

电晕放电紫外光谱仿真与测量

庾金涛¹, 李清灵¹, 房陈岩¹

1. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 中国科学院上海技术物理研究所, 上海市玉田路500号, 200083

引言: 电力设备在不正常工作时, 大多会产生电弧电晕, 通过检测电晕电弧等目标, 就可以获知电力系统设备的损害程度。然而, 目前并没有对真实的电弧电晕目标进行非光子计数方式的定量化研究。本文作者研制了一套紫外波段的面阵成像探测系统, 结合 COMSOL Multiphysics® 仿真软件, 对实验室人工制造的高电压电弧电晕目标进行了相关的分析与实验研究。

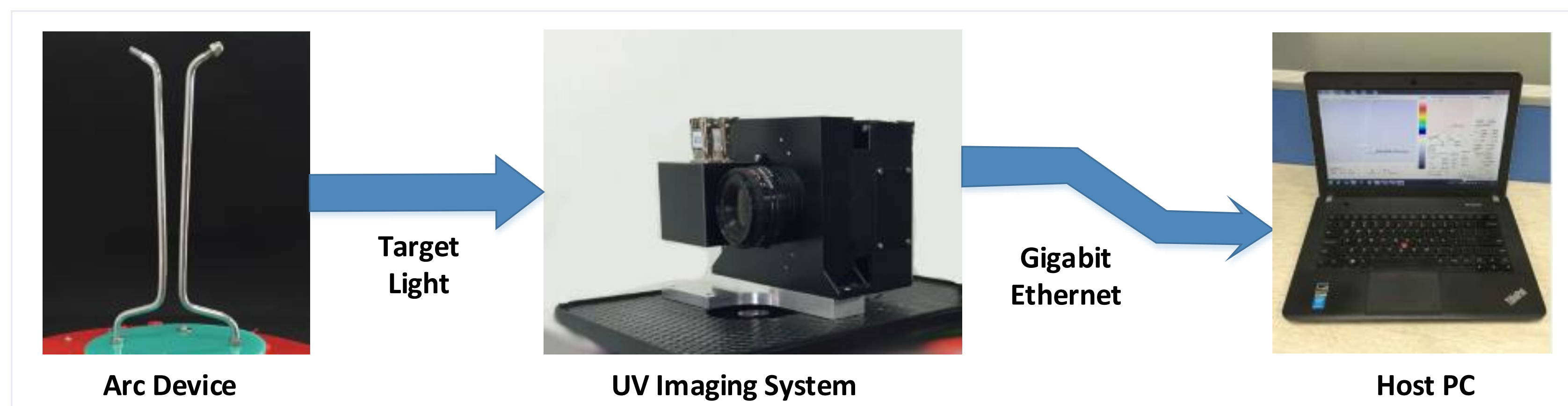


图 1. 成像实验系统示意图

计算方法: 利用等离子体物理场接口的 DC 放电接口, 对实验所用天梯仪器的放电行为进行混合建模。其中, 大气压下的流体力学模型:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e + \nabla \cdot [-n_e (\mu_{en} \mathbf{E}) - \mathbf{D}_{en} \nabla n_e] + \mathbf{E} \Gamma_e = R_e$$

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e + \nabla \cdot [-n_e (\mu_e \mathbf{E}) - \mathbf{D}_e \nabla n_e] = R_e$$

以及, 粒子动力学 Boltzmann 模型:

$$C[f] = \frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla f - \frac{e}{m} \mathbf{E} \cdot \nabla_v f$$

通过混合模型及空气粒子参数, 对电晕放电辉光主要贡献的成分 N₂⁺ 进行密度分布有限元分析计算, 结果换算成光强, 得到简化的光强分布。将棒棒三维模型简化为二维模型, 尺寸与实验装置匹配 (见图2)。

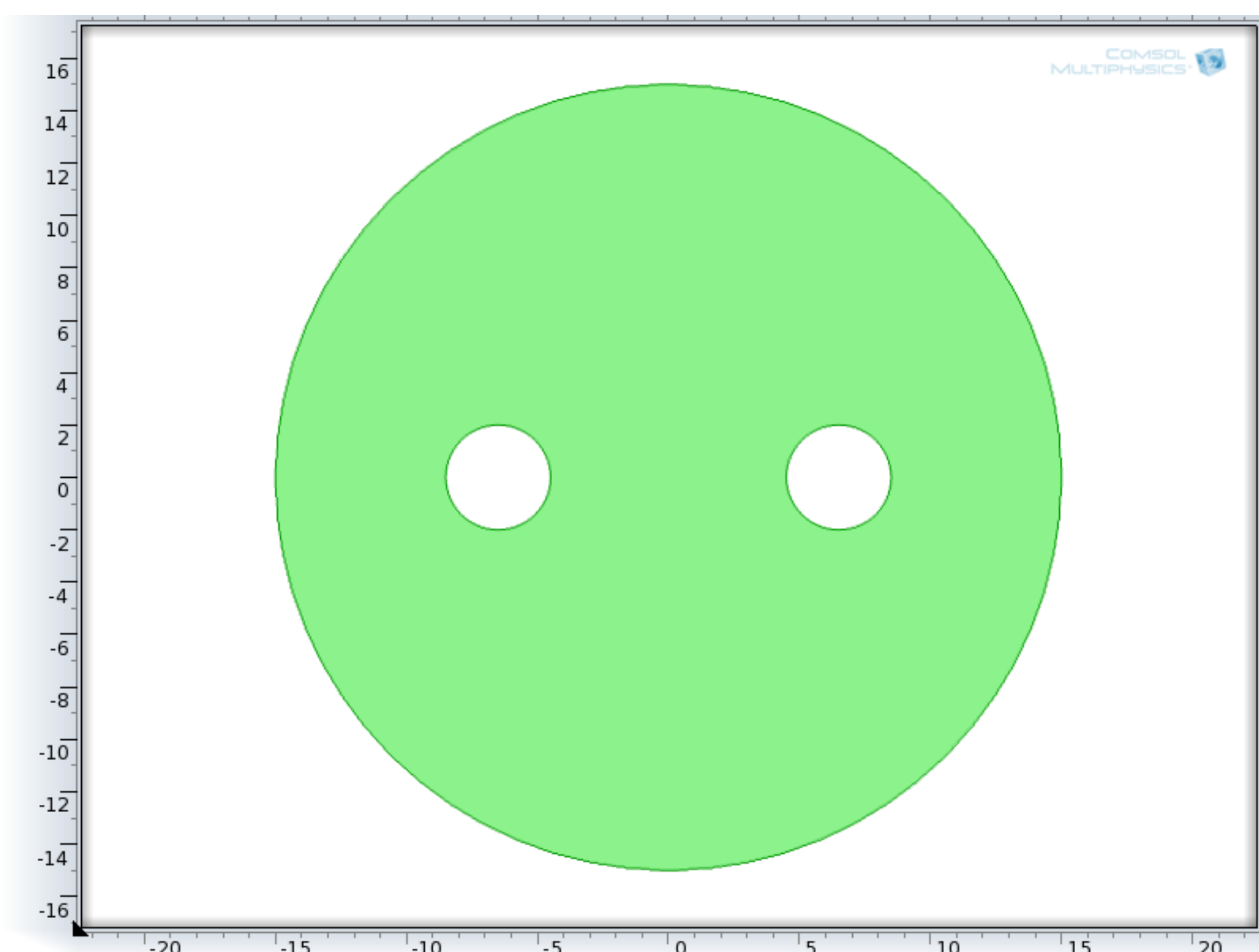


图 2. 模型尺寸示意图

结果: 获得装置中等离子体电子温度分布 (图4) N₂⁺ 密度分布 (图5)。使用自制的一套紫外面阵成像系统, 对由实验室高压设备在空气中产生的电弧电晕目标开展了紫外成像实验, 得到电弧在 240-280nm 波段的辐亮度分布, 通过反演计算, 与成像系统拍摄的放电起始状态的紫外图像结果 (图6) 相符。

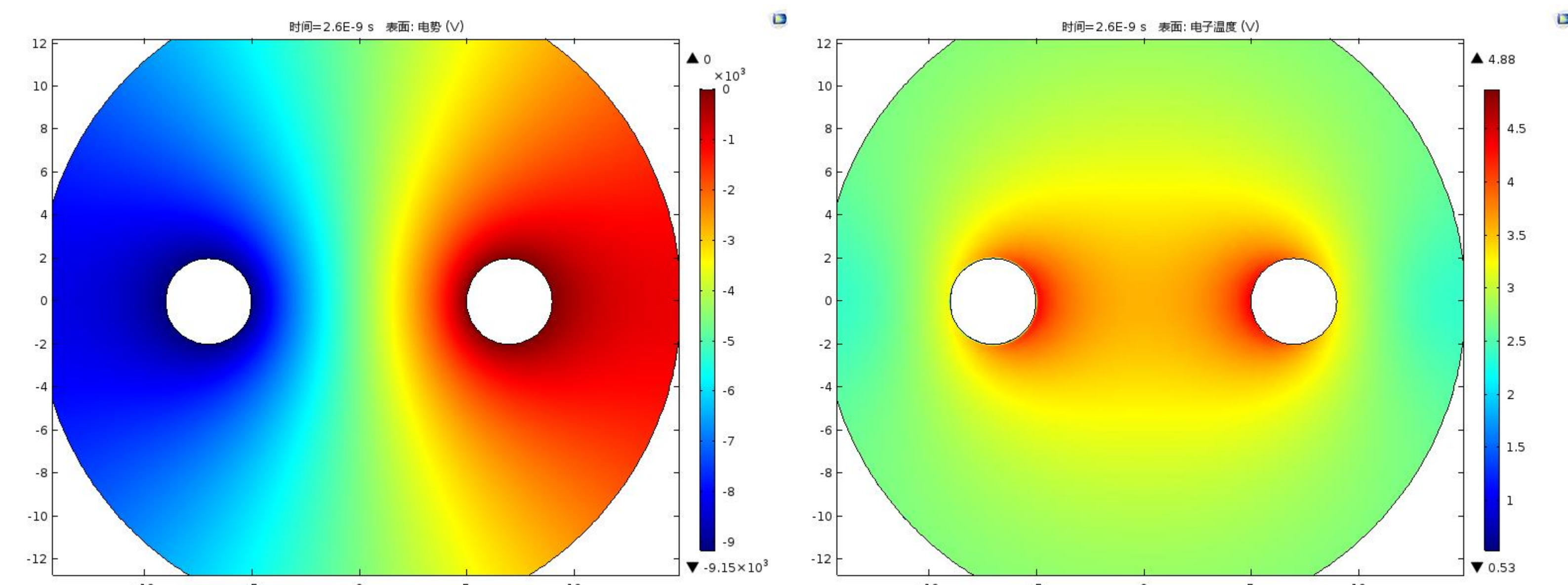


图 3. 棒棒模型电势分布

图 4. 电子温度分布

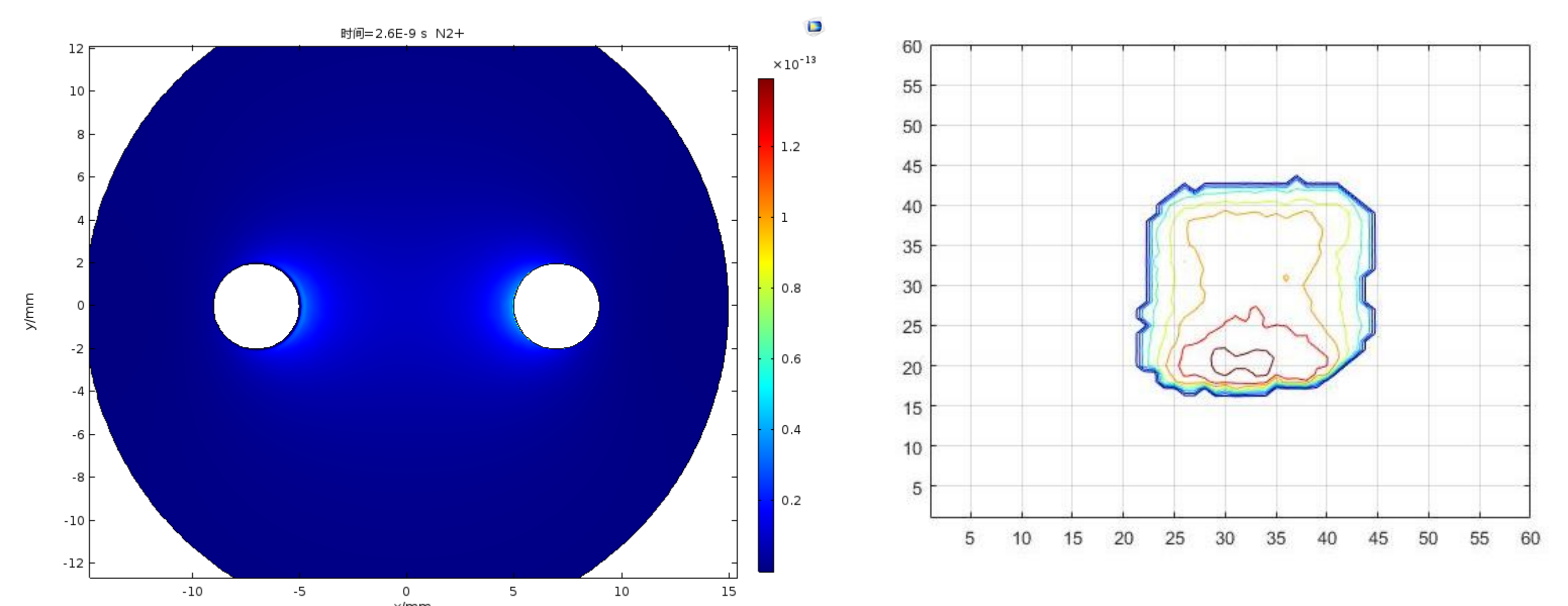


图 5. N₂⁺ 密度分布

图 6. 实测电弧能量等高线图

展望: 开展进一步的工作, 进行室外条件下高电压电弧电晕紫外辐射强度特性的实验, 掌握更多的图像特征数据, 优化更加符合实际的物理模型, 进行定量化反演, 还可进一步研究光学传递模型, 得到发光图像理论结果, 为实验提供理论支撑。

参考文献:

- [1] ZHANG Ming-chao, et al. Opto-Electronic Engineering (光电工程), 2010, 37(4): 135-140.
- [2] ZHOU Shi-chun. 高级红外光电工程导论. 科学出版社, 2014. 8, 60.
- [3] Fang Chen-yan. 空气高压放电紫外特性及多光谱成像技术研究. 北京: 中国科学院大学, 2016, 85-97.