\sigma = \frac{T^{3/2}}{\pi e^2 m_e^{1/2} \ln \Lambda},$$

$$\ln \Lambda = 23 - \ln(Zn^{1/2}T^{-3/2}). \quad (5)$$

在方程 (3), (4) 中包含等离子体密度、温度和磁场强度 3 个未知量, 还需要一个方程才能给出确定的解. 我们用图 3 的等离子体自发光强度的总计数随时间的演化作为第三个方程. 由于图 3 测量的等离子体自发光主要由等离子体韧致辐射连续谱贡献, 等离子体韧致辐射功率谱为

$$\frac{dP_\omega}{d\omega} = \frac{32e^6 Z^2 n_e n_i}{3(2\pi)^{1/2} c^3 m_e^2 v_e} \times \ln \left[ \frac{m_e v_e^3}{\omega Z e^2} \left( \frac{2}{\gamma} \right)^{5/2} \right]. \quad (6)$$

忽略对数函数的慢变项, 自发光强度满足如下公式:

$$I \propto n^2 T^{-1/2} V, \quad (7)$$

其中,  $V$  是半球等离子体的体积, 与  $L^3$  呈正比例关系.

图 6 给出了从图 3 得到的等离子体自发光总强度计数随时间的变化. 为了给出方程 (7) 的比例系数, 我们采用 30 ns 时刻的等离子体温度和密度参数作为初始值, 利用方程 (3), (4), (7) 计算得到之后的等离子体温度和密度演化. 由于图 3 中 60 ns 以后的图像严重偏离半球近似假定, 因此只计算到 60 ns 截止. 图 7 给出了方程 (4) 中忽略磁冻结项和包含磁冻结项的结果, 发现磁冻结项对理论推测的密度和温度参数演化没有明显影响, 理论计算的参数演化与实验中干涉和光谱测量的密度和温度参数大体一致. 理论结果与实验结果的差异来自于我们忽略了等离子体的细致结构, 把等离子体当成均匀半球来处理. 但实际上随着时间的演化, 高温等离子体区相对于整个等离子体区域的份额变小, 导致理论计算的结果相对于实验结果有整体偏差.

图 7 的结果显示, 碰撞导致的磁扩散过程在等离子体演化过程中起主导作用, 磁冻结效应可以忽略. 实际上, 从实验测量结果可以选取各个特征参数如下:  $L = 600 \mu\text{m}$ ,  $u = 20 \mu\text{m/ns}$ ,  $T = 31 \text{ eV}$ ,  $n_e = 1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 库仑对数约为 7. 由这些参

数计算发现, 磁冻结的特征时间为 60 ns, 磁扩散的特征时间为 10 ns, 磁雷诺数为 0.17. 因此, 在我们关注的时间范围内, 磁扩散速度很快, 磁冻结效应可以忽略.

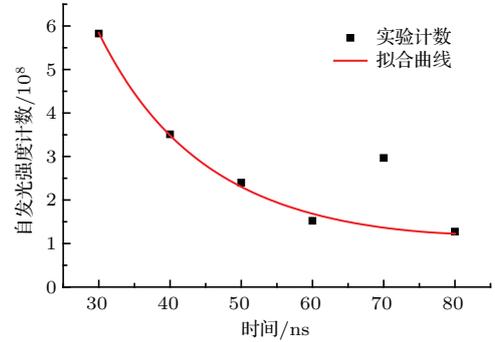


图 6 自发光计数随时间的演化

Fig. 6. The temporal profile of the total count of the self-luminescence images.

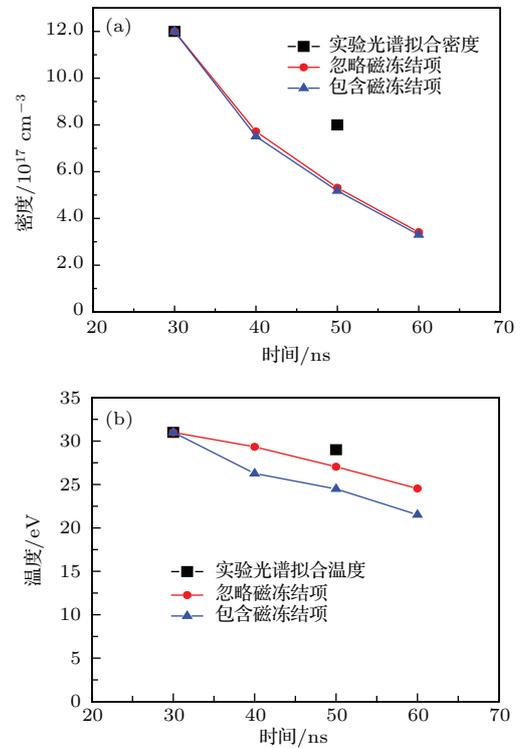


图 7 (网刊彩色) 理论模型推算的 (a) 密度和 (b) 温度演化与实验结果的对比. 分别考虑了包含和忽略磁冻结项的情况

Fig. 7. (color online) The calculated temporal evolution and the experimental results of (a) the plasma density and (b) temperature with or without the effect of the magnetic advection.

## 5 结 论

利用等离子体光学自发光成像、等离子体光谱和探针光干涉等诊断手段, 实验测量了纳秒激光烧

蚀固体靶产生的等离子体在外加横向磁场中的演化过程,发现等离子体在磁场中出现两臂结构和汇聚现象.为了研究等离子体参数的整体变化过程,我们建立了一个简化的磁流体物理模型,较好地预测了等离子体温度和密度演化,发现碰撞磁扩散过程在等离子体参数演化中起主导作用.

### 参考文献

- [1] Froula D H, Ross J S, Pollock B B, Davis P, James A N, Divol L, Edwards M J, Offenberger A A, Price D, Town R P J, Tynan G R, Glenzer S H 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 135001
- [2] Chang P Y, Fiksel G, Hohenberger M, Knauer J P, Betti R, Marshall F J, Meyerhofer D D, Seguin F H, Petrasso R D 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 035006
- [3] Vieira J, Martins S F, Pathak V B, Fonseca R A, Mori W B, Silva L O 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 225001
- [4] Holkundkar A, Brodin G, Marklund M 2011 *Phys. Rev. E* **84** 036409
- [5] Harres K, Alber I, Tauschwitz A, Bagnoud V, Daido H, Gunther M, Nurnberg F, Otten A, Schollmeier M, Schuttrumpf J, Tampo M, Roth M 2010 *Phys. Plasmas* **17** 023107
- [6] Ciardi A, Vinci T, Fuchs J, Albertazzi B, Riconda C, Pepin H, Portugall O 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 025002
- [7] Dong Q L, Wang S J, Lu Q M, Huang C, Yuan D W, Liu X, Lin X X, Li Y T, Wei H G, Zhong J Y, Shi J R, Jiang S E, Ding Y K, Jiang B B, Du K, He X T, Yu M Y, Liu C S, Wang S, Tang Y J, Zhu J Q, Zhao G, Sheng Z M, Zhang J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 215001
- [8] Zhang Z C, Lu Q M, Dong Q L, Lu S, Huang C, Wu M Y, Sheng Z M, Wang S, Zhang J 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 045201
- [9] Patel N D, Pandey P K, Thareja R K 2013 *Phys. Plasmas* **20** 103503
- [10] Plechaty C, Presura R, Esaulov A A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 185002
- [11] Hu G Y, Liang Y H, Song F L, Yuan P, Wang Y L, Zhao B, Zheng J 2015 *Plasma Sci. Technol.* **17** 134
- [12] Chuang H K, Chen M H, Morgan W L, Ralchenko Y, Lee R W 2005 *High Energy Density Phys.* **1** 3

# Temporal evolutions of the plasma density and temperature of laser-produced plasma expansion in an external transverse magnetic field\*

Liang Yi-Han<sup>1)</sup> Hu Guang-Yue<sup>1)†</sup> Yuan Peng<sup>1)</sup> Wang Yu-Lin<sup>1)</sup> Zhao Bin<sup>1)</sup>  
Song Fa-Lun<sup>3)</sup> Lu Quan-Ming<sup>2)</sup> Zheng Jian<sup>1)</sup>

1) (*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

3) (*Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China*)

( Received 1 December 2014; revised manuscript received 5 January 2015 )

## Abstract

The nanosecond laser produced plasma expansion in an external transverse magnetic field is explored by using optical imaging of plasma self-luminescence, optical spectrum and optical interferometry techniques. The plasma displays bifurcation and focusing phenomena in a transverse magnetic field, which is different from the scenarios without external magnetic field significantly. We set up a simplified magnetohydrodynamics model according to the feature of experimental parameters. The theoretical results of the temporal evolutions of the plasma density and the temperature are in good agreement with the experimental results, which confirms the important role of the magnetic diffusion in the plasma evolution.

**Keywords:** magnetic laser plasma, imaging of plasma self-luminescence, optical spectral diagnosis, optical interferometry

**PACS:** 52.72.+v

**DOI:** [10.7498/aps.64.125204](https://doi.org/10.7498/aps.64.125204)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11105147, 11375197, 11475171, 11275202).

† Corresponding author. E-mail: [gyhu@ustc.edu.cn](mailto:gyhu@ustc.edu.cn)