

## 激光暗荧光光谱电场测量微扰计算与实验

王桢 吕日毅 李超 陈俊锋 张曼

### Calculation and experiment of tiny perturbations in electric field measurement for the laser-induced fluorescence-dip spectroscopy method

WANG Zhen, LV Ri-yi, LI Chao, CHEN Jun-feng, ZHANG Man

引用本文:

王桢, 吕日毅, 李超, 陈俊锋, 张曼. 激光暗荧光光谱电场测量微扰计算与实验[J]. *中国光学*, 2024, 17(6): 1351-1358. doi: 10.37188/CO.2024-0037

WANG Zhen, LV Ri-yi, LI Chao, CHEN Jun-feng, ZHANG Man. Calculation and experiment of tiny perturbations in electric field measurement for the laser-induced fluorescence-dip spectroscopy method[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1351-1358. doi: 10.37188/CO.2024-0037

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0037>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 激光诱导击穿光谱法测定稀土矿区土壤中钆含量

Measurement of Sm in rare earth mineral soil using laser-induced breakdown spectroscopy

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(4): 712 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0042>

#### 便携式激光诱导击穿光谱最新研究进展

Research progress on portable laser-induced breakdown spectroscopy

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(3): 470 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0093>

#### 光致热弹光谱气体检测技术研究进展

Research progress of gas detection based on laser-induced thermoelastic spectroscopy

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(2): 229 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0137>

#### 样品温度和空间约束两种方法相结合对激光诱导击穿光谱的影响

Effects of the combination of sample temperature and spatial confinement on laser-induced breakdown spectroscopy

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(2): 336 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0118>

#### 飞秒激光诱导击穿光谱技术对石墨中钍的定量分析

Quantitative analysis of thorium in graphite using femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(1): 103 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0082>

#### 基于层析成像的激光强度分布测量方法

Laser intensity distribution measurement method based on tomographic imaging

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(4): 743 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0016>

文章编号 2097-1842(2024)06-1351-08

## 激光暗荧光光谱电场测量微扰计算与实验

王 桢\*, 吕日毅, 李 超, 陈俊锋, 张 曼  
(92728 部队, 上海 200436)

**摘要:** 为了实现强流脉冲电子束对材料表面改性的工业化应用, 需要对电子束的作用过程进行实时微扰监测。电场强度是反映电子束特性的关键参数之一, 基于 Stark 效应的激光暗荧光光谱可实现对环境电场的微扰测量。因此, 开展激光功率密度对环境电场的影响研究, 对此类电场测量方法的参数设置和结果判断具有重要的理论和应用价值。通过理论分析和计算得出电场测量微扰状态下的激光功率密度与试验环境的关系模型。基于上述关系模型, 搭建测试平台, 验证激光功率密度对电场测量微扰的情况。实验结果表明: 在示踪气体氙气压强为  $1.0 \times 10^{-4}$  mbar、电场强度不大于 2 kV/cm 的条件下, 对电场测量微扰的激光功率密度值为  $5 \text{ MW/cm}^2$ , 与理论计算值基本一致。研究结果填补了激光暗荧光光谱诊断方法中激光功率密度对电场影响定量分析的空白, 可应用于同类电场测量方法中, 为激光功率密度与实验参数的设置提供依据和参照, 有效支撑电场测量实验的开展, 有效提升电场测量的准确性。

**关键词:** 激光暗荧光光谱; 微扰测量; 激光功率密度; 光电离效应; 场电离效应

中图分类号: O536 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0037 CSTR: 32171.14.CO.2024-0037

## Calculation and experiment of tiny perturbations in electric field measurement for the laser-induced fluorescence-dip spectroscopy method

WANG Zhen\*, LV Ri-yi, LI Chao, CHEN Jun-feng, ZHANG Man  
(The 92728th Unit of PLA, Shanghai 200436, China)  
\* Corresponding author, E-mail: 18774840943@163.com

**Abstract:** In order to realize the industrial application of high-current pulsed electron beam on material surface modification, it is necessary to monitor tiny perturbation in real-time. The electric field strength is a critical parameter understanding the characteristics of electron beams. The laser-induced fluorescence-dip spectroscopy method based on the Stark effect can realize the tiny perturbation measurement of electric fields. Therefore, Studying laser power density influence on the electric field has significant theoretical and application value for the parameter setting and result interpretation of similar electric field measurement methods. The theoretical analysis and calculation are used to obtain the relationship model between excitation laser power density and the test environment parameters in the tiny perturbation state of electric field measurement. Then, based on the above relationship model and theoretical calculation, the influence of excit-

收稿日期: 2024-02-27; 修订日期: 2024-03-08

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2022YFC2808101)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC2808101)

ation laser power density on electric field measurement is verified experimentally. The experimental results show that under the conditions that the tracer gas xenon pressure is  $1.0 \times 10^{-4}$  mbar and the electric field strength is 2 kV/cm or below, the excitation laser power density of tiny perturbations on the electric field measurement is  $5 \text{ MW/cm}^2$ , which is consistent with the theoretical calculation value. The research results provide a quantitative analysis method for studying the influence of laser power density on the electric field in the laser-induced fluorescence-dip spectroscopy. They can be applied to similar electric field measurement methods, open the way for the setting of laser power density and experimental parameters, support the development of electric field measurement experiments, and effectively improve the accuracy of electric field measurement.

**Key words:** laser-induced fluorescence-dip spectroscopy; tiny perturbation measurement; laser power density; photon ionization effect; field ionization effect

## 1 引言

近年来,随着航空工业的高速发展,航空器的工作环境和使用要求越来越严苛,对材料高速、高温下的可靠性提出了更高的要求<sup>[1-5]</sup>。强流脉冲电子束通过电子束对材料表面进行改性,可有效提升材料的抗高温氧化、抗腐蚀等性能,是一种新型表面改性技术<sup>[6-8]</sup>。然而,脉冲电子束发生器内部等离子体的形成、扩散和作用机理尚不清晰,且脉冲电子束重复性较差,限制了其工业化应用。由于电场强度直接反映了电子束中粒子的扩散及相互作用过程,许多学者对电场强度测量手段开展了一系列研究,获取了电子束的相关特性<sup>[9-13]</sup>。1998年,Czarnetzki U等人首次提出了以氢气作为示踪气体的激光暗荧光光学测量方法。这是一种非接触式电场强度测量手段,大幅提升了电场强度测量的灵敏度<sup>[14]</sup>。之后,学者们以氙气<sup>[15]</sup>、氦气<sup>[16]</sup>和氩气<sup>[17]</sup>为示踪气体,开展了激光暗荧光测量电场强度测量研究,将其测量灵敏度提升至 V/cm 量级。然而,上述方法需要对耦合光波长进行扫频,至少测量数十次,才能获得外部电场值。在实际应用中,电子束的重复性较差,多次测量会造成累积误差,导致测量结果失真。2022年,An W等人提出了一种新型激光暗荧光的光学测量方法,可在一次测量中获得测试场的电场强度分布,为进一步揭示电子束的作用机理提供了可能。与传统激光暗荧光测量手段不同,该方法的耦合光是宽线谱且其频率随空间分

布呈线性变化,因此,可在单次测量中,通过观测暗荧光信号位置,直接得到能级分裂幅度,从而推算出外部电场强度,大幅提升了电场测量效率和准确度<sup>[18]</sup>。

新型激光暗荧光光学诊断方法因激光与原子作用时间短、作用区域局部化、激光功率密度低等原因,通常对环境电场的扰动较小。然而,在实践中,有时需要增强激光强度以改善信号质量,若激发光和耦合光的功率密度过高将导致示踪气体电离,电离产生的带电粒子可以显著地扭曲测量点的局部电场,从而导致测得的电场强度失真,影响测量结果的准确性。此外,激光暗荧光的质量也取决于激光的参数设置,直接影响测量结果。为提升激光暗荧光光学诊断电场测量结果的准确性,克服激光对电场环境的干扰及暗荧光信噪比低等问题,本文开展了激光功率密度对电场测量结果影响的理论分析和计算。通过建立激光功率密度与实验参数的关系模型,得出对电场微扰的激光功率密度阈值,并基于理论分析的数值,开展了相关实验验证。

## 2 激光对电场测量微扰的理论分析

图 1(彩图见期刊电子版)是新型激光暗荧光光学诊断的基本原理图。首先,通过双光场将示踪气体氙气激发至里德堡能级。第一束激光是激发光,将氙气从基态激发至亚稳态,电子在亚稳态并不稳定会向下衰减至低能级,产生 828.2 nm 荧光。第二束激光是耦合光,将亚稳态的电子进

一步激发至里德堡能级, 因为这部分转移至里德堡能级的电子不再产生 828.2 nm 的荧光, 从而导致荧光强度变弱, 使荧光信号出现一条暗线。通过观察荧光暗线位置 (图中红线所示), 可以推算出外部的电场强度分布<sup>[18]</sup>。

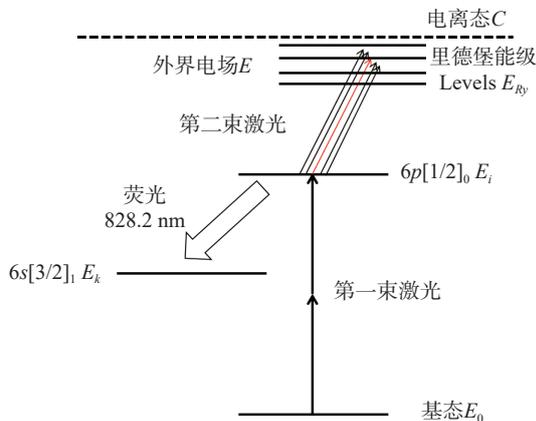


图 1 新型激光暗荧光光学诊断基本原理图

Fig. 1 The basic principle of the modified laser-induced fluorescence-dip spectroscopy method

激光对环境电场的扰动体现在电子电离机制上, 当前主要有以下两种电离机制: (1) 因光电离效应导致的电子从亚稳态过渡到电离态; (2) 因场电离机制促发的里德堡能级的电离。本文以氙气为例, 定量分析了两种电离机制下, 激光功率密度与电离速率的关系, 分析得到对环境电场微扰的激光功率密度阈值与实验环境参数的关系模型。

### 2.1 光电离效应

光电离效应是在激光作用下, 亚稳态电子产生电离的物理现象。如图 2 所示, 在激光作用下, 氙原子会产生三阶电离通道。

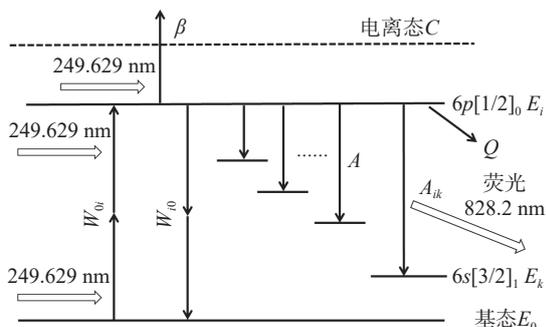


图 2 三阶电离能级分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-level distribution for xenon with two-photon excitation and ionization effect

由图 2 可知, 激光通过双光子吸收将氙原子从基态  $E_0$  激发至亚稳态  $E_i(6p[1/2]_0)$ 。亚稳态  $E_i$  的电子并不稳定, 会因自发辐射、诱导辐射和光淬灭衰减至低能级。相应地, 在亚稳态  $E_i$  的部分电子在激光作用下会被激发至电离态  $C$ <sup>[19]</sup>。

三阶电离的速率方程如下:

$$\frac{dN_g(t)}{dt} = -W_{0i}N_g(t) + W_{i0}N_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = W_{0i}N_g(t) - A_{\text{tot}}N_i(t) \quad (2)$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \beta N_i(t) \quad (3)$$

其中  $N_g(t)$ ,  $N_i(t)$  和  $C(t)$  分别是基态, 亚稳态和电离态的原子密度<sup>[20]</sup>。  $W_{0i}$  和  $W_{i0}$  分别是基态至亚稳态  $E_0 \rightarrow E_i$  的双光子吸收速率和从亚稳态至基态  $E_i \rightarrow E_0$  的受激辐射速率;  $A_{\text{tot}}$  是粒子辐射速率的总和 ( $A_{\text{tot}} = W_{i0} + A_i + Q + \beta$ ); 其中  $A_i$  是亚稳态  $E_i$  的自发辐射速率,  $\beta$  是光电离效应常数,  $Q$  是光淬灭速率。由上述方程可得, 在激光作用下, 电离的原子密度随着时间变化的公式如下:

$$C(t) = \frac{\beta N_0}{Q + \beta + A_i} \left[ 1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_2 t} \right] \quad (4)$$

$$0 \leq t \leq \tau_L$$

其中  $N_0$  是氙原子初始密度,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  可由以下方程表示:

$$\lambda_1 = -\frac{A_{\text{tot}} + W_{i0}}{2} - \frac{[(A_{\text{tot}} + W_{i0})^2 - 4W_{i0}(Q + \beta + A_i)]^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (5)$$

$$\lambda_2 = -\frac{A_{\text{tot}} + W_{i0}}{2} + \frac{[(A_{\text{tot}} + W_{i0})^2 - 4W_{i0}(Q + \beta + A_i)]^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (6)$$

为了方便计算, 根据实验条件对计算参数做了以下的简化: 激光强度是随时间变化的方波脉冲, 氙原子处于室温且气压强度为  $1.0 \times 10^{-4}$  mbar, 因此, 在激光作用期间, 可忽略光淬灭和离子-电子复合现象 ( $Q \approx 0$ ); 双光子吸收速率和受激辐射速率  $W_{0i}$  和  $W_{i0}$  的值与激光功率密度的平方成正比, 光电离效应常数与激光功率密度成正比。根据 Kröll, S. 等人的研究成果<sup>[21]</sup>, 采用以下数值: 光

电离作用截面为  $\sigma_{\text{ion}} = 4.3 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ , 双光子吸收截面为  $\sigma^{(2)} = 4.0 \times 10^{-45} \text{ cm}^4 \cdot \text{s}$ , 亚稳态  $6p[1/2]_0$  的自发辐射速率  $A_i = 3.7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 。

如图 3 所示, 是电离比例与激光功率密度对应关系示意图。在激光脉宽为 5 ns 作用时间下, 电离比例(电离原子数与初始原子数的比值)随着激光功率密度增大呈指数增长, 为了减弱原子电离程度, 应尽可能降低激光功率密度。然而, 倘若激光功率密度太低又会导致荧光信号微弱至不可观测。因此, 需要估算系统可接受的电离程度和对应的激光功率密度。

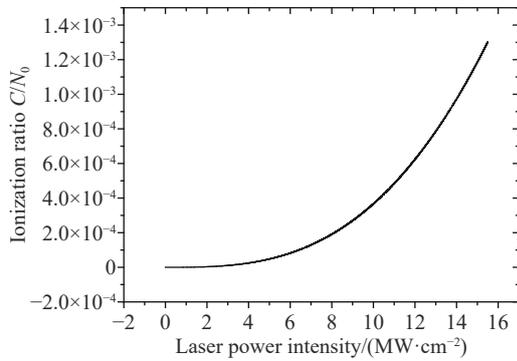


图 3 电离比例与激光功率密度关系

Fig. 3 The relationship between ionization ratio and laser power density

选取两块相距  $d_a$  的平行板  $P_A$  和  $P_C$  作为电极系统, 模拟电离对电场强度的影响。对  $P_C$  施加高压,  $P_C$  的电势为  $V_C$  ( $V_C$  为负值),  $P_A$  的电势  $V_A$  为 0。假设电子弛豫时间远小于激光脉冲持续时间, 电离过程可导致产生均匀的离子空间电荷。因此, 根据 Langmuir I 研究成果, 电极间的电势分布可表达为<sup>[22]</sup>

$$\frac{V(x)}{V_c} = \frac{x}{d_a} \left[ 1 - \left( \frac{S}{S_1} \right)^{\frac{2}{3}} \left( 1 - \frac{x}{d_a} \right) \right], \quad (7)$$

其中  $x$  代表从  $P_A$  到  $P_C$  的距离,  $S$  代表单位时间内每个单位体积产生的离子数量,  $S_1$  对应的是在阳极附近抛物线电势分布零梯度处的特定值。图 4 是平板电极间的电势分布。可见, 电势分布随着距离  $\frac{x}{d_a}$  变化: 当  $S/S_1 = 0$  时, 电场值未受干扰; 当  $S/S_1$  增大时, 电场受干扰程度随着离子位置靠近阳极增大。因此, 为了降低电离对电场的影响,  $S$  需要小于  $S_1$ , 即该区域位于曲线  $S/S_1 = 0$  和  $S/S_1 = 1$  之间(即图 4 中灰色区域)。

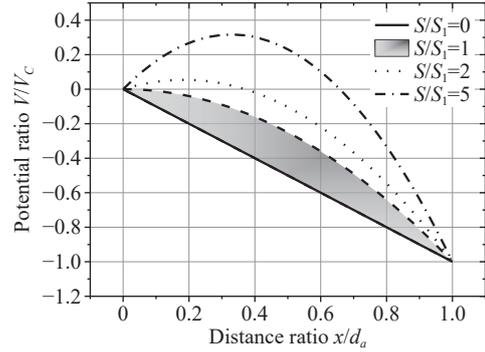


图 4 平板电极间的电势分布

Fig. 4 Potential distributions between plane electrodes

距离平板  $x$  处任意平面的电流强度可表示为

$$J = S \cdot e \cdot x, \quad (8)$$

到达平板  $P_C$  的离子电流密度  $J_a$  为

$$J_a = S_1 \cdot e \cdot d_a = \frac{4}{\pi} \cdot \epsilon_0 \left( \frac{2e}{m_p} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(V_c)^{\frac{3}{2}}}{d_a^2}, \quad (9)$$

其中  $m_p$  是离子的质量, 氙离子的质量  $m_p = 2.2 \times 10^{-25} \text{ kg}$ 。

在激光脉宽  $\tau_L$  作用下, 微扰电场情况下的电离原子密度

$$N_e = S \cdot \tau_L < S_1 \cdot \tau_L = \frac{4}{\pi} \cdot \epsilon_0 \left( \frac{2e}{m_p} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(V_c)^{\frac{3}{2}}}{d_a^2} \cdot \frac{1}{e \cdot d_a} \cdot \tau_L, \quad (10)$$

气压为  $P$  的氙原子的初始密度为

$$N_d = \frac{P}{kT}, \quad (11)$$

由此可估算出电场微扰的电离比例:

$$\zeta < \frac{N_e}{N_d} = \frac{4}{\pi} \cdot \epsilon_0 \left( \frac{2e}{m_p} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(V_c)^{\frac{3}{2}}}{d_a^2} \cdot \frac{1}{e \cdot d_a} \cdot \tau_L \cdot \frac{kT}{P}. \quad (12)$$

在激光脉宽为 5 ns, 电极间距为 0.25 cm, 施加电势为 500 V 的实验条件下, 可得到对电场微扰的粒子电离比例  $\zeta = 1.2 \times 10^{-4}$ 。由图 3 可得该电离比例下的激光功率密度阈值为  $6.9 \text{ MW/cm}^2$ 。由此可知, 在该实验条件下, 对电场强度微扰的激光功率密度阈值为  $6.9 \text{ MW/cm}^2$ 。当激发光的功率密度小于  $6.9 \text{ MW/cm}^2$  时, 可认为光电离效应对电场测量是微扰的。

## 2.2 场电离效应

场电离效应主要是里德堡能级上的电子受外

部电场作用发生电离产生的。在耦合光作用下, 电子从亚稳态激发至里德堡能级, 导致里德堡能级的价电子和原子核结合力较弱。因此, 在外部电场作用下, 会因为势垒降低导致场电离现象的发生。在电场作用下, 里德堡能级主量子数越大, 场电离越容易发生。Stebbing R F 等人<sup>[23]</sup>对氙原子的场电离速率 $\beta_{\text{field}}$ 进行了实验研究, 得出产生场电离效应的临界电场强度为

$$E_c(n) = 6.2 \times 10^8 \times n^{-4} \text{ [V/cm]} \quad (13)$$

其中  $n$  是里德堡能级的主量子数,  $E_c$  是临界电场强度。

在实验中, 待测区域的电场强度约为 2 kV/cm, 里德堡能级的最大主量子数为 18, 由于其对应的场电离临界电场强度为 6 kV/cm, 远大于 2 kV/cm。因此, 在该实验条件下, 场电离效应并不是影响待测区域电场强度的主要因素。

综上所述, 在外部电场强度为 2 kV/cm 及以下时, 电子电离主要由光电离效应产生, 激发光的

激光功率密度是关键影响参数。通过理论分析, 得到了对环境电场微扰的激光功率密度与实验参数的函数关系, 为后续实验开展提供理论参考。

### 3 测量实验与结果

#### 3.1 实验设置

为了验证激光功率密度对环境电场的影响, 搭建了新型暗荧光光学诊断实验平台, 如图 5 所示。图中两个染料激光器分别由 Nd:YAG 激光器通过二倍频和三倍频泵浦产生激发光和耦合光, 将氙原子由基态激发至里德堡态。激发光波长为 249.629 nm, 用于将原子从基态激发至亚稳态  $6p[1/2]_0$ , 耦合光波长约为 586 nm, 用于将原子从亚稳态激发至里德堡态, 耦合光线宽约为 1 nm, 波长沿水平方向呈线性变化, 在垂直方向保持一致。通过光束时延控制使两束光交汇于测试腔内, 激发示踪气体产生荧光。ICCD(Intensified CCD) 相机用于获取荧光的强度和位置信息。

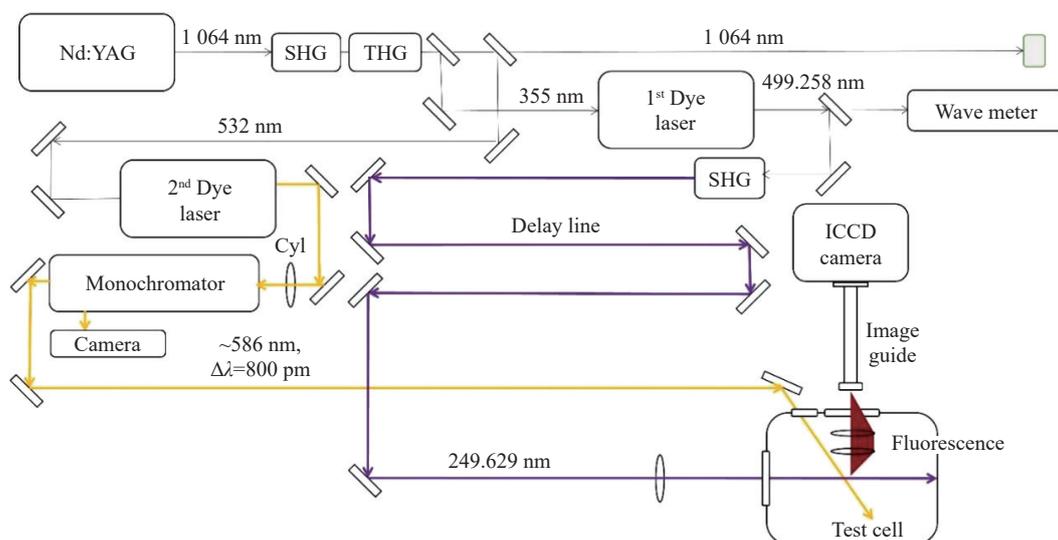


图 5 新型暗荧光光学诊断实验平台示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental set-up for the modified-LIF-DIP diagnostics

为了更好地观测激光对环境电场的影响, 使用平板电极板模拟环境电场。图 6 是激光暗荧光光学诊断测试腔示意图。首先利用真空泵将测试腔体抽至真空度为  $10^{-6}$  mbar, 通过脉冲气压阀将氙气充至测试腔内, 氙气约为  $10^{-4}$  mbar。测试腔内置 4 块电极板, 两两相连, 中间两块电极板相距 0.25 cm, 将测试区域切分成 3 个部

分。在高压电源对电极施加电势 500 V 后, 两两相连区域内电势为零, 中间区域电场强度约为 2 kV/cm。罗氏线圈用于监测回路的电流值。两束脉宽均为 5 ns 的激光分别通过透镜入射至电极板内, 将氙气激发至里德堡能级。基于 Stark 效应, 观测暗荧光的偏移量, 可以得出外部电场的强度。

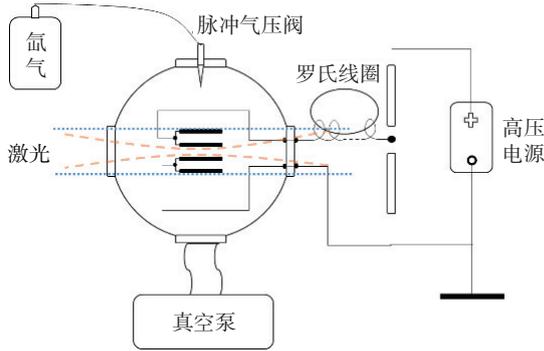


图 6 激光暗荧光光学诊断测试腔示意图

Fig. 6 The sketch of measurement chamber of laser-induced fluorescence-dip optical diagnosis

### 3.2 实验结果

基于上述实验平台,开展了激光功率密度对环境电场影响的实验。实验中,将激光功率密度由  $10 \text{ MW/cm}^2$  逐步减弱,通过观测暗荧光信号的分布来判断环境电场是否受到干扰。

图 7(彩图见期刊电子版)是激光功率密度为  $10 \text{ MW/cm}^2$  时的暗荧光信号分布图。需要说明的是,图 7(a) 中水平方向的黑色区域是电极所处位置造成的,不是暗荧光信号,垂直方向黑色区域是暗荧光信号。平板电极将空间分为上中下三个区域,其中上下区域电场强度为零,中间区域场强为  $E$ 。暗荧光信号空间信息蕴含了耦合光的波长信息,暗荧光位置(谐振波长)沿水平方向呈线性变化。上下区域的暗荧光位置对应着电场强度零,当中间区域存在电场强度时,根据 Stark 效应,暗荧光位置会产生红移即向左偏移。如图 7 所示,在靠近阳极附近位置(图中红色圆圈所在位置),暗荧光信号位置未发生偏移,即表明该位置电场强度为零,从阳极至阴极过程中,暗荧光位置慢慢向左偏移,表明电场强度逐渐增强。该现象显示中间区域内的电场强度并不是恒定值,而是随着距离变化的。这一现象是由于入射激光产生了电子电离,使阳极附近的电场产生扰动导致电场强度失真。进一步地,将电极正负极翻转,如图 7(b) 所示,相同的现象出现在阳极附近,即阳极附近电场受到了干扰,与理论计算趋势保持一致。上述结果表明,当激光功率密度过高时,光电离效应会对环境电场强度产生干扰,导致测量值与实际值不一致,测量结果失真。

为了避免因光电离效应产生的带电粒子扭曲局部电场导致阳极附近电场受到扰动,将激光功率密度逐步降低至对环境电场强度微扰的状态,

图 8 是激光功率密度为  $5 \text{ MW/cm}^2$  时,暗荧光信号分布图。暗荧光信号在电场强度为  $2 \text{ kV/cm}$  的区域内,整体发生了线性平移(图中红色框所在位置),即其谐振波长的偏移量相同,依据 Stark 效应,可推导出该区域内的电场强度是常量,表明电场未受到扰动。

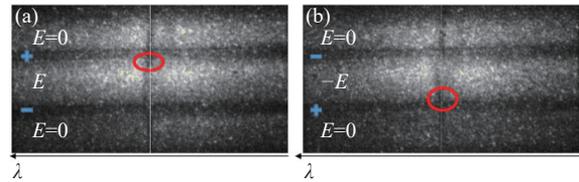
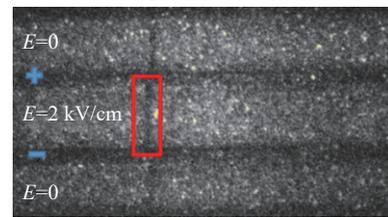
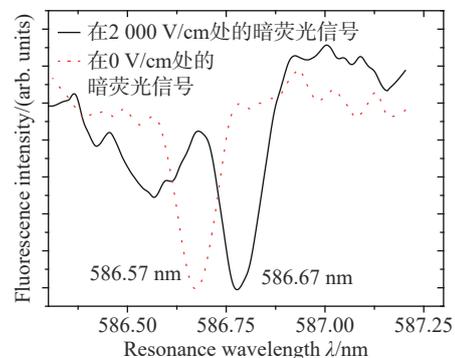
图 7 激光功率密度为  $10 \text{ MW/cm}^2$  时,暗荧光信号分布图Fig. 7 Fluorescence dip signal distribution when the laser power density is  $10 \text{ MW/cm}^2$ 图 8 激光功率密度为  $5 \text{ MW/cm}^2$  时,暗荧光信号分布图Fig. 8 Fluorescence dip signal distribution when the laser power density is  $5 \text{ MW/cm}^2$ 

图 9 是荧光信号在  $2 \text{ kV/cm}$  处和  $0 \text{ kV/cm}$  处的位置信息对比结果。通过位置信息可推算出耦合光的谐振波长信息。经分析,在  $2 \text{ kV/cm}$  处耦合光的谐振波长为  $586.67 \text{ nm}$ ,与  $0 \text{ kV/cm}$  ( $586.57 \text{ nm}$ ) 相比,偏移了  $100 \text{ pm}$ 。根据 Stark 效应,氙气的里德堡能级  $15 \text{ d}[3/2]_1$  在  $2 \text{ kV/cm}$  处的理论偏移量为  $113 \text{ pm}^{[13]}$ ,实验值与理论值保持一致。

图 9 激光功率密度为  $5 \text{ MW/cm}^2$  时,暗荧光信号  $2 \text{ kV/cm}$  与  $0 \text{ kV/cm}$  的谐振波长对比Fig. 9 Resonant wavelength comparison of fluorescence dip signal in  $2 \text{ kV/cm}$  and  $0 \text{ kV/cm}$  when the laser power density is  $5 \text{ MW/cm}^2$

结果表明,随着激光功率密度的降低,在气体压强为  $10^{-4}$  mbar, 电场强度不大于 2 kV/cm 的条件下,测量区域内的电场强度因电子电离受到的扰动较微弱,此时测得的电场强度准确性较高。

## 4 结 论

本文基于新型激光暗荧光光谱诊断方法,介绍了一种激光功率密度对环境电场的微扰测量理论分析方法,并通过理论分析和实验得出,在电场测量微扰情况下,激光功率密度与测试环境参数的关系模型。结合典型实验场景,基于关系模型,推算出对电场微扰的激光功率密度理论参考值为  $6.9 \text{ MW/cm}^2$ 。最后,结合典型实验场景,开展了不同激光功率密度下,电场测量的微扰实验。实验结果表明,在激光功率密度为  $10 \text{ MW/cm}^2$  时,因入射光光电离效应产生的带电粒子会扰动局部

电场,导致测量结果失真。将激光功率密度逐步降低至  $5 \text{ MW/cm}^2$  时,局部电场受到扰动的现象消失,表明该功率密度下,电离效应对电场的扰动较微弱。此外,通过对比耦合光在 2 kV/cm 和 0 kV/cm 的谐振波长,得出波长偏移量为 100 pm,与理论值 113 pm 基本一致。进一步表明,在此激光功率密度下,待测电场并没有出现局部电场受到干扰的情况,测量结果可信。误差的主要来源于理论计算对参数进行了简化,并且在分析电离对电场的影响时,假设离子是均匀产生的,这在实践中是不可能发生的。该理论分析方法填补了激光暗荧光光谱诊断方法中,激光功率密度对电场环境影响缺乏定量分析的空白,可应用在同类电场测量中,特别是在需要通过增强激光功率密度以改善信号质量的情况下,为激光功率密度与实验参数的设置提供依据和参照,从而提升电场测量的准确性。

## 参考文献:

- [1] 杜昆,陈麒好,孟宪龙,等. 陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 210380.  
DU K, CHEN Q H, MENG X L, *et al.*. Advancement in application and thermal analysis of ceramic matrix composites in aeroengine hot components[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(2): 210380. (in Chinese).
- [2] 赵传东,李金燕,张欢. 耐高温材料在航空发动机上的应用研究[J]. 内燃机与配件, 2021(18): 55-56.  
ZHAO CH D, LI J Y, ZHANG H. Research on application of high temperature materials in aero-engine[J]. *Internal Combustion Engines & Parts*, 2021(18): 55-56. (in Chinese).
- [3] SHAO L, LI W SH, LI D Y, *et al.*. A review on combustion behavior and mechanism of Ti alloys for advanced aero-engine[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 960: 170584.
- [4] 郑言. 2021 年我国复合材料的行业发展态势、存在问题与发展建议[J]. 应用化学, 2022, 39(2): 351-352.  
ZHENG Y. Development trend, existing problems, and development suggestions of China's composite materials industry in 2021[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(2): 351-352. (in Chinese).
- [5] 史和昌,于彦存,韩常玉. 聚乙烯/氧化铝复合材料形态、流变和力学性能[J]. 应用化学, 2022, 39(10): 1593-1599.  
SHI H CH, YU Y C, HAN CH Y. Morphology, rheological and mechanical properties of polyethylene/aluminium oxide composites[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(10): 1593-1599. (in Chinese).
- [6] 杨琦,田娜娜,关锦彤,等. 强流脉冲电子束作用下 Ti<sub>2</sub>AlNb 微观结构状态与耐腐蚀性能研究[J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(10): 870-878.  
YANG Q, TIAN N N, GUAN J T, *et al.*. Microstructure and corrosion properties of Ti<sub>2</sub>AlNb irradiated by high current pulsed electron beam treatment[J]. *Chinese Journal Vacuum Science and Technology*, 2023, 43(10): 870-878. (in Chinese).
- [7] IVANOV K V, AKIMOV K O, FIGURKO M G. The effect of low-energy high-current pulsed electron beam irradiation on the structure, phase composition and mechanical properties of Ni<sub>3</sub>Al and Ni<sub>3</sub>Al-TiC composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 973: 172950.
- [8] GUAN Q F, HAN J, ZHOU SH Y, *et al.*. Improved mechanical and tribological properties of TiAlN coatings by high current pulsed electron beam irradiation[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2024, 118: 106435.
- [9] MOORE C A, DAVIS G P, GOTTSCHO R A. Sensitive, nonintrusive, *in-situ* measurement of temporally and spatially

- resolved plasma electric fields[J]. *Physical Review Letters*, 1984, 52(7): 538-541.
- [10] CHNG T L, STARIKOVSKAIA S M, SCHANNE-KLEIN M C. Electric field measurements in plasmas: how focusing strongly distorts the E-FISH signal[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, 29(12): 125002.
- [11] ORR K, TANG Y, SIMENI M S, *et al.*. Measurements of electric field in an atmospheric pressure helium plasma jet by the E-FISH method[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, 29(3): 035019.
- [12] 李悦, 张国霞, 蔡朝晴, 等. 大气压辉光放电结合圆柱约束增强激光诱导击穿光谱应用于土壤中稀土元素的检测[J]. *分析化学*, 2022, 50(9): 1384-1390.
- LI Y, ZHANG G X, CAI ZH Q, *et al.*. Atmospheric pressure glow discharge combined with cylindrical confinement enhanced laser-induced breakdown spectroscopy for determination of rare earth in soil[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 50(9): 1384-1390. (in Chinese).
- [13] 舒开强, 陈友元, 彭郑英, 等. 铀矿中多目标元素的激光诱导击穿光谱定量分析方法研究[J]. *分析化学*, 2023, 51(7): 1195-1203.
- SHU K Q, CHEN Y Y, PENG ZH Y, *et al.*. Laser-induced breakdown spectroscopy for quantitative analysis of multi-target elements in uranium ore[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(7): 1195-1203. (in Chinese).
- [14] CZARNETZKI U, LUGGENHÖLSCHER D, DÖBELE H F. Sensitive electric field measurement by fluorescence-dip spectroscopy of Rydberg states of atomic hydrogen[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(21): 4592-4595.
- [15] TAKIZAWA K, SASAKI K, KADOTA K. Observation of Stark spectra of argon high Rydberg states in well-defined electric fields by laser-induced fluorescence-dip spectroscopy[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(11B): L1285-L1287.
- [16] KAMPSCHULTE T, SCHULZE J, LUGGENHÖLSCHER D, *et al.*. Laser spectroscopic electric field measurement in krypton[J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(1): 18.
- [17] WAGENAARS E, KROESEN G M W, BOWDEN M D. Investigations of Stark effects in xenon Rydberg states by laser-induced fluorescence-dip spectroscopy[J]. *Physical Review A*, 2006, 74(3): 033409.
- [18] AN W, WANG ZH, WEISENBURGER A, *et al.*. Laser-induced fluorescence-dip spectroscopy of Rydberg states of xenon for electric field measurement in plasma[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(2): 023503.
- [19] STANCU G D. Two-photon absorption laser induced fluorescence: rate and density-matrix regimes for plasma diagnostics[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, 29(5): 054001.
- [20] ZAKHEIM D S, JOHNSON P M. Rate equation modelling of molecular multiphoton ionization dynamics[J]. *Chemical Physics*, 1980, 46(3): 263-272.
- [21] KRÖLL S, BISCHEL W K. Two-photon absorption and photoionization cross-section measurements in the  $5p^56p$  configuration of xenon[J]. *Physical Review A*, 1990, 41(3): 1340-1349.
- [22] LANGMUIR I. The interaction of electron and positive ion space charges in cathode sheaths[J]. *Physical Review*, 1929, 33(6): 954-989.
- [23] STEBBINGS R F, LATIMER C J, WEST W P, *et al.*. Studies of xenon atoms in high Rydberg states[J]. *Physical Review A*, 1975, 12(4): 1453-1458.

#### 作者简介:



王 楨(1990—),男,江苏南通人,工程师,2013年、2015年于国防科学技术大学分别获得学士学位、硕士学位,2021年于德国卡尔斯鲁厄理工学院获得工学博士学位,主要从事脉冲功率、光学诊断、量子探测等方面的研究。E-mail: [18774840943@163.com](mailto:18774840943@163.com)