

基于COMSOL软件的亚大气压针-板放电数值模拟

王宇天¹, 李益文^{1,2}, 张百灵¹, 庄重¹

1. 等离子体动力学重点实验室, 空军工程大学, 陕西, 西安

2. 燃烧、热结构与内流场重点实验室, 西北工业大学, 陕西, 西安

简介: 随着脉冲功率技术的不断进步与发展, 纳秒脉冲放电等离子体研究取得了很好的发展。实验方面已取得重大突破。为了研究纳秒脉冲针-板放电过程电子分布等微观过程, 建立了二维对称结构计算模型, 开展数值模拟研究, 图1为计算得到理想高斯脉冲下电压电流特性曲线。

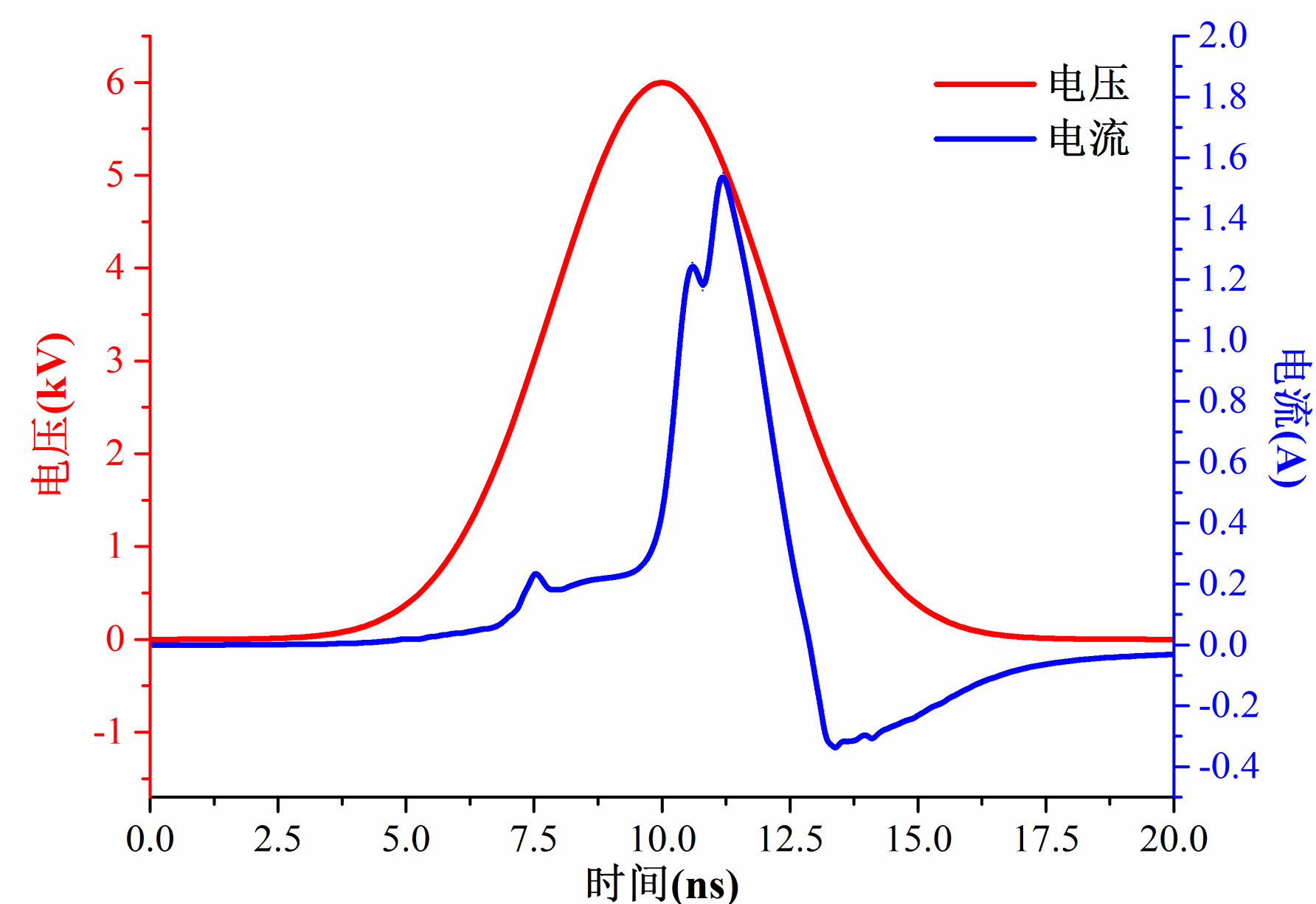


图 1. 高斯脉冲下电压电流特性曲线

计算方法: 使用等离子体模块中的DC放电物理场接口, 求解一对描述电子密度和电子能密度的漂移-扩散方程。

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e \quad \frac{\partial n_\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_\varepsilon + \mathbf{E} \cdot \Gamma_e = R_\varepsilon$$

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot \mathbf{E})n_e - \nabla(D_e n_e) \quad \Gamma_\varepsilon = -(\mu_\varepsilon \cdot \mathbf{E})n_\varepsilon - \nabla(D_\varepsilon n_\varepsilon)$$

方程中的源项由等离子体化学反应速率决定。

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_e \quad R_\varepsilon = \sum_{j=1}^P x_j k_j N_n n_e \Delta \varepsilon_j$$

模型采用二维轴对称结构, 如图2所示。定义电极材料为铜, 其中针位于板电极的正上方, 电极头部曲率半径1mm, 两电极间距10mm, 板电极宽10mm, 电极间区域采用空气进行填充, 并设定计算边界。计算时将高压端连接针电极, 将板电极接地。高压端输出波形为高斯脉冲分布函数, 峰值为6kV。

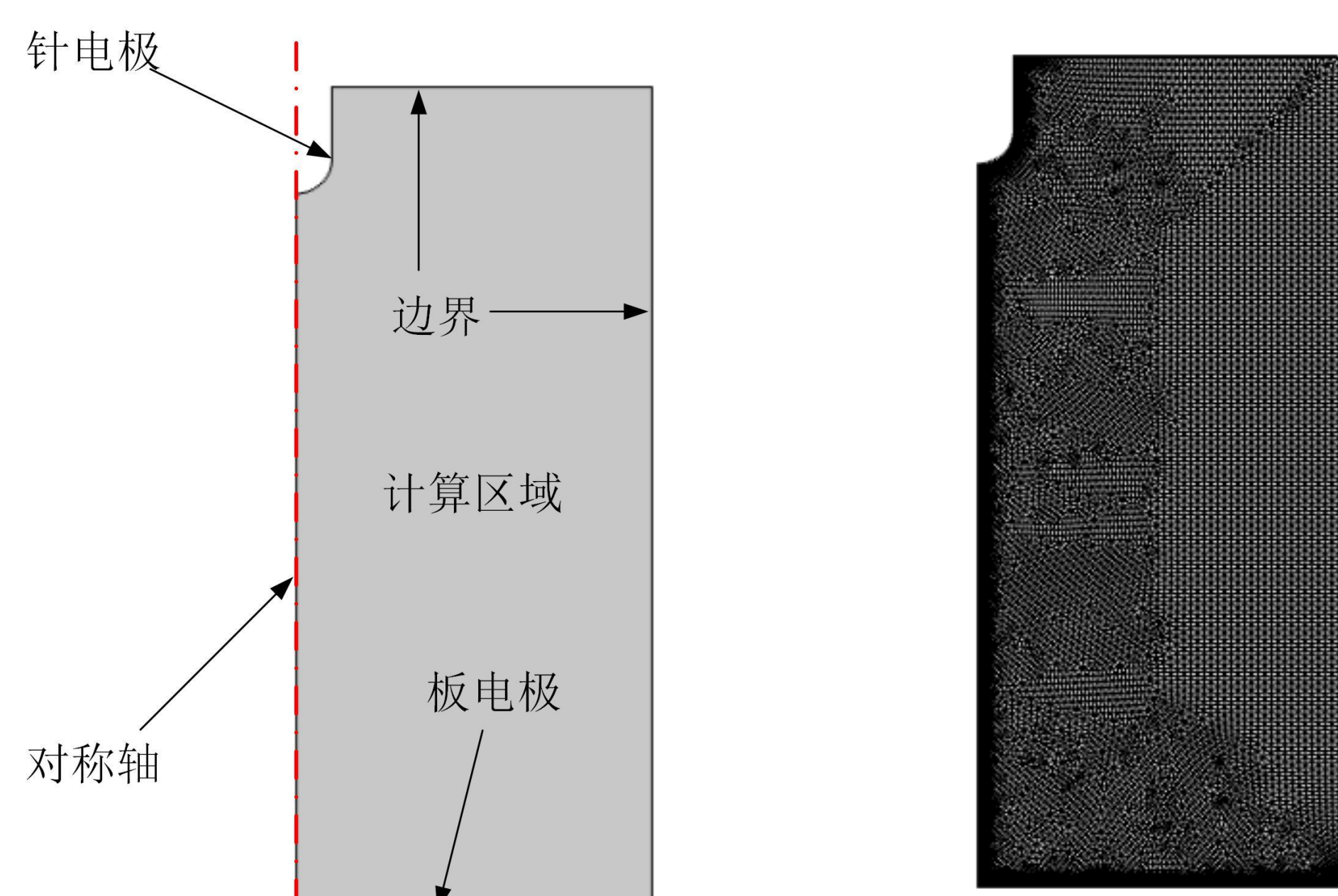


图 2. 计算模型与求解网格

结果:

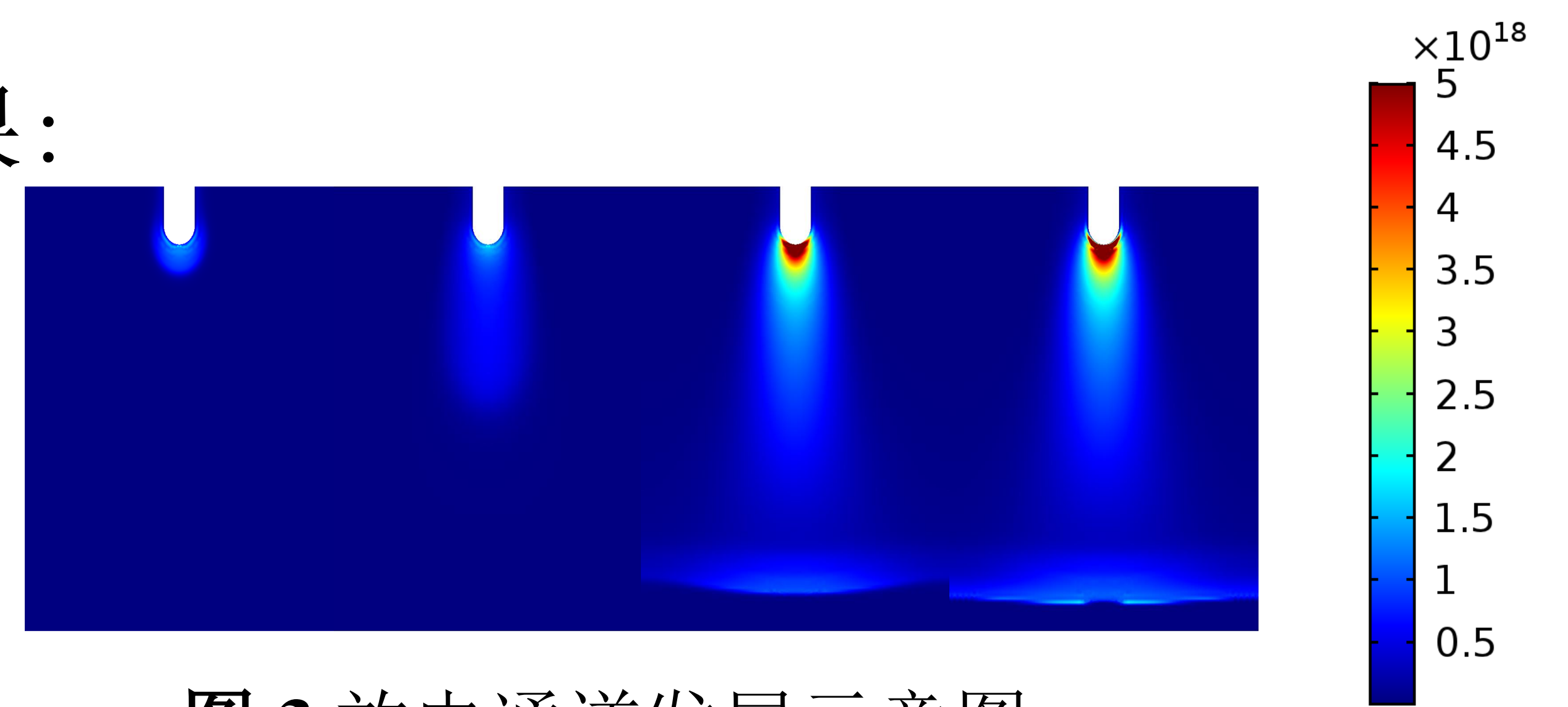


图 3. 放电通道发展示意图

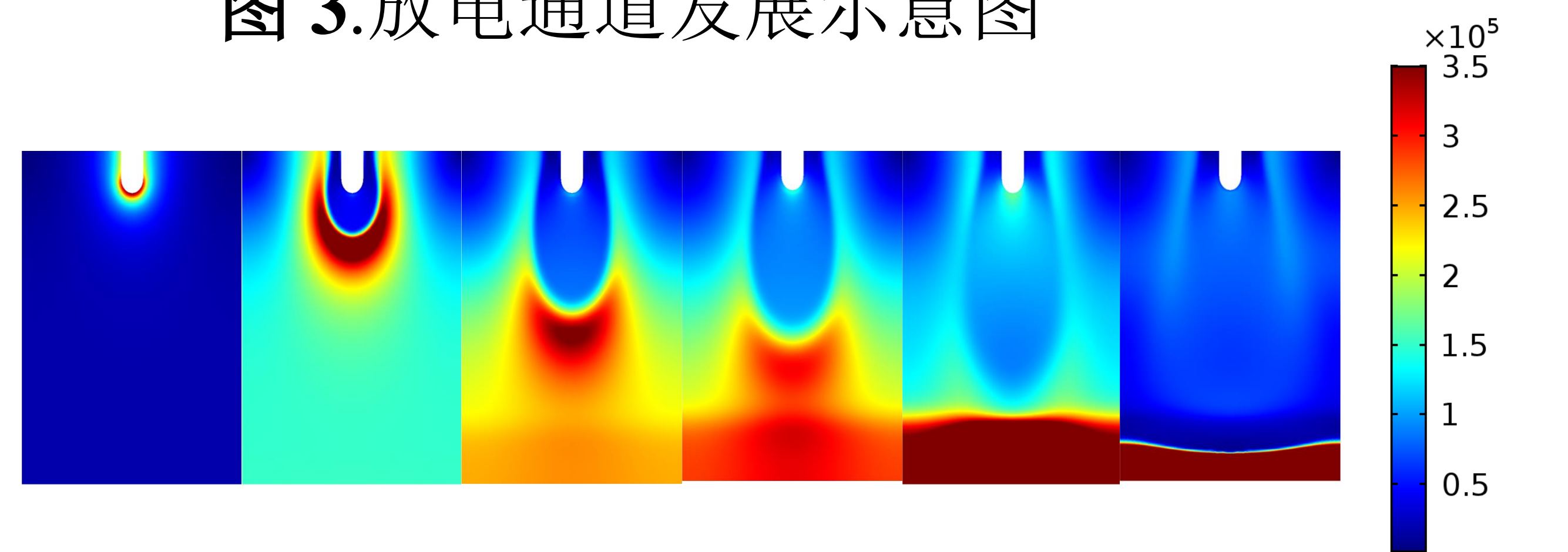


图 4. 电场强度随时间变化示意图

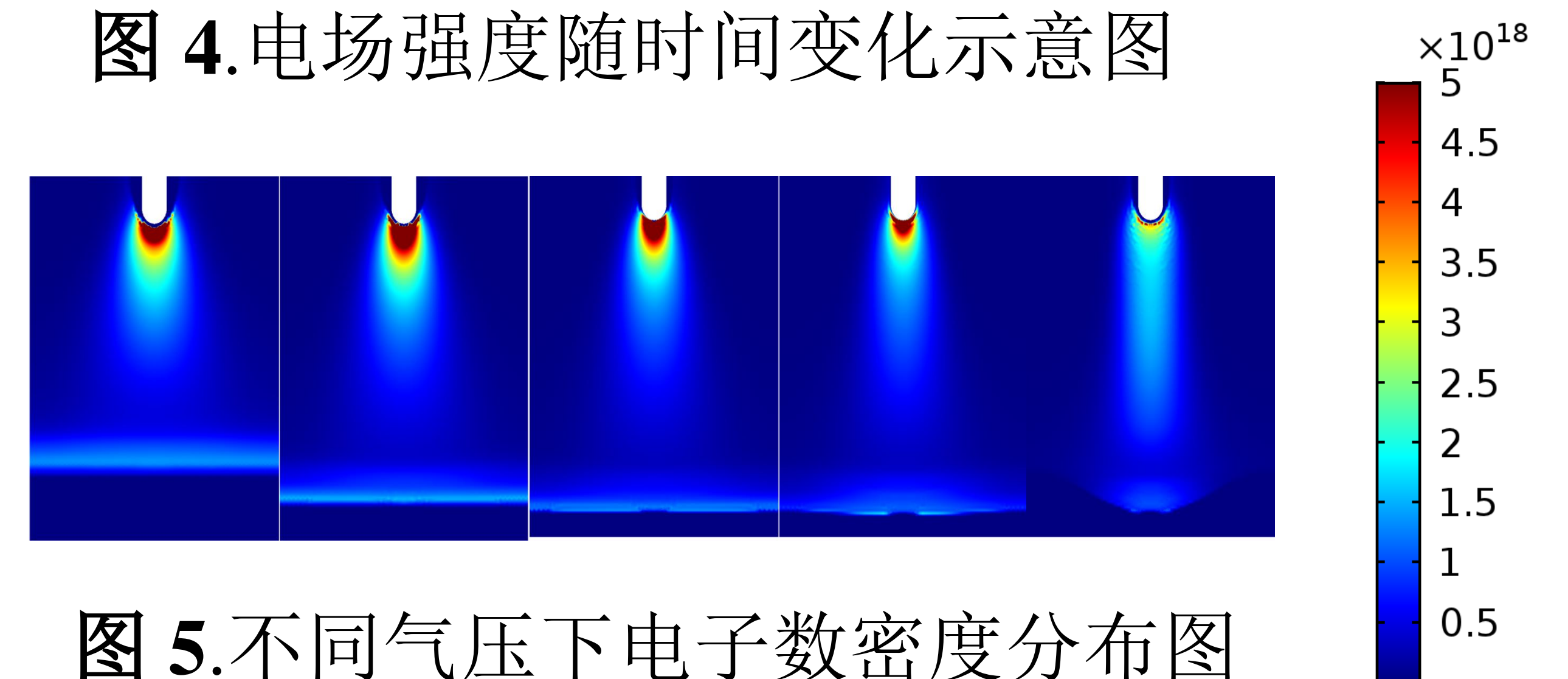


图 5. 不同气压下电子数密度分布图

结论: 放电通道由针尖处形成向阴极发展, 在放电过程中, 电子数密度先随着电压升高而逐渐增大, 达到击穿电压时开始急剧增加。在电压达到峰值后, 随着电压的降低, 电子数密度开始逐渐下降, 但是开始下降的时间点滞后于电压峰值点, 并且电子数下降的速度小于电压降低的速度;

电场强度和电子温度先在针电极处达到一个极大值, 其后随着时间的推移逐渐减小, 最大值始终位于轴线处, 发展到阴极时, 阴极表面电场强度和电子温度再次增大;

气压的升高使得阴极鞘层变薄, 放电通道向中心轴线收缩, 放电通道变窄, 阴极板上的辉光也会向中心收缩。

参考文献:

- Poggie J, Numerical simulation of nanosecond-pulse electrical discharges, Plasma Sources Science and Technology, 22, 015001(2013)
- 徐双艳, 二维对称结构纳秒脉冲介质阻挡放电数值模拟, 高电压技术, 41, 2100-2107(2015)
- 廖瑞金, 棒板电极直流负电晕放电脉冲过程中的电子特性研究, 电工技术学报, 30, 319-329(2015)