



空间电荷极性效应的 EFISH诊断研究

指导教师：蒲以康 教授

汇报人：郭一鸣

目录

Content

01

研究目的

02

研究方法

03

结果与讨论





研究目的

Objective



极性效应介绍

电极曲率很大的放电结构间（如针/线板电极），击穿场强阈值与电源极性相关。

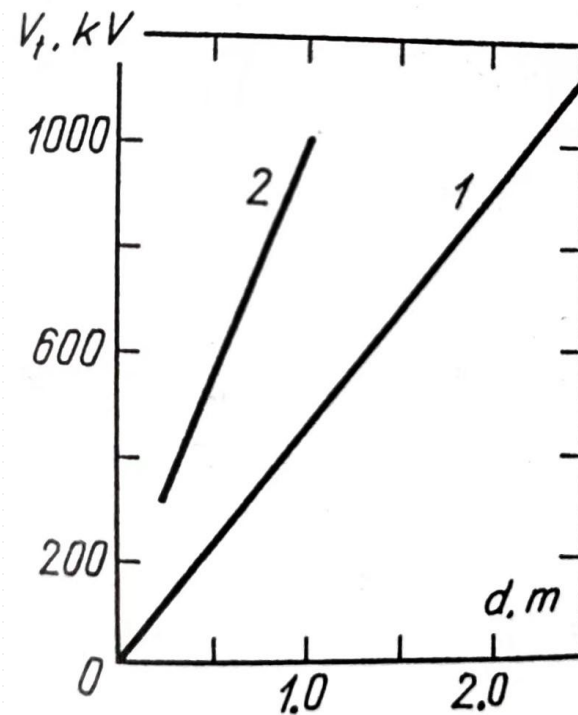


Fig.1 棒板电极间的击穿电压，图中1为正极性棒电极，2为负极性棒电极^[1]

[1] Raizer Y P .Gas Discharge Physics[M]. 1991.

极性效应介绍

Mankowski 等人研究了高气压下 (150MPa) , 纳秒脉冲放电过程中air、N₂、H₂、SF₆、变压器油中的击穿电压, 发现所研究条件下, 极性效应普遍存在。

Limitations: 电场强度使用电极间电压计算获取, 而非实际测量。

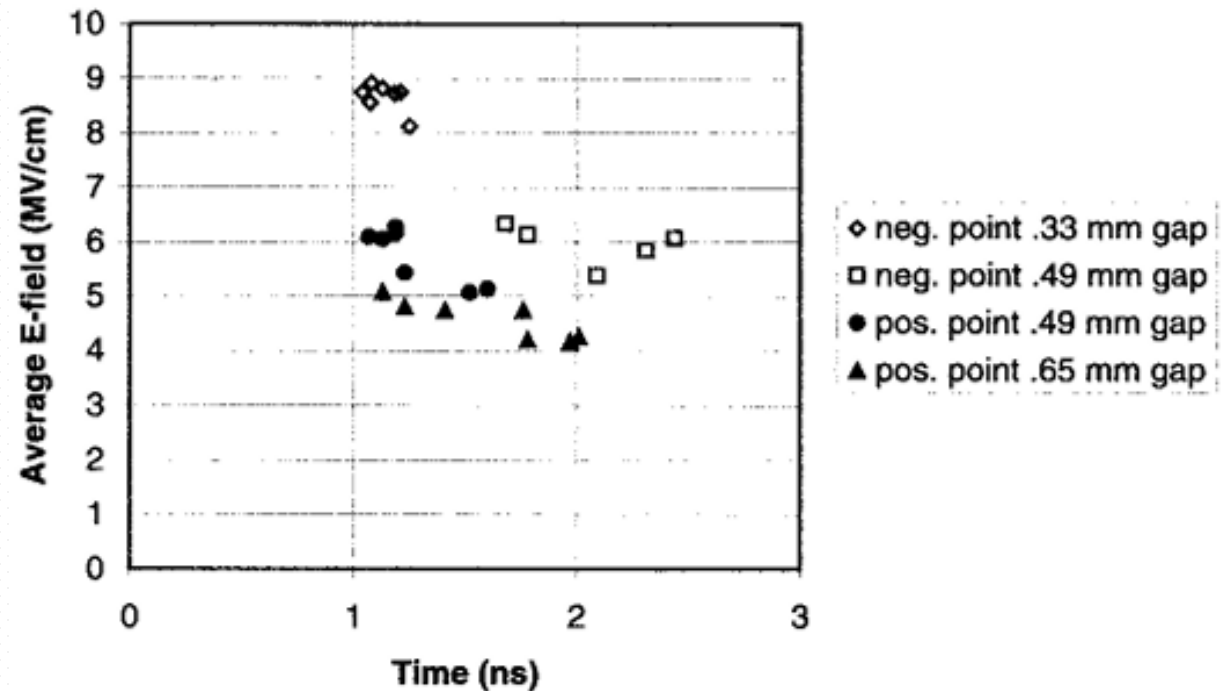


Fig.2 针板电极间冲入变压器油, 负极性击穿电压高于正极性击穿电压^[2]

[2] Mankowski J , Dickens J , Kristiansen M .High voltage subnanosecond breakdown[J].IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(3):874-881.DOI:10.1109/27.700858.

极性效应介绍

击穿与否直接与电场强度直接相关，前人研究中没有对放电间隙间的电场做直接研究

李陇杰等人研究了冲有 N_2 、 SF_6 气体的电晕稳定开关(corona-stabilized switch)中的击穿现象，观测到了击穿电压随 SF_6 含量而变化的极性效应。

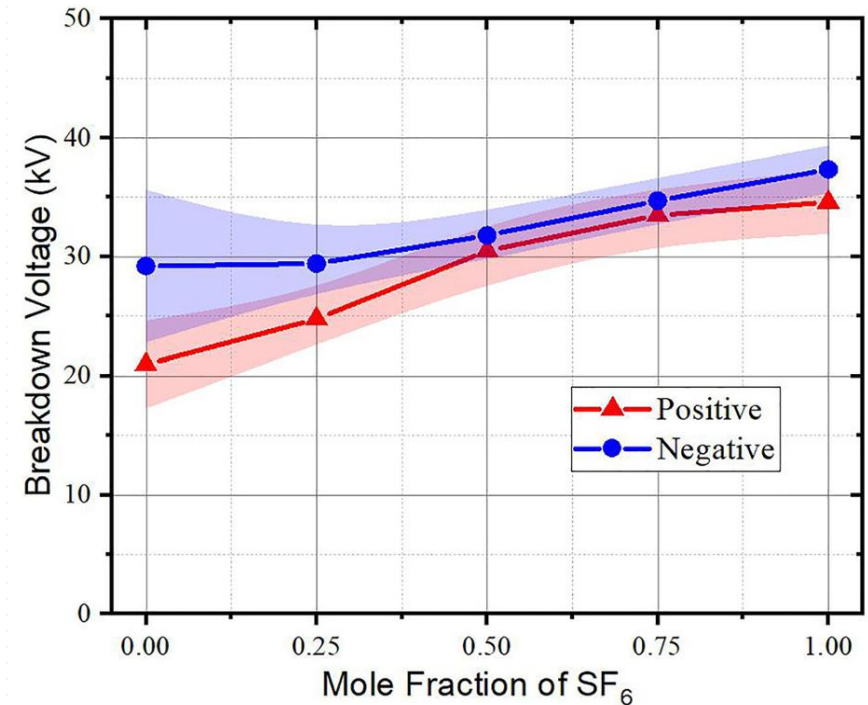


Fig.3 冲有 SF_6 的电晕稳定开关内，击穿电压随 SF_6 含量而变化的极性效应^[3]

[3] Li L, Li J, Zhao Z. Effect of switch parameters and polarity on the repetitive performance of a corona-stabilized switch viewed from behavior of space charge [J]. Physics of Plasmas, 2020, 27(4).

常见非侵入式电场测量方法

- 斯塔克分裂法^[4]:
 - 原理：利用谱线斯塔克展宽测量电场；
 - 局限：需要有发射谱线、适用于低气压放电。
- 谱线比法^[5]:
 - 原理： $\frac{E}{n} \sim R$, R 为选定的合适谱线比；
 - 局限：需要有发射谱线、谱线选择对结果影响大。
- 四波混频法^[6]:
 - 原理：两个激光产生的强共线泵浦和斯托克斯场产生相同的相干振荡偏振，产生一束红外激光，该激光强度与外场强度平方成正比；
 - 局限：需两束激光协同工作，实验系统复杂。

[4] Doughty D K, Lawler J E. Spatially resolved electric field measurements in the cathode fall using optogalvanic detection of Rydberg atoms[J]. Applied Physics Letters, 1984, 45(6): 611-613.

[5] Paris P, Aints M, Valk F, et al. Intensity ratio of spectral bands of nitrogen as a measure of electric field strength in plasmas[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(21): 3894.

[6] Evsin O A, Kupryanova E B, Ochkin V N, et al. Determination of the intensities of electric fields in gases and plasmas by the CARS method[J]. Quantum Electronics, 1995, 25(3): 278.

电场诱导二次谐波信号 (EFISH) 法介绍

外电场 $E_j^{(F)}$ 作用下，分子产生偶极矩。激光强电场与介质偶极矩间三阶非线性效应导致二次谐波的产生。产生的二次谐波强度与外电场关系如下：

$$I_{2\omega} \sim N^2 \left(N \chi^{(3)} E_j^{(F)} \right)^2 I_{\omega}^2 L^2 \left(\frac{\sin(\Delta k L / 2)}{\Delta k L / 2} \right)^2 \quad [7]$$

即二次谐波强度与外场强度平方成正比。

优势：适用于大多数分子气体、只需单台激光器

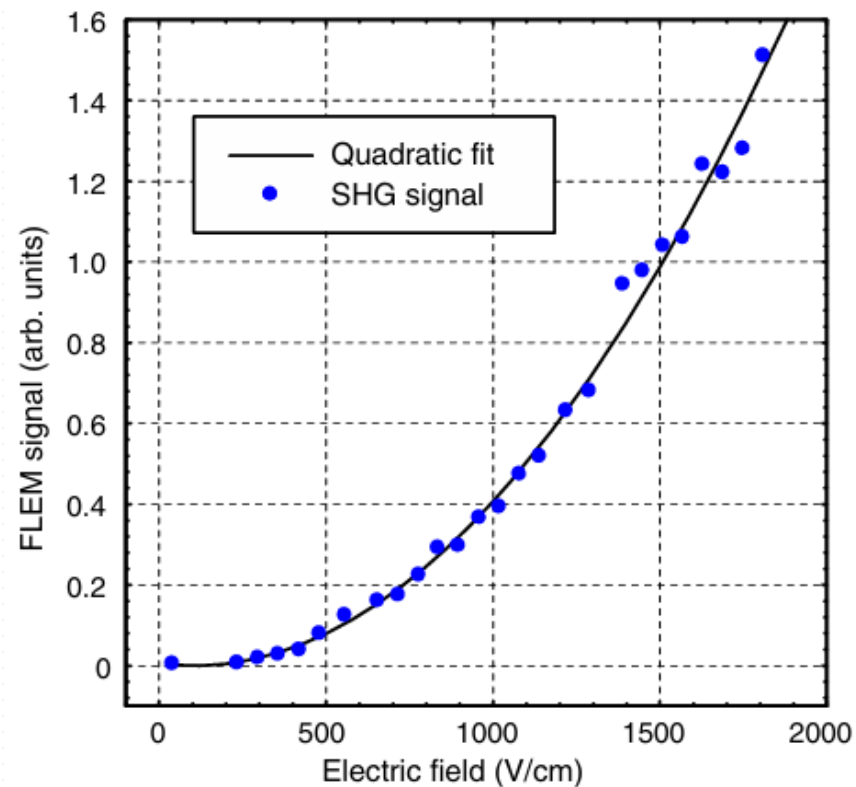


Fig.4 EFISH典型电场-二次谐波信号强度曲线^[8]

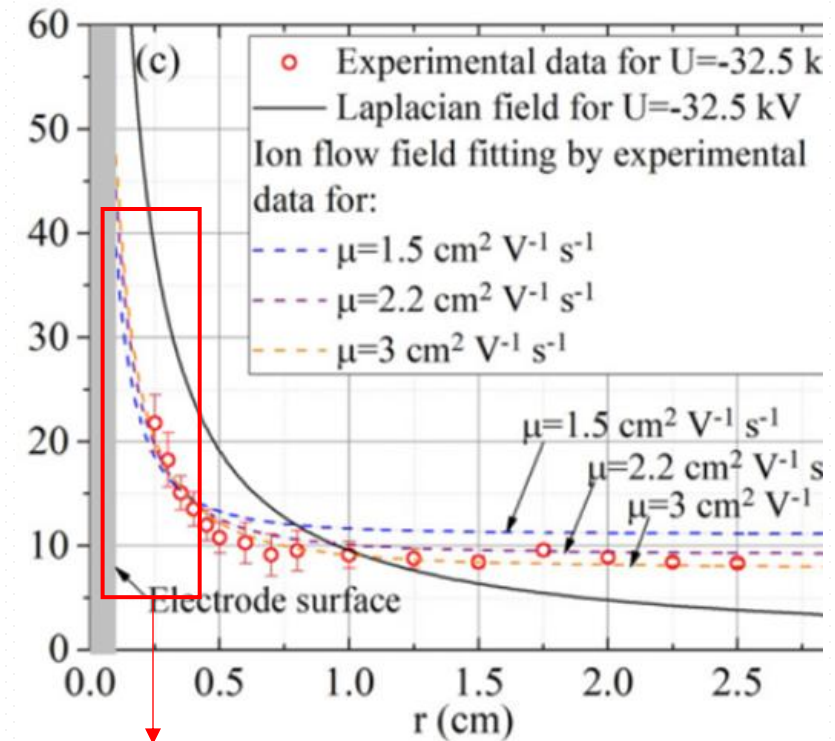
[7] Dogariu A, Goldberg B M, O'Byrne S, et al. Species-Independent Femtosecond Localized Electric Field Measurement [J]. Physical Review Applied, 2017, 7(2).

[8] DOGARIU A, GOLDBERG B M, O'BYRNE S, et al. Species-independent femtosecond localized electric field measurement[J]. Physical Review Applied, 2017, 7(2): 024024.

现有问题

应用种电晕放电尺度很小 ($\sim 1\text{mm}$)，如SF6绝缘开关等放电结构，现有EFISH方法无法实现放电结构内部的电场空间分辨测量。

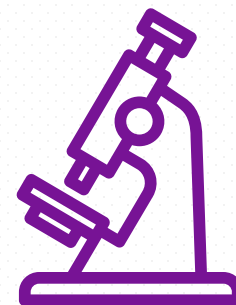
有必要开发一种增强空间分辨能力的EFISH诊断系统。



空间分辨率 $\sim 1\text{mm}$ ，未能测量到靠近电极 0.1mm 内的电场空间分布

Fig.5 较低空间分辨率EFISH典型实验结果曲线^[9]

[9] Cui, Y., Zhuang, C., & Zeng, R. (2020, September). Electric field measurements in plasma based on electric field induced second harmonic generation (E-FISH) with nanosecond/picosecond laser. In *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)* (pp. 1-5). IEEE.



研究方法

Method



实验系统

- 光学系统：
 - 基频：1064nm;
 - 二次谐波：532nm;
 - 光电二极管：收集基频信号;
 - 光电倍增管：收集二次谐波信号。
- 电路系统：
 - 高压直流源：-10~10kV;
 - 放电结构：线板结构，线电极接高压;

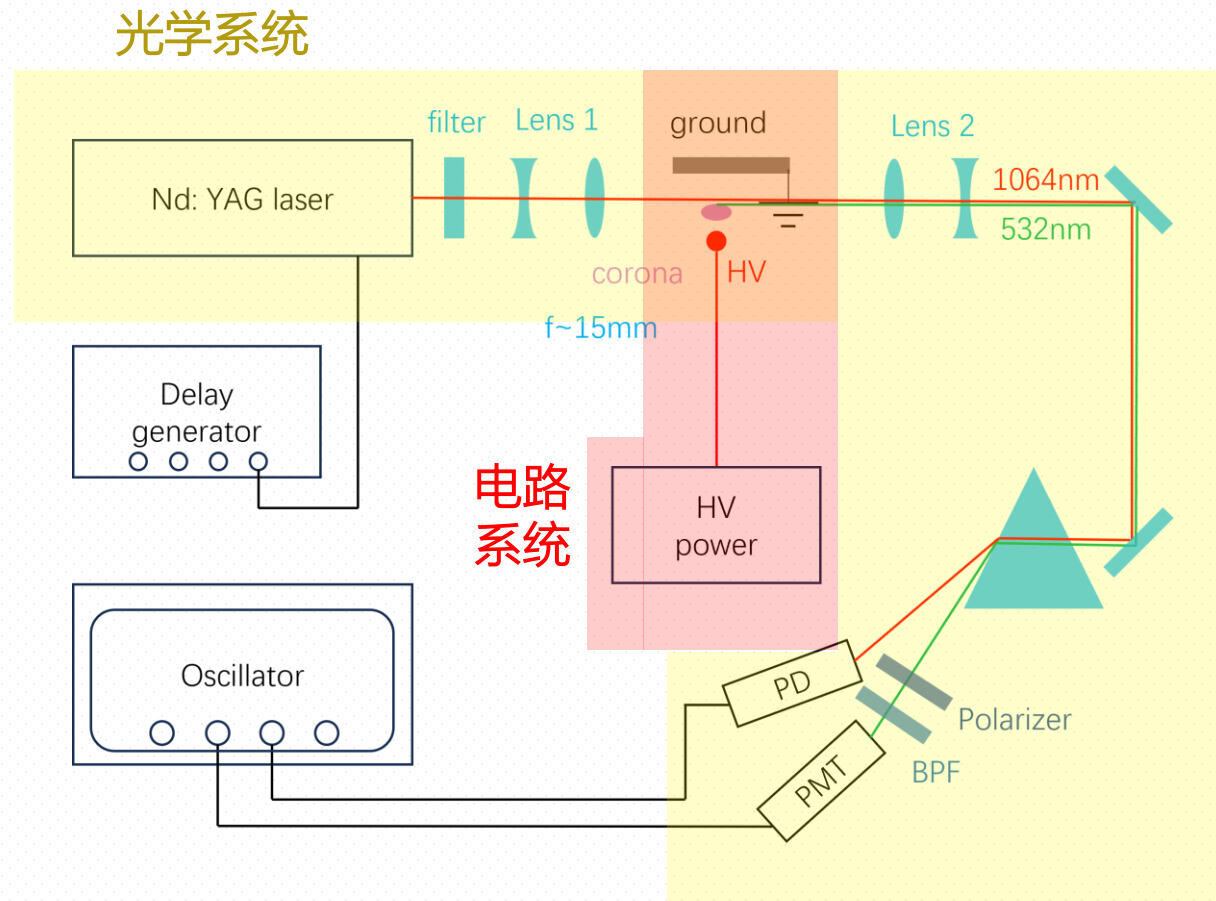


Fig.6 EFISH实验系统示意图

放电结构

- 放电结构：线板结构，线电极接高压；
- 线电极尺寸：长度2cm，直径50 μm ；
- 位移台精度：10 μm ；
- 实际试验中移动放电结构而非激光。

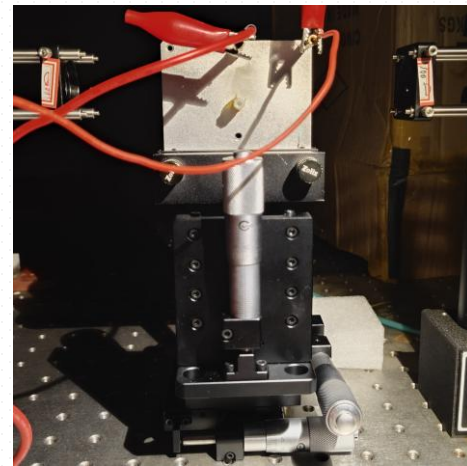
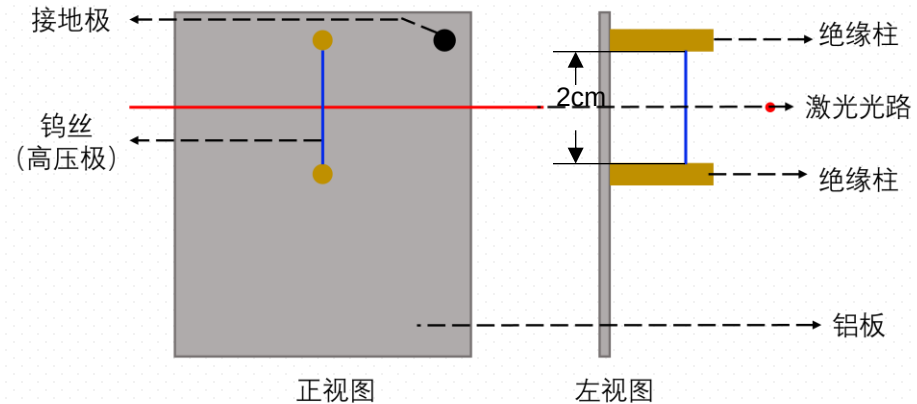


Fig.7 (a)放电结构示意图; (b)放电结构与位移台

空间分辨率提升

EFISH实验中，激光与等离子体的作用范围可以视为激光的束腰直径和瑞利长度内。

提高空间分辨率关键在于减小激光束腰直径 w_0 与瑞利长度 z_R 。

$$w_1^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda f}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]$$

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$$

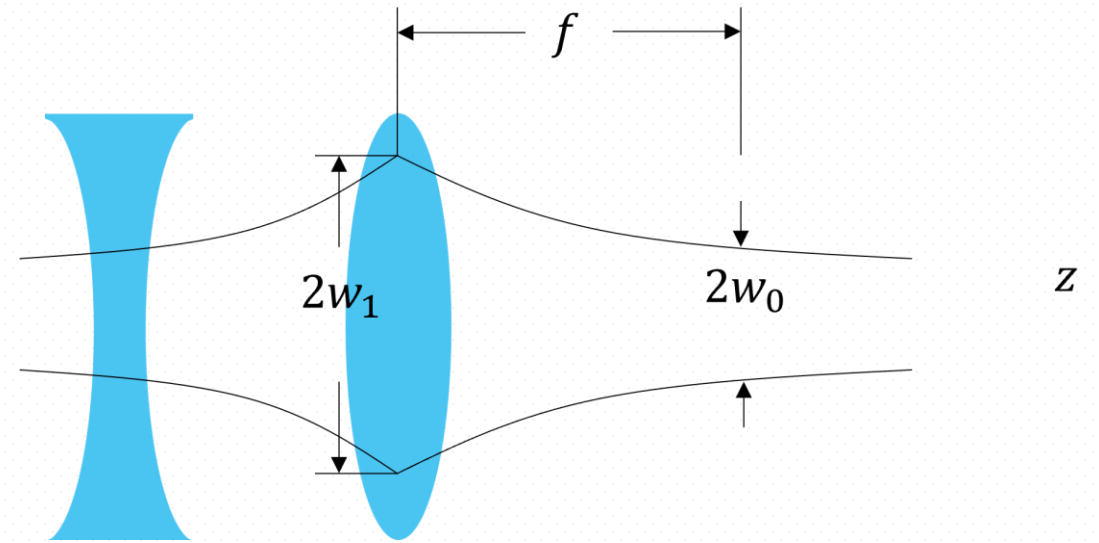


Fig.8 激光束腰示意图

空间分辨率提升

	$w_1(\text{mm})$	$f(\text{mm})$	$w_0(\mu\text{m})$	$z_R(\mu\text{m})$
不扩束, 长聚焦	3	50	56.4	9410
不扩束, 短聚焦	3	15	16.9	847
扩束3倍, 短聚焦	9	15	5.64	94.1
扩束5倍, 短聚焦	15	15	3.39	33.9

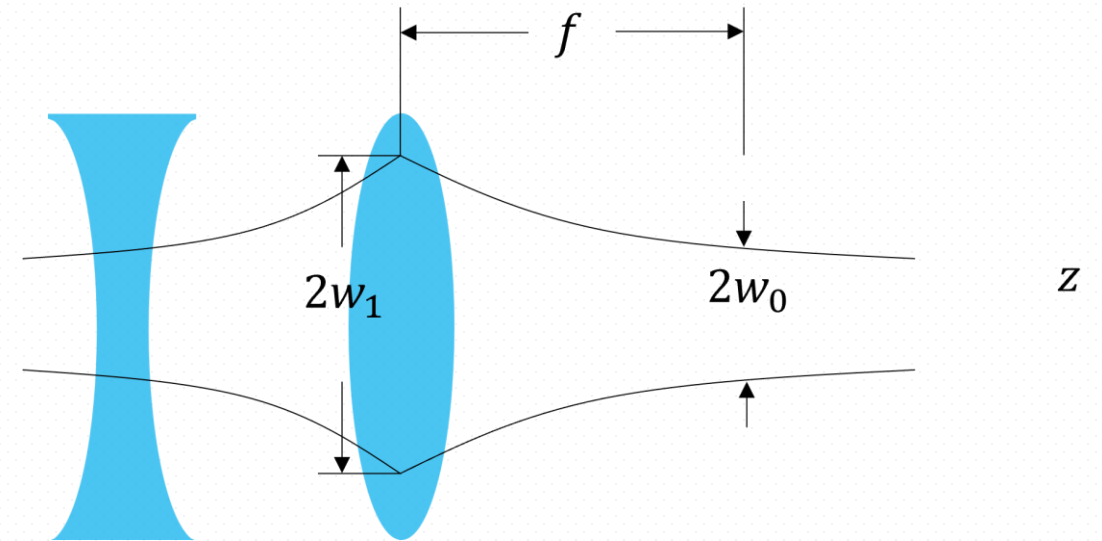
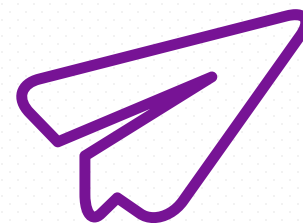


Fig.8 激光束腰示意图

先扩束, 后聚焦的光学系统, 有效提升空间分辨率。
 $z_R = 33.9\mu\text{m}$, 理论上可实现线板/针板电极 ($\sim 1\text{mm}$) 中的电场空间分辨测量。



结果与讨论

Results and conclusions



线板放电结构 电压与空间电场关系

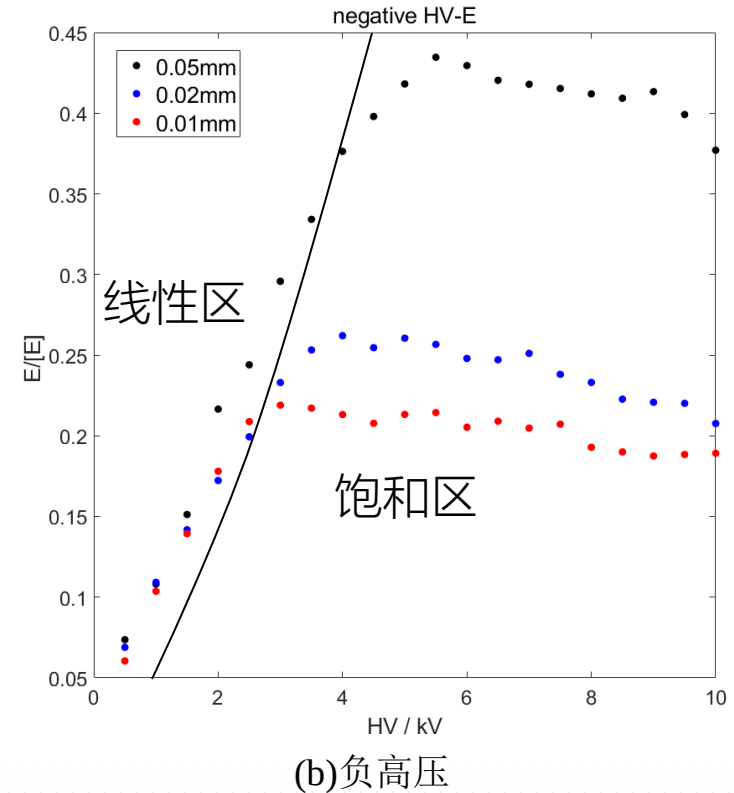
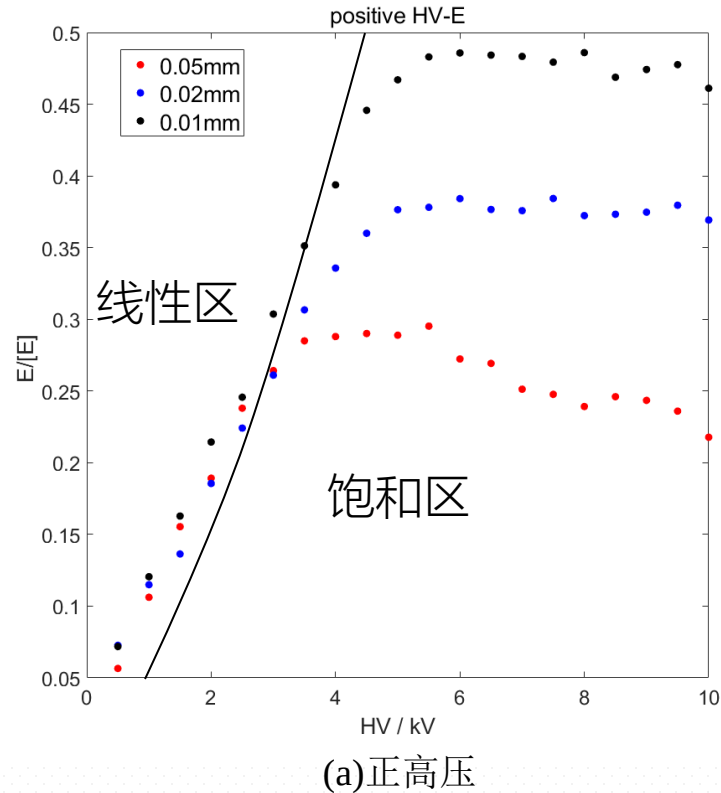


Fig.9 不同极性、不同丝径线板电极电场强度随电压变化曲线；(a)正高压；(b)负高压

线性区：无电晕， $E \propto f(r, d, l)U$ ， r 为距丝线距离， d 、 l 分别为丝线直径与长度。
饱和区：有电晕，等离子体对电场产生屏蔽。

线板电场强度空间分辨测量

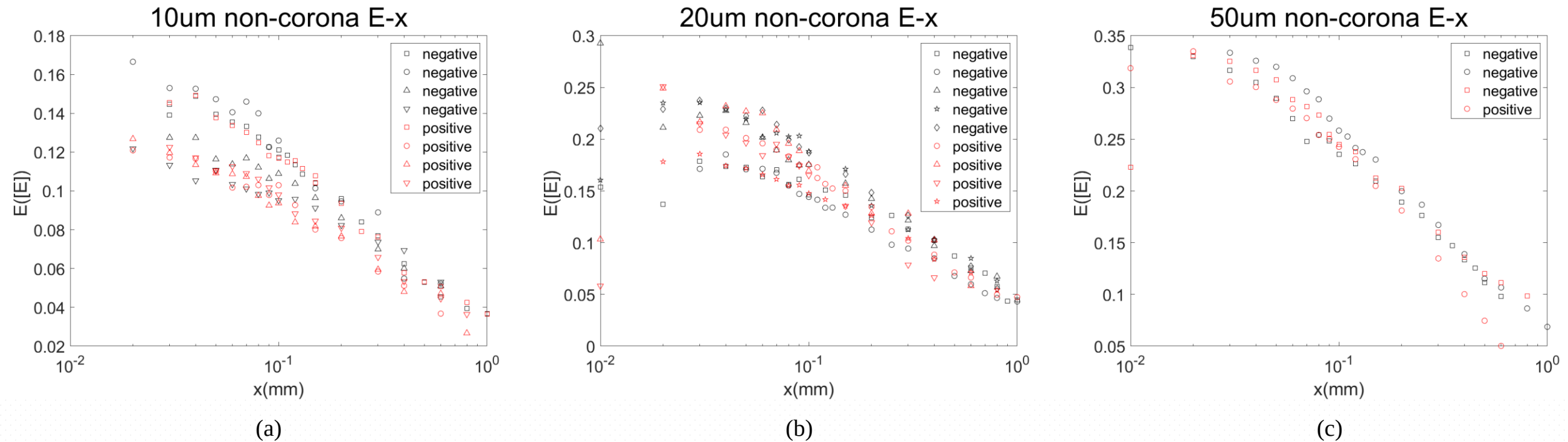


Fig.10 (a)(b)(c)分别为直径10、20、50 μm 细丝无电晕时空分辨电场强度

线性区：误差范围内，电场与电源极性无关。

线板电场强度空间分辨测量

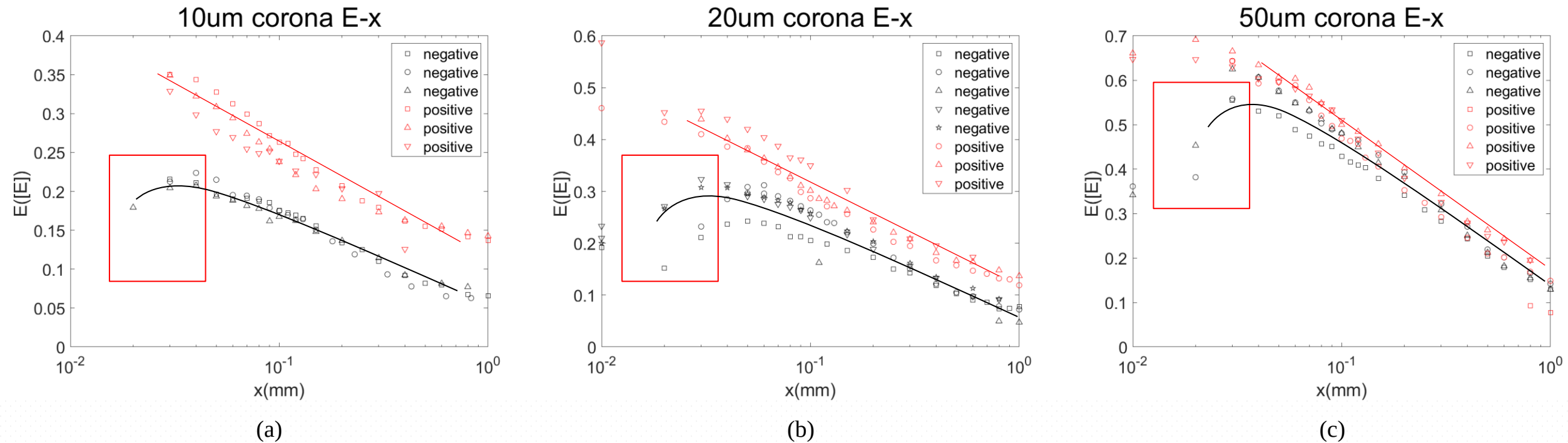
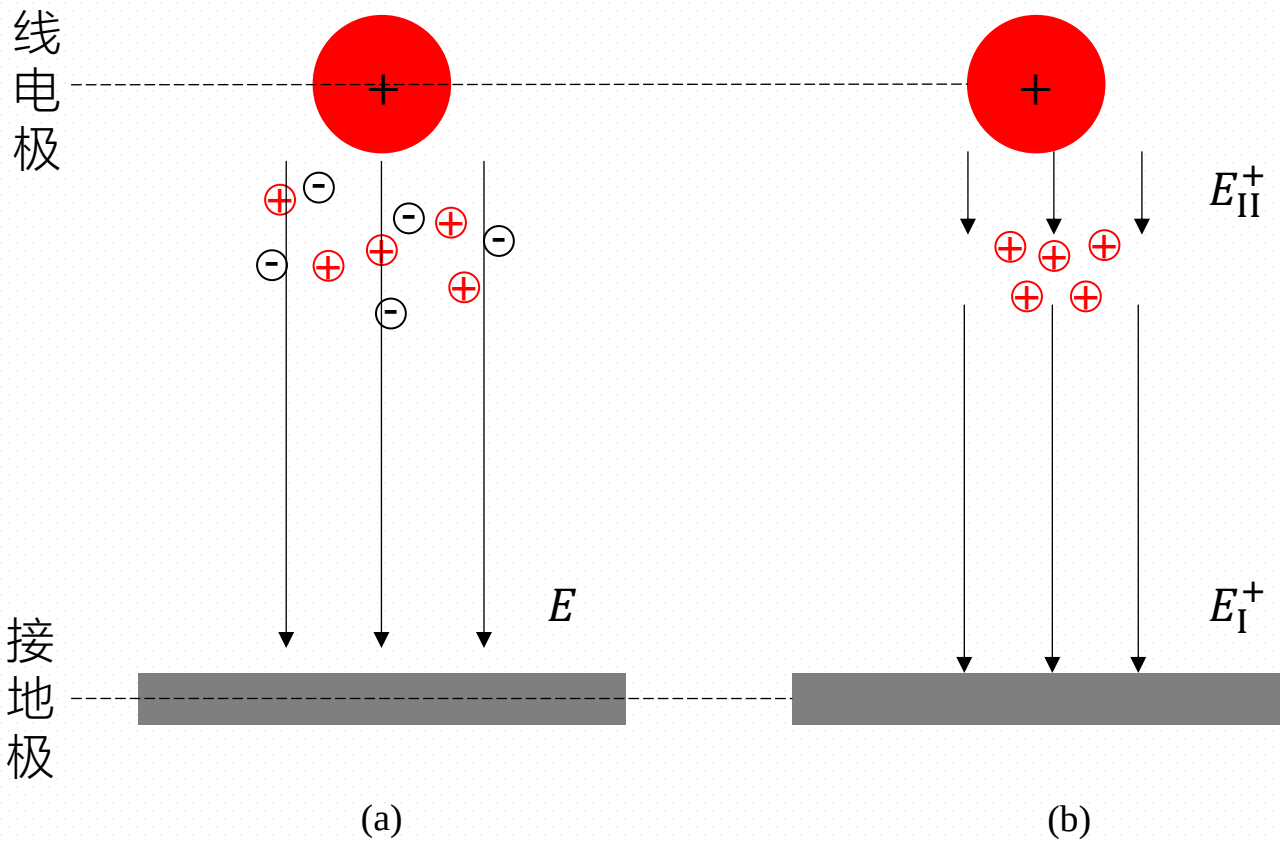


Fig.11 (a)(b)(c)分别为直径10、20、50μm细丝有电晕时空分辨电场强度

饱和区：

- 1、负极性电压，线电极附近电场下降；
- 2、正极性电场明显高于负极性电场，且随着线径减小而差别变大。

等离子体中粒子对电场的影响

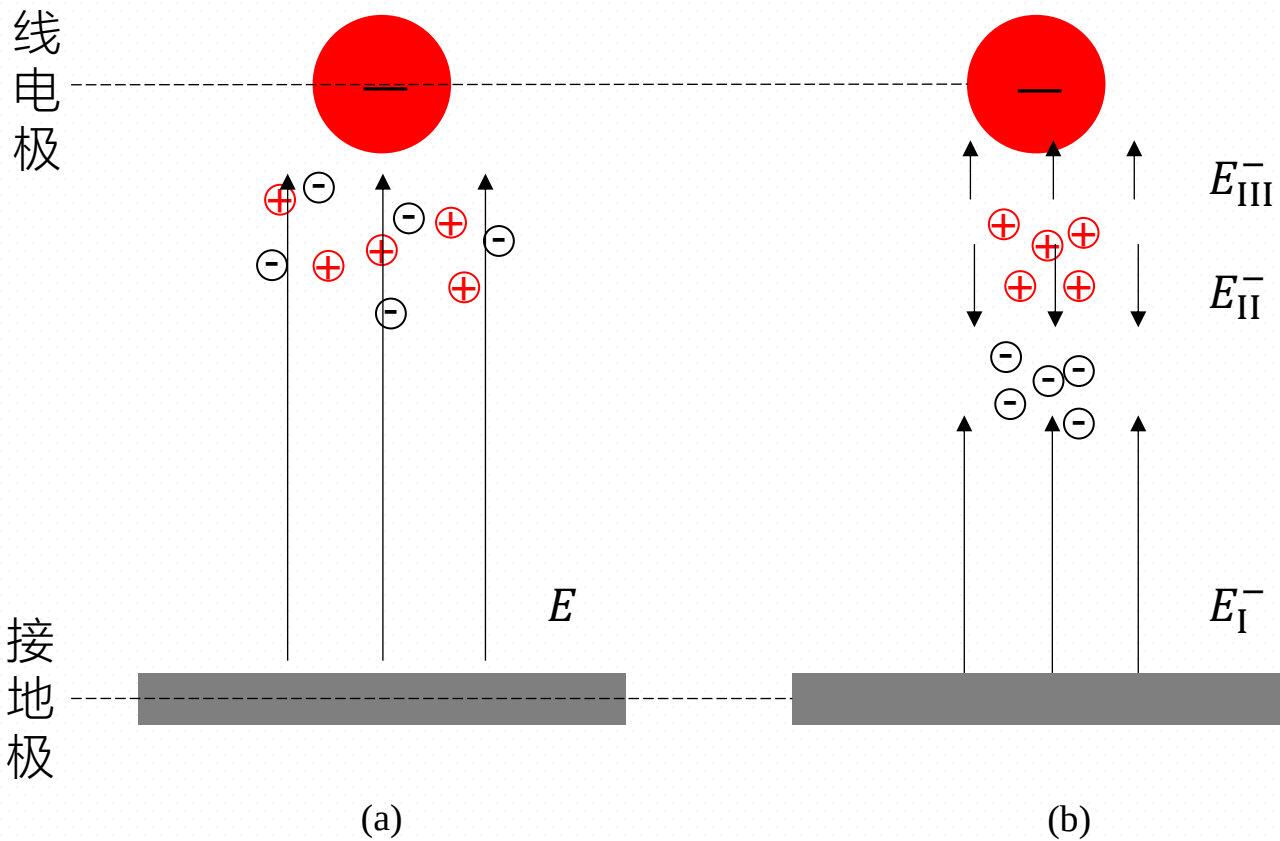


$$E_I^+ = E + E_{ion}$$

$$E_{II}^+ = E - E_{ion}$$

Fig.12 正高压下粒子运动示意图, (a)为初始状态, (b)为一段时间后。

等离子体中粒子对电场的影响



$$E_I^- = E + E_e - E_{ion}$$

$$E_{II}^- = E - E_e + E_{ion}$$

$$E_{III}^- = E + E_{ion}$$

Fig.13 负高压下粒子运动示意图, (a)为初始状态, (b)为一段时间后。

线板电场强度空间分辨测量

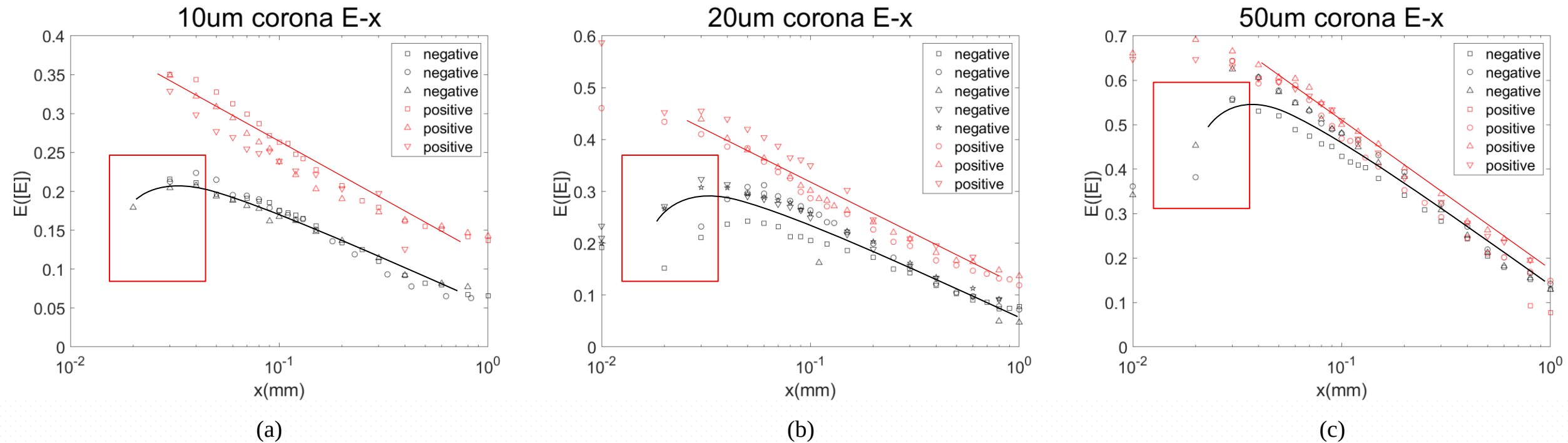


Fig.11 (a)(b)(c)分别为直径10、20、50μm细丝有电晕时空分辨电场强度

- 1、负极性电压，线电极附近电场下降；
- 2、正极性电场明显高于负极性电场，且随着丝径减小而差别变大。

等离子体中粒子对电场的影响

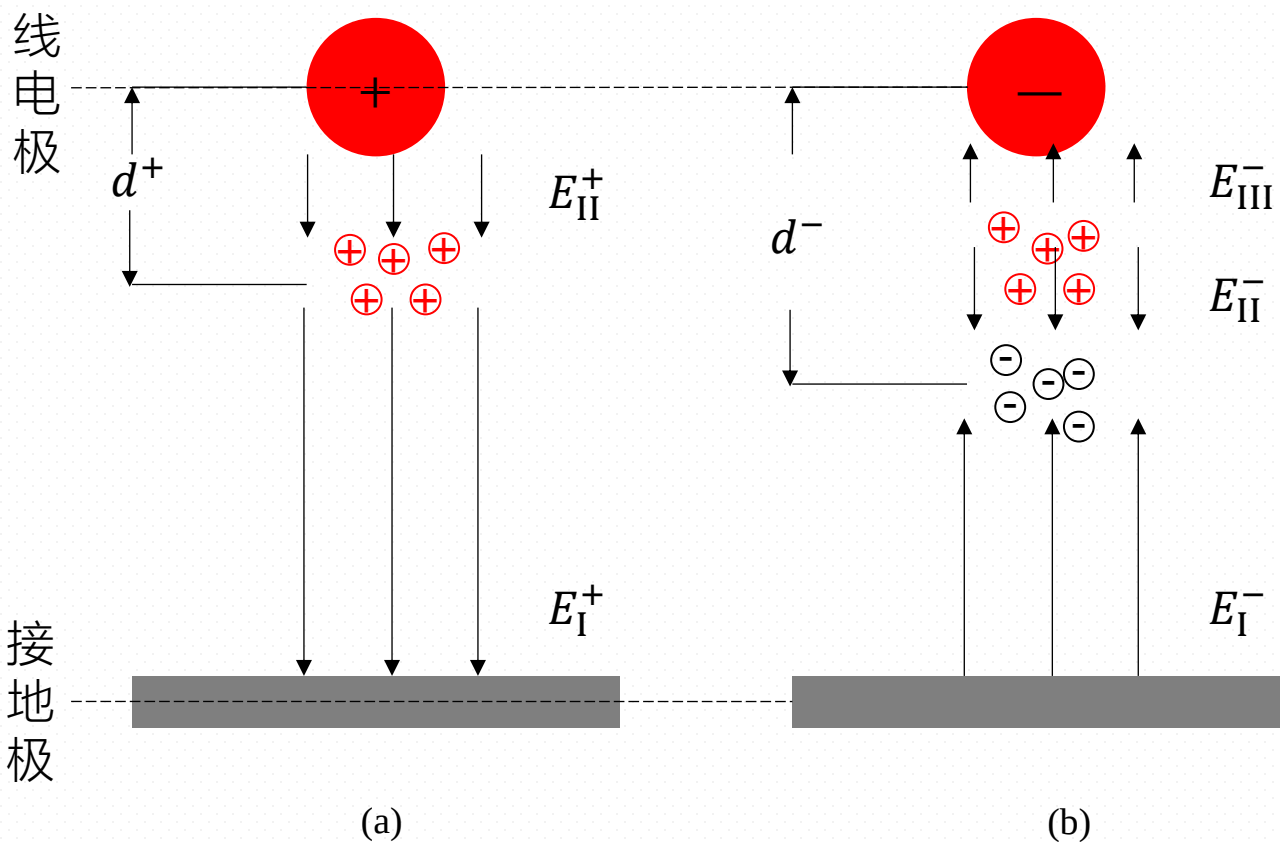


Fig.14 (a)正高压下粒子运动示意图；(b)负高压下粒子运动示意图。

$$E_{II}^+ = E - E_{ion}^+$$

$$E_{II}^- = E - E_e^- + E_{ion}^- \approx E - E_e^-$$

由于 $u_i \propto \sqrt{1/M}$; $u_e \propto \sqrt{1/m}$, 电子运动速度远大于离子, 因此 d^- 远大于 d^+ , 从而导致可以测量到**负极性电压线电极附近电场下降**, 正极性电压下则测不到电场下降现象。

线板电场强度空间分辨测量

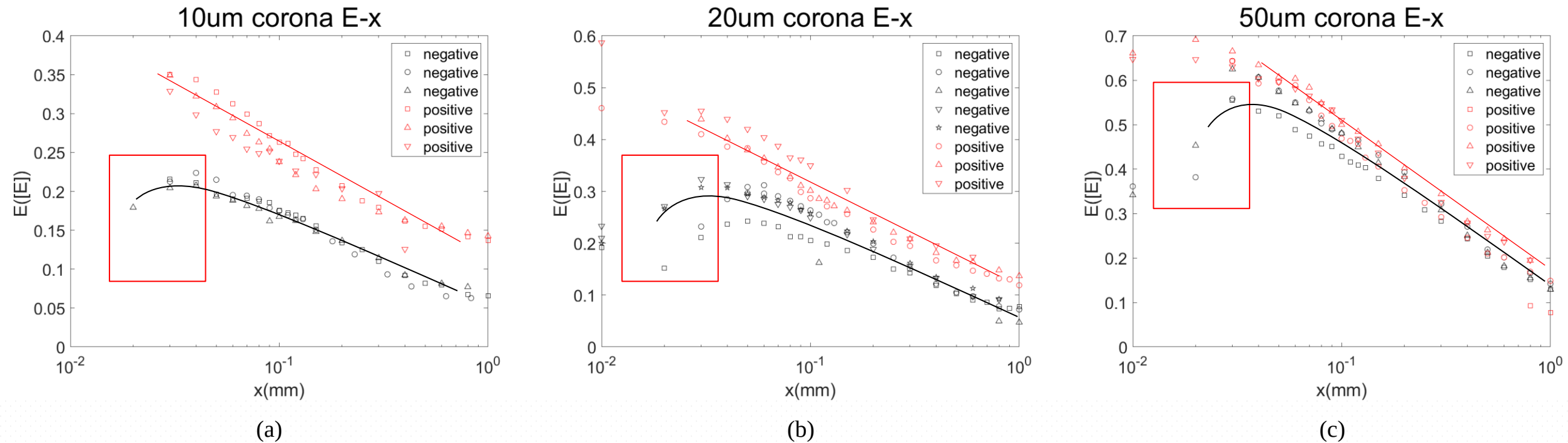


Fig.11 (a)(b)(c)分别为直径10、20、50 μm 细丝有电晕时空分辨电场强度

- 1、负极性电压，线电极附近电场下降；
- 2、正极性电场明显高于负极性电场，且随着丝径减小而差别变大。

等离子体中粒子对电场的影响

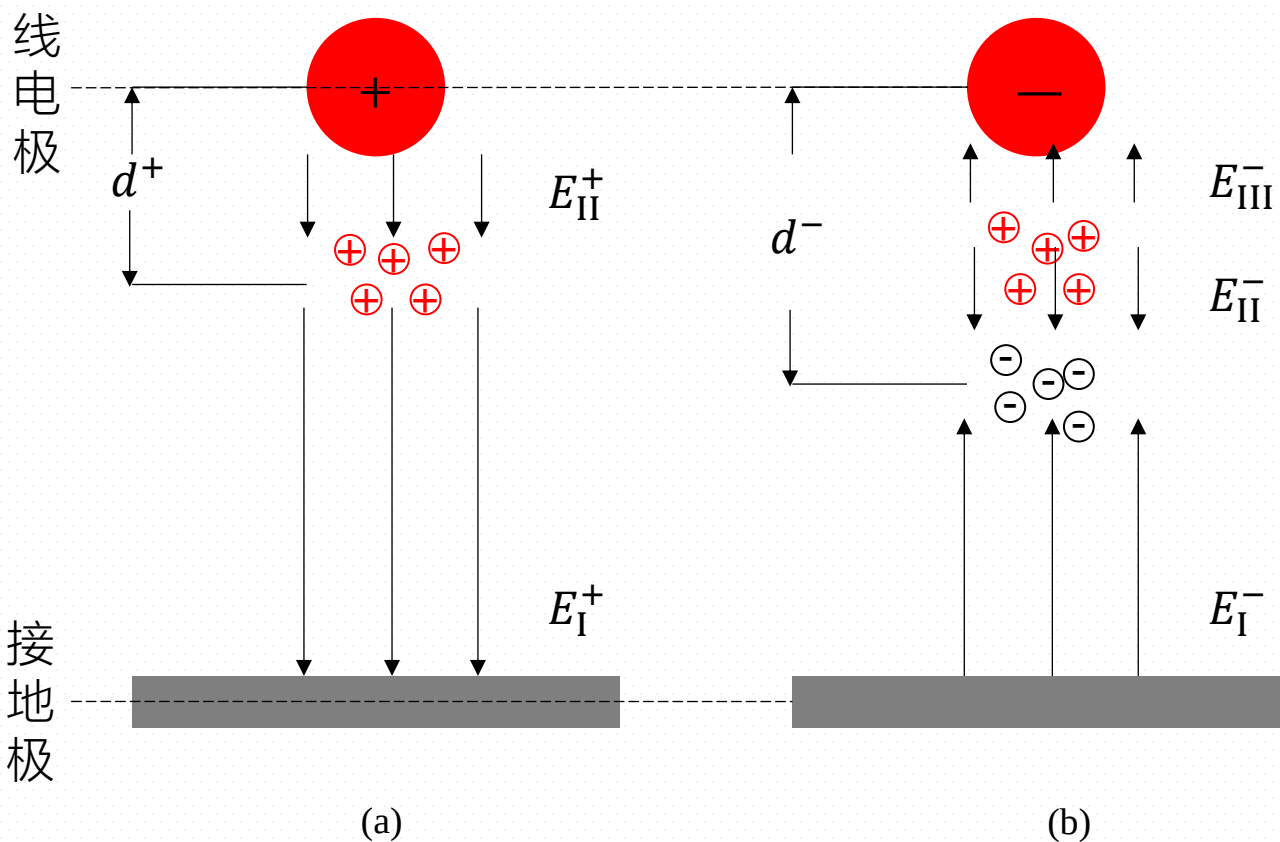


Fig.14 (a)正高压下粒子运动示意图；(b)负高压下粒子运动示意图。

$$E_I^+ = E + E_{ion}^+$$

$$E_I^- = E + E_e^- - E_{ion}^-$$

正极性：电子向电极运动，增强电离；

负极性：电子远离电极，减弱电离。

从而有 $n_{ion}^+ > n_e^-$ ； $E_{ion}^+ > E_e^-$ ，因而 $E_I^+ > E_I^-$ 。

这也解释了直流放电中负极性击穿电压大于正极性击穿电压的现象。

等离子体中粒子对电场的影响

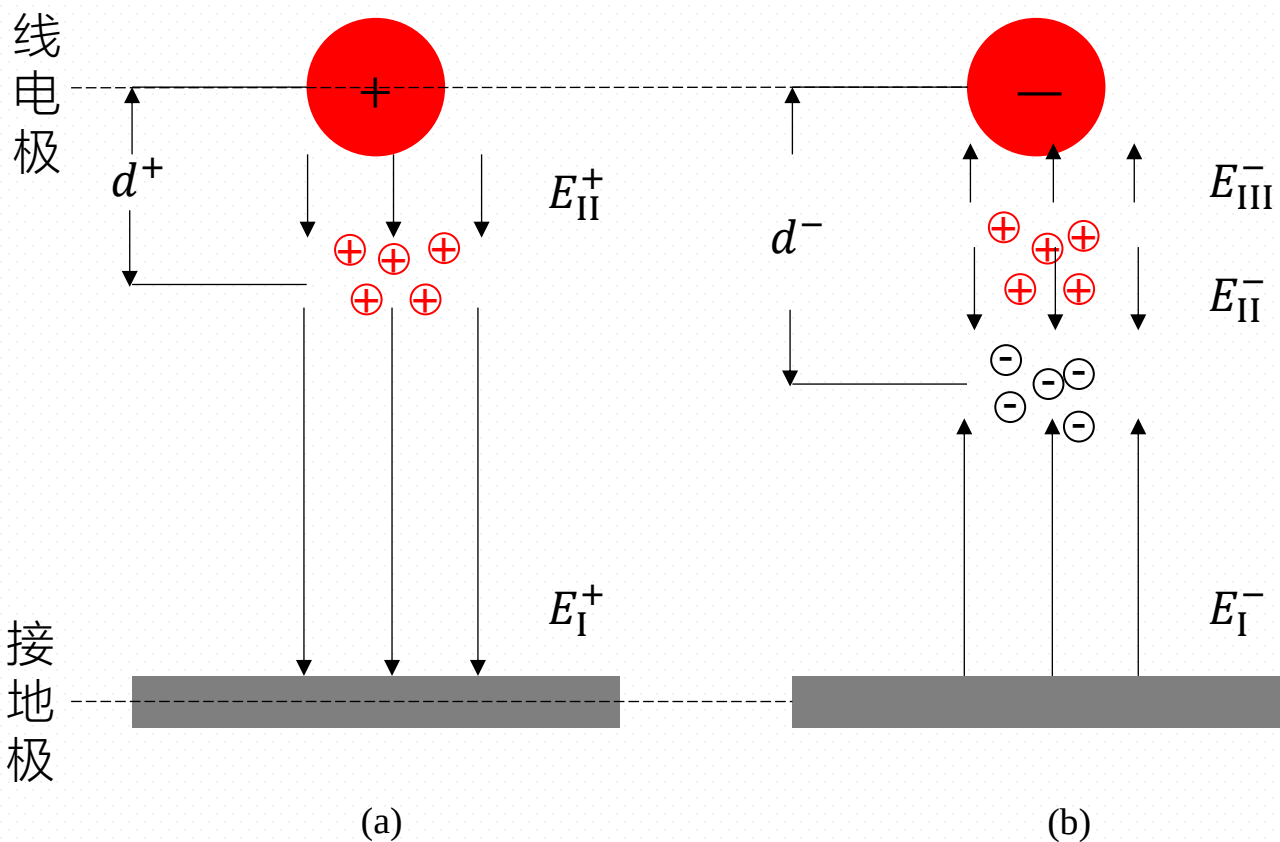


Fig.14 (a)正高压下粒子运动示意图；(b)负高压下粒子运动示意图。

$$E_I^+ = E + E_{ion}^+$$

$$E_I^- = E + E_e^- - E_{ion}^-$$

线电极直径越小，尖端效应越剧烈，线电极附近电场越强，两种不同极性对电离的作用越强烈，因此 E_I^+ 与 E_I^- 差距越明显。

总结

- **核心内容：**构建亚毫米分辨率EFISH电场测量系统，实现大气压电晕放电中电场空间分布的高精度非侵入式诊断。
- **关键发现：**负极性放电时电极近区电场强度显著低于正极性，且随电极丝径减小差异更明显。负极性下快速迁移电子在电极附近形成反向空间电荷层，削弱局部电场。
- **创新与意义：**首次在微小尺度放电结构中实现空间电荷极性效应的空间分辨观测，从实验和物理机制层面揭示极性对局部电场分布的调控作用，为复杂放电系统电场演化规律研究提供重要技术手段与理论依据。

请各位老师 批评指正

汇报人：郭一鸣