

# 飞秒激光引导高压放电下的 SF<sub>6</sub> 等离子体 时间分辨光谱特性\*

张云刚<sup>1)†</sup> 刘黄韬<sup>1)</sup> 高强<sup>2)</sup> 朱志峰<sup>2)</sup> 李博<sup>2)</sup> 王永达<sup>1)</sup>

1) (燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

2) (天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

(2020年4月30日收到; 2020年5月25日收到修改稿)

SF<sub>6</sub> 作为气体绝缘介质广泛应用于气体绝缘设备中, 其电弧等离子体得到广泛研究, 但对 SF<sub>6</sub> 电弧等离子体时间分辨光谱特性的研究还未见报道. 本文在 SF<sub>6</sub> 环境中利用飞秒激光自聚焦产生的光丝引导高压放电, 诱导产生 SF<sub>6</sub> 等离子体; 利用光谱系统采集 300—820 nm 波长范围内的 SF<sub>6</sub> 等离子体光谱, 对光谱谱线开展了识别和归属研究, S 和 F 谱线主要分布在 300—550 nm 和 600—800 nm 波段, 分析认为 S 和 F 原子主要由 SF<sub>6</sub> 被高能电子碰撞直接或间接产生, S 离子由 S 原子被高能电子撞击产生. 给出了 SF<sub>6</sub> 等离子体的时间分辨光谱, 等离子体光谱强度先增大后减弱, 均由带状光谱和分立光谱叠加而成, 带状光谱主要是由韧致辐射和复合辐射共同作用导致, 基于时间分辨光谱得到了部分 S 和 F 的荧光寿命. 给出了电子温度和电子密度随时间的演化规律, 二者演化规律基本相同, 且都随延迟时间呈指数衰减. 最后, 利用 Mc Whirter 准则得到 SF<sub>6</sub> 等离子体处于局部热平衡. 研究结果对于开展 SF<sub>6</sub> 分解机理和高压设备运行状态在线监测技术研究具有重要意义.

**关键词:** 飞秒激光引导高压放电, 时间分辨光谱, 电子温度和密度, SF<sub>6</sub>

**PACS:** 52.80.-s, 33.20.-t, 52.55.Dy, 52.25.Kn

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200636

## 1 引言

SF<sub>6</sub> 气体具有良好的绝缘和灭弧性能, 其作为绝缘介质广泛应用于气体绝缘设备中. 国内外大量研究表明, 当气体绝缘设备由于内部绝缘缺陷发生放电时, SF<sub>6</sub> 会发生分解, 分解产生的低氟硫化物会与设备内的微量水和氧气反应生成具有毒性和腐蚀性的副产物, 这些副产物会加速设备绝缘劣化, 严重影响设备的正常运行, 甚至危害现场工作人员的安全<sup>[1,2]</sup>. 因此, 有必要开展 SF<sub>6</sub> 放电分解特性的研究, 研究结果对于进一步开展 SF<sub>6</sub> 分解机理和高压设备运行状态在线监测技术研究具有重要

意义.

目前, 国内外研究人员对 SF<sub>6</sub> 放电分解的研究主要集中在宏观和微观两个方面. 宏观上, 国内外研究主要是利用色谱和质谱等检测方法测量 SF<sub>6</sub> 最终反应产物以反推 SF<sub>6</sub> 放电分解机理. Tang 等<sup>[3,4]</sup> 建立四种人工缺陷模型以模拟气体绝缘设备不同局部放电 (PD) 情况, 并提出利用分解物特征浓度比识别不同 PD, 研究了微量 H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub> 对特征浓度比的影响; Zeng 等<sup>[5]</sup> 利用缺陷模型研究了 PD 下 O<sub>2</sub> 对 SF<sub>6</sub> 分解的影响; Liu 等<sup>[6]</sup> 利用针板模型和气相色谱法定量测定了 SF<sub>6</sub> 分解的特征成分, 并研究了 SF<sub>6</sub> 在不同气体压力和电压水平下的 PD 分解特性和分解机理. 微观上, 国内

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51806149, 61308065) 和河北省自然科学基金 (批准号: E2015203014) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangyg@ysu.edu.cn

外研究主要集中在建立 SF<sub>6</sub> 等离子体模型以研究 SF<sub>6</sub> 等离子体组分及其分解机理. Swarbrick<sup>[7]</sup> 首先研究了 SF<sub>6</sub> 电弧等离子体的组成, 同时计算得到电导率和导热率; Gleizes 等<sup>[8]</sup> 和 Girard 等<sup>[9]</sup> 几乎同一时间提出两温 (2T) 动力学模型用以计算 SF<sub>6</sub> 等离子体的组成, 同时 Gleizes 等进一步提出利用 2T 等离子体组成计算 SF<sub>6</sub> 等离子体的热力学参数; 由于温度模型在重离子较低的温度区域具有局限性, Rat 等<sup>[10]</sup> 提出伪平衡模型, 并验证了模型在 SF<sub>6</sub> 气体中的应用; 由于气体绝缘设备内存在部分杂质 (如氧气、水和有机绝缘子), Coll 等<sup>[11]</sup> 建立化学动力学模型以研究设备内杂质对 SF<sub>6</sub> 主要稳定气态分解产物 (如 SOF<sub>4</sub> 和 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 等) 形成的影响; Van Brunt 等<sup>[12,13]</sup> 针对金属突出物缺陷, 在负极性直流条件下提出区域等离子体化学模型, 并分区域阐述了 SF<sub>6</sub> 在 PD 下的分解机理、分解过程和分解产物等; 近两年, Gao 等<sup>[14,15]</sup> 在交流电晕放电下建立 SF<sub>6</sub> 放电分解的化学动力学模型, 并分析分解产物的化学过程和生成机理, 借助模型定量分析了不同水分和氧气含量下的主要放电分解机理, 同时通过计算所有 SF<sub>6</sub> 放电分解反应的贡献量获得了主要放电分解反应以及 H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub> 对主要反应过程的影响.

此外, 研究人员对 SF<sub>6</sub> 放电分解的光谱特性进行了部分研究. Vacquie 等<sup>[16]</sup> 介绍了几种研究 SF<sub>6</sub> 电弧等离子体电子密度的方法. 在国内, 徐建源和王其平<sup>[17]</sup> 最早开展 SF<sub>6</sub> 等离子体光谱特性的研究, 并给出了部分 SF<sub>6</sub> 等离子体光谱诊断常用的谱线和谱线参数; 近几年, 林莘等<sup>[18]</sup> 搭建 SF<sub>6</sub> 放电实验平台, 采用 Stark 展宽法和光强比值法对获得的光谱分析并得到电子温度和电子密度, 同时研究了气体压强对电子温度和电子密度的影响; 李学斌等<sup>[19]</sup> 利用发射光谱法对 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体的光谱特性进行实验, 并研究了不同极板间距和气体压强对电子密度和电子温度的影响; 庚振新等<sup>[20]</sup> 修正了 Saha 和 Guldberg-Wagge 方程并得到了 0.1—0.6 MPa 压强下的电子温度和电子数密度等参数, 同时利用 SF<sub>6</sub> 实验平台的测量结果验证了模型结果的准确性. 然而, 由于仪器设备等条件的限制, 虽然此前对 SF<sub>6</sub> 放电分解特性开展了大量研究, 但对 SF<sub>6</sub> 电弧等离子体的时间分辨特性方面的研究还未见报道. 研究等离子体特性的一种重要手段是对光谱进行分析, 通过对光谱的分析, 既可以得到

等离子体的温度和密度信息, 还可以获得各种离子的产生和消失等随时间变化的信息<sup>[21]</sup>.

近年来, 飞秒激光和纳秒激光引导放电得到广泛关注, 使用纳秒激光引导放电可以以 1 ns 的抖动时间获得出色的开关脉冲时间稳定性, 通过使用飞秒激光引导放电可以在皮秒内获得更好的时间稳定性, 并且沿着飞秒激光自聚焦产生的丝状等离子体通道严格限定放电路径, 实现放电在时间和空间上可控. 此外, 通过预实验我们发现 SF<sub>6</sub> 等离子体时间分辨光谱观测时间约为 1.5 μs, 时间很短, 不便利用纳秒激光引导放电开展 SF<sub>6</sub> 等离子体时间分辨光谱的研究工作. 因此, 本文利用飞秒激光引导高压放电具有对放电在时间和空间上可控的特性, 通过具有纳秒时间分辨功能的 PI-MAX-III 型 ICCD 获得激光光丝处等离子体的空间和时间分辨光谱, 进而研究等离子体发射光谱特性. 研究了飞秒激光在 SF<sub>6</sub> 环境中引导高压放电产生等离子体光谱随时间演化的特性, 给出了部分分解物的荧光寿命以及 SF<sub>6</sub> 电弧等离子体电子温度和电子密度随时间的演化规律.

## 2 实验部分

在绝缘介质 SF<sub>6</sub> 中飞秒激光引导高压放电的实验装置结构如图 1 所示, 包括喷管、飞秒激光、高压放电系统和检测系统. 喷管是直径为 2.5 mm 的玻璃管, SF<sub>6</sub> 经质量流量计控制从喷管喷出, 流速为 3 m/s. 激光源是飞秒 Ti:sapphire 激光器 (Spectra-Physics, Spitfire Ace), 输出波长 800 nm,

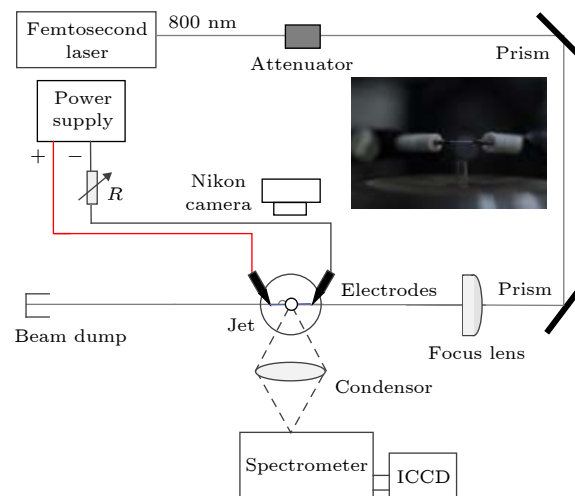


图 1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

脉冲持续时间为 45 fs, 重复频率为 10 Hz, 最大脉冲能量为 9 mJ, 本实验通过衰减器控制脉冲能量为 7 mJ. 激光经棱镜传导和透镜 ( $f = 300$  mm) 聚焦后产生光丝, 穿过 SF<sub>6</sub> 气体.

高压放电系统由直流纳秒脉冲高压电源 (HVP-P20, Xi'an Smart Maple Electronic Technology Co., Ltd.)、可调限流电阻 (最大值为 5 kΩ) 和一对高压电极组成. 高压电源电压为 12 kV, 频率为 10 Hz, 上升沿和下降沿为 50 ns. 电极对与电源正极和接地端相连, 间距为 8 mm, 插图是由单镜头反光 (SLR) 照相机 (D90, Nikon) 拍摄的喷管、激光光丝和高压电极的空间位置关系图, 高压电极靠近光丝附近引导放电, 光丝位于喷管正上方 2 mm, 同时串接可调限流电阻控制放电能量.

检测系统中, 高压探头和电流探头 (CT-1, Tektronix) 记录高压电源输出的电压和电流变化特性, 同时记录在 600 MHz 示波器中. 配有球面透镜 ( $f$  为 100 mm) 的光谱仪 (Acton 2300i, Princeton Instrument) 收集 SF<sub>6</sub> 等离子体光谱特征, 测量时, 调整光谱仪位置使光谱仪狭缝 (狭缝宽度为 200 μm) 与光丝平行, 获得 SF<sub>6</sub> 等离子体光谱. 光栅分散的信号由增强型电荷耦合器件 (ICCD, PI-MAX3:1024i, Princeton Instruments) 在出口处捕获. 在实验开始前, 采用标准汞灯对光谱仪测量的

波长进行校准, 采用标准卤素光源积分球 (PP-02097-000, Labsphere) 对光谱响应进行校准.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 飞秒激光引导高压放电下的 SF<sub>6</sub> 等离子体光谱分析

图 2 给出了纯 SF<sub>6</sub> (浓度为 99.999%) 在飞秒激光引导放电下的等离子体在 300—820 nm 波段光谱图, 相机曝光时间为 100 μs, 增益为 50, 读写延迟为 0 ns (相对于激光信号, 3130 ns 时激光信号出现, 3230 ns 时触发高压电源, 下同). 根据美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 原子光谱数据库 (Atomic Spectra Database Line Data) 对观测到的 SF<sub>6</sub> 等离子体光谱进行识别和归属, 插图显示了 340—420 nm 波长段 S 的谱线信息, 该波段主要是 S 的诸多离子谱线. 特别是, 本实验成功观测到文献 [22] 所述的较难观测到的氟 (光谱范围 638—691 nm) 和硫 (光谱范围 520—550 nm) 的发射线, 其中 Fe 的发射线是由电极材料产生的, 不同原子和离子谱线已在图中用不同颜色标注. 从图 2 可观测到谱图中存在大量 S 和 F 的原子和离子谱线, 且 S 离子主要分布在 300—550 nm 的可

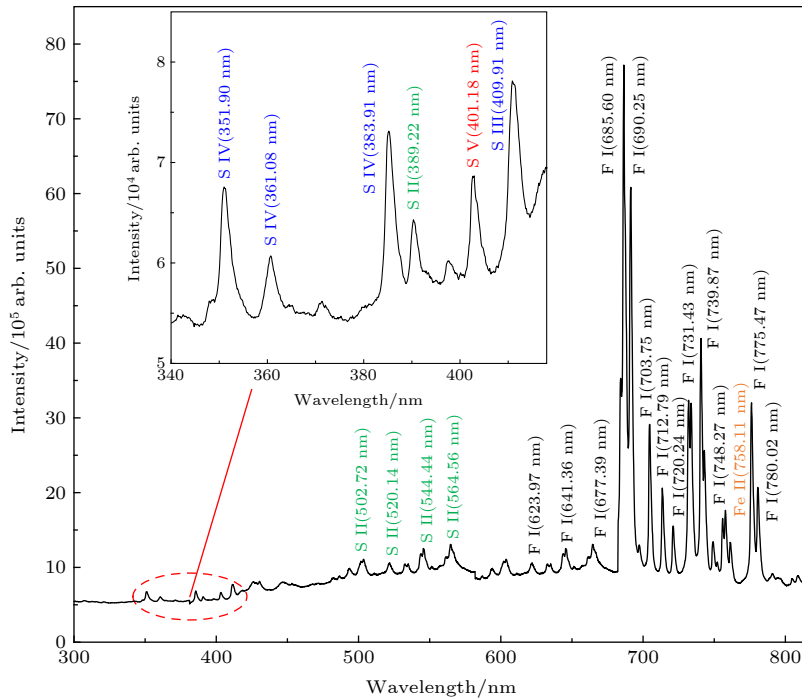
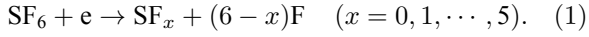


图 2 飞秒激光引导高压放电下的 SF<sub>6</sub> 等离子体光谱图

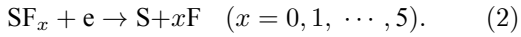
Fig. 2. SF<sub>6</sub> plasma spectrum under femtosecond laser-guided high-voltage discharge.

见光波段, F 原子主要分布在 600—820 nm 波段的红外光谱区域, 观测结果表明 SF<sub>6</sub> 在放电情况下发生了解, 并生成了大量的 S 和 F 的原子和离子. 主要分解过程如下:

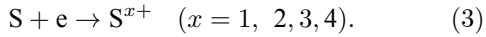
1) SF<sub>6</sub> 气体分子首先受到高能电场产生的高能电子的撞击而发生分解产生部分 F 原子和低氟硫化物 (SF<sub>x</sub>, x < 6), 即



2) 产生的 SF<sub>x</sub> 会被高能电子撞击分解产生 S 和 F 原子, 即



3) 产生的 S 原子被高能电子撞击会进一步生成 S 离子, 即图 2 中 300—550 nm 的 S 元素的波段, 其过程为

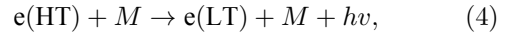


为研究 SF<sub>6</sub> 等离子体的时间演化特性, 对 F 原子存在较密集的 600—800 nm 波段的时间分辨光谱进行测量, 如图 3 所示, 已去除背景噪声, 相机曝光时间为 100 ns, 增益为 50. 从图 3 可以看出, 激光信号到达后, 并未立即引导放电产生光谱, 400 ns 后, 即 3530 ns 时出现 SF<sub>6</sub> 等离子体光谱, 500 ns 后谱线强度达到最大, 此后逐渐减弱并消失, 即光谱强度随时间先增大后减小, 等离子体存在时间约为 1.3 μs.

从图 2 可以看出, 除 S 和 F 的分立谱线外, 谱图中存在较为强烈的连续谱. 图 3 中, 在等离子体

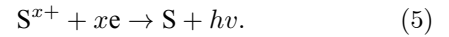
形成初期, 谱图中也存在较为强烈的连续谱, 大约 300 ns 后连续谱的强度才逐渐减弱. 一般情况下, 等离子体连续谱被认为是由韧致辐射和复合辐射共同作用导致的.

韧致辐射主要是 SF<sub>6</sub> 分解产生的等离子体中的高温自由电子与含 S 或 F 的粒子碰撞产生的自由态-自由态的跃迁而导致的温度降低和能量损失发出光子的过程, 即

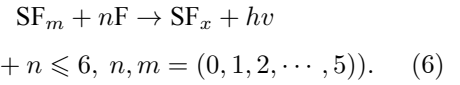


式中, e(HT) 为高温自由电子, M 为被碰撞的 SF<sub>6</sub> 分解产生的含 S 或 F 粒子, e(LT) 是低温自由电子, h 为普朗克常数, ν 为辐射频率.

复合辐射主要是自由电子与离子碰撞时被离子俘获变成束缚态电子后将多余的能量以光子的形式释放出来的过程. 在 SF<sub>6</sub> 等离子体中, SF<sub>6</sub> 气体分子解离后产生的 S 离子与自由电子复合的过程, 即



此外, SF<sub>6</sub> 气体分子解离后产生的 SF<sub>x</sub> 与 F 原子的直接复合辐射过程也会对连续谱产生影响, 即



同时, SF<sub>6</sub> 分解产生的等离子体中的 S 原子以及 SF 分子等组分的复合过程也会对连续谱产生一定的影响<sup>[20]</sup>, 即

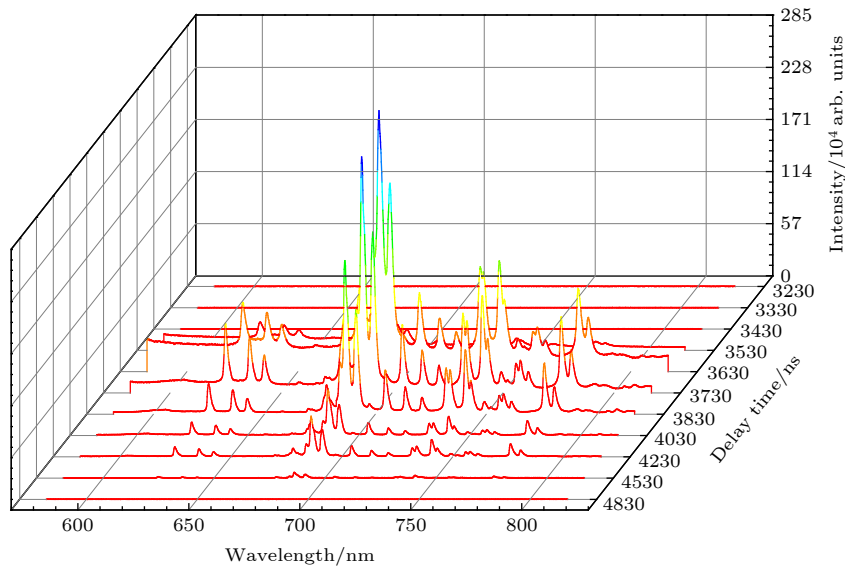
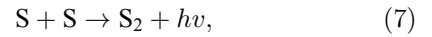
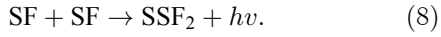


图 3 SF<sub>6</sub> 等离子体时间分辨光谱  
Fig. 3. SF<sub>6</sub> plasma time-resolved spectroscopy.



理论分析表明, 对于能量为  $E_n$  的分子离子复合过程, 其辐射功率可表示为

$$P(n, f, T_e) = 1.73 \times 10^{-51} \frac{N_e N_i Z^4}{n^3 (kT_e)^{3/2} g} \times \exp\left(-\frac{hf - |E_n|}{kT_e}\right), \quad (9)$$

式中,  $N_e$  为电子密度,  $T_e$  为电子温度,  $N_i$  为等离子体中自由离子的密度,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $Z$  为离子的电荷数,  $f$  为复合辐射光的频率,  $n$  为复合原子的能级主量子数,  $E_n$  为相应能级的能量. (9) 式表明, 辐射功率与电子温度和电子密度等参数存在紧密联系.

图 4 为飞秒激光引导高压放电的  $\text{SF}_6$  等离子体 S III 409.91 nm 和 F I 685.60 nm 的时间衰减寿命曲线, 采用单指数衰减函数对实验数据拟合, 拟合函数为

$$I(t) = I_0 + A \exp(-t/\tau), \quad (10)$$

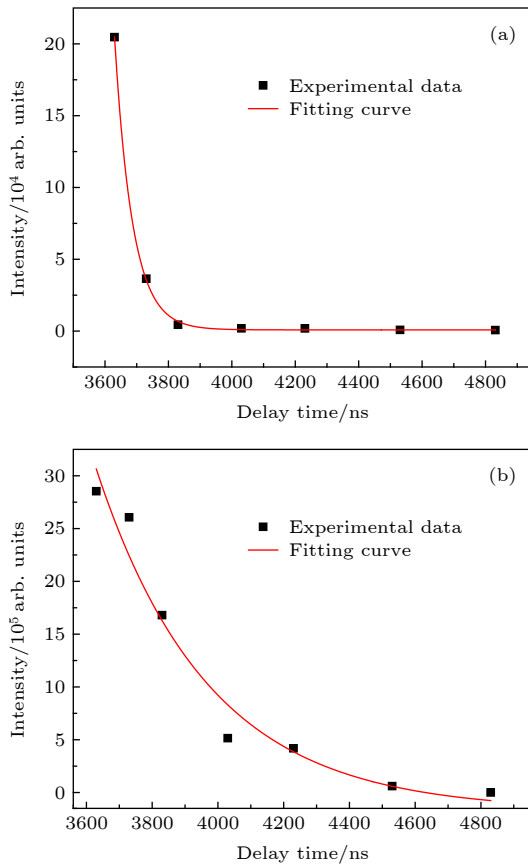


图 4  $\text{SF}_6$  电弧等离子体时间衰减寿命曲线 (a) S III 409.91 nm; (b) F I 685.60 nm

Fig. 4. Time decay life curves of  $\text{SF}_6$  plasma: (a) S III 409.91 nm; (b) F I 685.60 nm.

式中,  $I(t)$  和  $I_0$  分别为  $t$  和 0 时刻的谱线强度,  $A$  为拟合参数,  $\tau$  为荧光寿命,  $t$  为荧光衰减时间. 经拟合, 得到 S 离子在 409.91 nm 处的寿命为 57 ns, F 原子在 685.60 nm 处的寿命为 341 ns.  $\text{SF}_6$  放电分解过程还存在着更为复杂的过程, 有待于进一步研究.

### 3.2 飞秒激光引导高压放电下的 $\text{SF}_6$ 等离子体参数分析

电子温度和电子密度作为描述等离子体状态的两个重要参数, 对于  $\text{SF}_6$  等离子体的研究具有重要意义.

#### 3.2.1 等离子体电子温度随时间的演化过程

电弧等离子体多处于局部热力学平衡<sup>[23]</sup>, 因此认为飞秒激光引导高压放电产生的  $\text{SF}_6$  等离子体满足局部热力学平衡,  $\text{SF}_6$  等离子体电子温度可利用玻尔兹曼多谱线斜率法计算<sup>[21]</sup>

$$\ln\left(\frac{I\lambda}{A_{ik}g_k}\right) = -\frac{E_k}{kT_e} + C, \quad (11)$$

式中,  $I$ ,  $\lambda$ ,  $A_{ik}$ ,  $g_k$ ,  $E_k$  和  $k$  分别为相应谱线的相对强度、中心波长、跃迁概率、上能级的统计权重、上能级能量和玻尔兹曼常数;  $T_e$  为所求电子温度. 利用 (11) 式, 通过测量一组同一元素不同波长的发射谱线, 可以得到  $\ln(I\lambda/(A_{ik}g_k)) \sim E_k$  的玻尔兹曼斜线, 通过斜线斜率  $(-1/(kT_e))$  即可进一步得到电子温度. 根据实验所得数据, 本文选用 3 条 F 原子的发射谱线 (F I 641.36, 690.98, 712.79 nm) 进行计算, 并利用 NIST 数据库得到 F 原子的相关参数, 延迟时间为 3630 ns 时的玻尔兹曼斜线如图 5 所示.

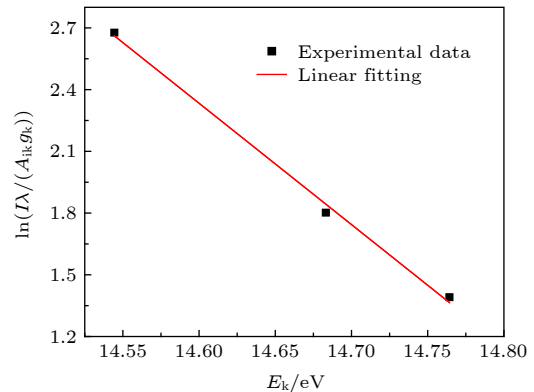


图 5 延迟时间为 3630 ns 时的玻尔兹曼斜线

Fig. 5. Boltzmann plot with a delay time of 3630 ns.

图 6 为利用玻尔兹曼多谱线斜率法求得的等离子体电子温度随时间演化过程. 从图 6 可知, 在 SF<sub>6</sub> 等离子体形成初期, 电子温度最高达 2047 K, 此后在 300 ns 内电子温度迅速下降至 1600 K 左右, 这主要是因为, 在等离子体形成初期, 等离子体快速膨胀, 粒子间相互碰撞加剧, 电子运动过程中的能量损失增大, 导致电子温度迅速下降. 此后电子温度维持在 1500 K 上下, 之后电子温度随着延迟时间逐渐下降, 对电子温度随时间演化过程进行函数拟合, 发现电子温度随延迟时间满足指数衰减.

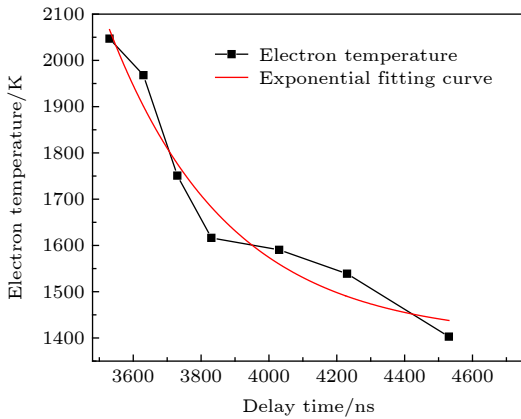


图 6 SF<sub>6</sub> 等离子体电子温度随时间的演化过程  
Fig. 6. Time-resolved electron temperature of SF<sub>6</sub> plasma.

### 3.2.2 等离子体电子密度随时间的演化过程

在局部热平衡条件下, 电子密度可利用谱线的 Stark 展宽求解<sup>[24]</sup>:

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\omega \left( \frac{N_e}{10^{16}} \right), \quad (12)$$

式中  $\Delta\lambda_{1/2}$ ,  $\omega$ ,  $N_e$  分别为谱线半峰全宽、电子碰撞参数和电子密度.

本文选取信背比最高的 F I 685.60 nm 谱线计算电子密度, 由洛伦兹拟合得到 F 原子在 685.60 nm 处的半峰全宽,  $\omega$  取 0.0167 nm. 由 (12) 式得到电子密度随延迟时间的演化曲线, 如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 等离子体电子密度和电子温度的演化过程基本相同, 在 SF<sub>6</sub> 等离子体形成初期, 等离子体密度最高 ( $10.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), 这主要是因为放电开始时大量 SF<sub>6</sub> 会迅速发生分解, 产生大量电子, 此后在 200 ns 内等离子体电子密度迅速下降, 之后电子密度下降趋于平缓, 这主要是因为电子与离子的复合 (如反应式 (5)) 随延迟时间减弱使得电子密度下降趋势减弱. 对电子密度随时间演化过程

进行函数拟合, 发现电子密度随延迟时间也满足指数衰减.

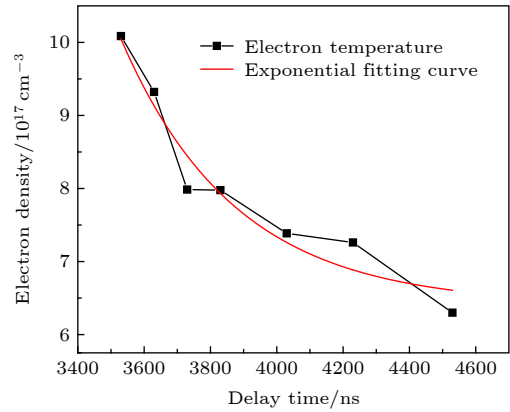


图 7 SF<sub>6</sub> 等离子体电子密度随时间的演化过程  
Fig. 7. Time-resolved electron density of SF<sub>6</sub> plasma.

### 3.2.3 局部热力学平衡分析

判断等离子体是否处于局部热力学平衡可用 Mc Whirter 准则判断<sup>[25,26]</sup>:

$$N_e > 1.6 \times 10^{14} T_e^{1/2} (E_k - E_i)^3 \text{ cm}^{-3}, \quad (13)$$

式中,  $N_e$ ,  $T_e$ ,  $E_k$ ,  $E_i$  分别为电子密度、电子温度、谱线上能级、谱线下能级. 本实验中谱线上下能级差最大为 1.93 eV, 电子温度最大值为 2047 K, 代入 (13) 式得到满足局部热力学平衡的最小电子密度为  $0.52 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 实验所得最小电子密度为  $6.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 显然满足 Mc Whirter 准则, 即 SF<sub>6</sub> 等离子体处于局部热平衡.

## 4 结 论

本文利用飞秒激光引导高压放电技术对 SF<sub>6</sub> 等离子体时间分辨光谱特性进行了研究. 得到了 SF<sub>6</sub> 等离子体在 300—820 nm 波段范围内的光谱, 根据 NIST 原子光谱数据库对光谱中的特征谱线进行了识别和归属, 观测到大量 S 和 F 的发射谱线, 分析认为 SF<sub>6</sub> 在放电情况下发生了分解, 且 S 和 F 原子主要由 SF<sub>6</sub> 气体分子被高能电子碰撞直接或间接产生, S 离子由 S 原子被高能电子撞击产生. 给出了 SF<sub>6</sub> 等离子体的时间分辨光谱, 等离子光谱强度先增大后减弱, 且均由带状光谱和分立光谱叠加而成, 带状光谱主要由轫致辐射和复合辐射共同作用导致的, 复合辐射主要是电子和离子的碰撞以及 SF<sub>6</sub> 分解后的分子和原子的复合导致的,

得到了 S 离子在 409.91 nm 处的荧光寿命为 57 ns, F 原子在 685.60 nm 处的荧光寿命为 341 ns. 给出了 SF<sub>6</sub> 等离子体电子温度和电子密度随时间的演化规律, 二者演化规律基本相同, 且随延迟时间均呈指数衰减. 研究结果对于进一步开展 SF<sub>6</sub> 分解机理和高压设备运行状态在线监测技术研究具有重要意义.

## 参考文献

- [1] Cui Z, Zhang X X, Cheng Z, Li Y, Xiao H 2019 *Spectrosc. Acta Pt. A-Molec. Biomolec. Spectr.* **215** 187
- [2] Zhong L P, Ji S C, Wang F, Sun Q Q, Chen S, Liu J, Hai B, Tang L 2019 *J. Fluor. Chem.* **220** 61
- [3] Tang J, Liu F, Zhang X X, Meng Q H, Zhou J B 2012 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **19** 29
- [4] Tang J, Liu F, Meng Q H, Zhang X X, Tao J G 2012 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **19** 37
- [5] Zeng F P, Tang J, Sun H J, Pan J Y, Yao Q, He J J, Hou X Z 2014 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **21** 1462
- [6] Liu K, Ji S C, Zhong L P, Zhu L P 2016 *International Conference on Condition Monitoring & Diagnosis Xi'an, China, September 25-28, 2016*, p578
- [7] Swarbrick, P 1967 *Br. J. Appl. Phys.* **18** 419
- [8] Gleizes A, Chervy B, Gonzalez J J 1999 *J. Phys. D-Appl. Phys.* **32** 2060
- [9] Girard R, Belhaouari J B, Gonzalez J J, Gleizes A 1999 *J. Phys. D-Appl. Phys.* **32** 2890
- [10] Rat V, André P, Aubreton J, Elchinger M F, Fauchais P, Lefort A 2001 *J. Phys. D-Appl. Phys.* **34** 2191
- [11] Coll I, Casanovas A M, Vial L, Gleizes A, Casanovas J 2000 *J. Phys. D-Appl. Phys.* **33** 221
- [12] Van Brunt R J, Herron J T 1990 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **25** 75
- [13] Van Brunt R J, Herron J T 1994 *Phys. Scr.* **1994** 9
- [14] Gao Q Q, Niu C P, Wang X H, Yang A J, Wu Y, Murphy A B, Rong M Z, Fu X X, Liu J L, Xu Y B 2018 *J. Phys. D-Appl. Phys.* **51** 295202
- [15] Gao Q Q, Wang X H, Yang A J, Niu C P, Rong M Z, Jiao L L, Qing M 2019 *Phys. Plasmas* **26** 033508
- [16] Vacquie S, Gleizes A, Kafroumi H 1985 *J. Phys. D-Appl. Phys.* **18** 2193
- [17] Xu J Y, Wang Q P 1987 *High Voltage Apparatus* **1987** 9 (in Chinese) [徐建源, 王其平 1987 高压电器 **1987** 9]
- [18] Lin X, Li X T, Xu J Y, Shan C W 2016 *Proc. Chin. Soc. Elect. Eng.* **36** 301 (in Chinese) [林莘, 李鑫涛, 徐建源, 单长旺 2016 中国电机工程学报 **36** 301]
- [19] Li X B, Huang X, Zhao Y S, Shan C W, Geng Z X, Li X T, Lin X 2016 *High Voltage Apparatus* **52** 55 (in Chinese) [李学斌, 黄旭, 赵义松, 单长旺, 庚振新, 李鑫涛, 林莘 2016 高压电器 **52** 55]
- [20] Geng Z X, Shi Y, Zhong J Y, Lin X, Su Z X, Zhang Y P, Xu J Y 2017 *High Voltage Apparatus* **53** 18 (in Chinese) [庚振新, 石岩, 钟建英, 林莘, 苏镇西, 张友鹏, 徐建源 2017 高压电器 **53** 18]
- [21] Liu Y F, Ding Y J, Peng Z M, Huang Y, Du Y J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 205205 (in Chinese) [刘玉峰, 丁艳军, 彭志敏, 黄宇, 杜艳君 2014 物理学报 **63** 205205]
- [22] Eschlböck-Fuchs S, Kolmhofer P J, Bodea M A, Hechenberger J G, Huber N, Rössler R, Pedarniga J D 2015 *Spectrosc. Acta Pt. B-Atom. Spectr.* **109** 31
- [23] Wang F M, Lin X, Xu J Y 2014 *High Voltage Engineering* **40** 3073 (in Chinese) [王飞鸣, 林莘, 徐建源 2014 高电压技术 **40** 3073]
- [24] Liu J H, Lu J Z, Lei J J, Gao X, Lin J Q 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 057401 (in Chinese) [刘家合, 鲁佳哲, 雷俊杰, 高勋, 林景全 2020 物理学报 **69** 057401]
- [25] Dong L F, Ran J X, Mao Z G 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2167 (in Chinese) [董丽芳, 冉俊霞, 毛志国 2005 物理学报 **54** 2167]
- [26] Pagano, C, Hafeez, S, Lunney, J G 2009 *J. Phys. D-Appl. Phys.* **42** 155205

# Time-resolved spectral characteristics of SF<sub>6</sub> plasma under femtosecond laser-guided high-voltage discharge\*

Zhang Yun-Gang<sup>1)†</sup> Liu Huang-Tao<sup>1)</sup> Gao Qiang<sup>2)</sup> Zhu Zhi-Feng<sup>2)</sup>  
Li Bo<sup>2)</sup> Wang Yong-Da<sup>1)</sup>

1) (*School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

2) (*State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

( Received 30 April 2020; revised manuscript received 25 May 2020 )

## Abstract

SF<sub>6</sub> is widely used in gas insulated switchgear due to its excellent insulating and arcing performance. SF<sub>6</sub> arc plasma has been extensively studied, but time-resolved spectral characteristics of SF<sub>6</sub> arc plasma have not been reported. In this paper, the optical filament generated from focused femtosecond laser is used to guide the high-voltage discharge for generating SF<sub>6</sub> plasma in SF<sub>6</sub> environment. The SF<sub>6</sub> plasma spectrum is obtained in a wavelength range of 300–820 nm, and the identification and attribution of the spectral lines are investigated. The S and F lines are mainly in the 300–550 nm band and 600–800 nm band, respectively. The analysis shows that the S and F atoms are mainly directly or indirectly generated by the collision between SF<sub>6</sub> and high-energy electrons during the SF<sub>6</sub> decomposition caused by discharge. The S ions are generated by the collision of S atoms with high-energy electrons. The time-resolved spectrum of the SF<sub>6</sub> plasma superimposed by the continuous spectrum and the line spectrum is given, and its intensity increases and then decreases. The continuous spectrum is mainly generated by the combined effect of bremsstrahlung and recombination radiation. The recombination radiation is mainly generated by the collision of electron with ions and the recombination between molecular and atoms after SF<sub>6</sub> decomposition. The fluorescence lifetime of S ion at 409.91 nm is 57 ns, and the fluorescence lifetime of F atom at 685.60 nm is 341 ns. The evolution law of electron temperature and density with time are given. The electron temperature reaches 2047 K in the early stage of plasma formation. After that, the electron temperature quickly falls to about 1600 K within 300 ns due to the rapid expansion of the plasma and the increase in energy loss during electron movement. At the beginning of discharge, a large number of electrons are generated due to the rapid decomposition of SF<sub>6</sub>, and the electron density is highest ( $10.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ). After that, the electron density drops rapidly within 200 ns because the recombination between electrons and ions decreases with delay time. Finally, it is proved that the SF<sub>6</sub> plasma is in local thermal equilibrium based on the Mc Whirter criterion. The results are of great significance for studying the decomposition mechanism of SF<sub>6</sub> and the on-line monitoring technique of high-voltage equipment.

**Keywords:** femtosecond laser-guided high-voltage discharge, time-resolved spectroscopy, electron temperature and density, SF<sub>6</sub>

**PACS:** 52.80.-s, 33.20.-t, 52.55.Dy, 52.25.Kn

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200636

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51806149, 61308065) and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. E2015203014).

† Corresponding author. E-mail: zhangyg@ysu.edu.cn