



欢迎来到高电压工程课  
请进入雨课堂

# 清华大学电机系

## 2024春《高电压工程》第三讲

梁曦东

2024-3-15



# 第1章 气体放电过程的分析

- 1.1 带电质点与气体放电
- 1.2 低气压下均匀电场自持放电的汤逊理论和巴申定律
- 1.3 高气压下均匀电场自持放电的流注理论
- 1.4 高气压下不均匀电场气体击穿的发展过程

## 本章核心概念：

碰撞电离、自持放电、汤逊放电、巴申定律、电晕放电、电子崩、流注、先导、极性效应、长间隙放电

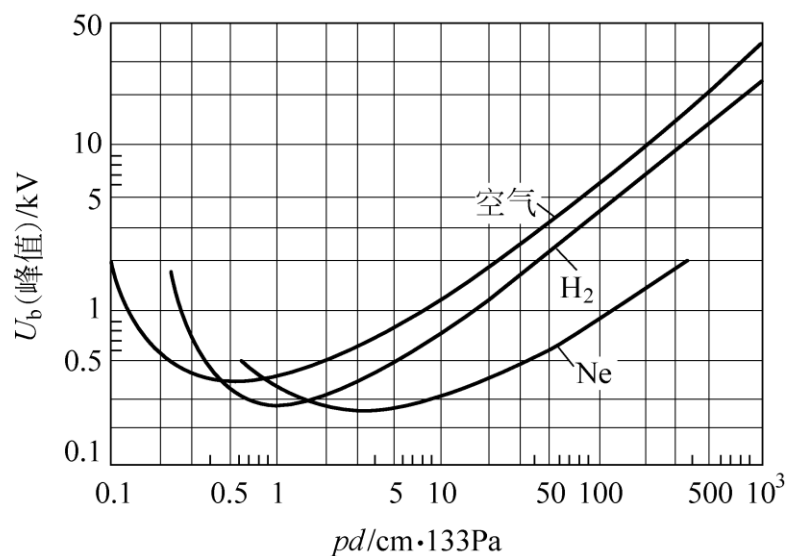
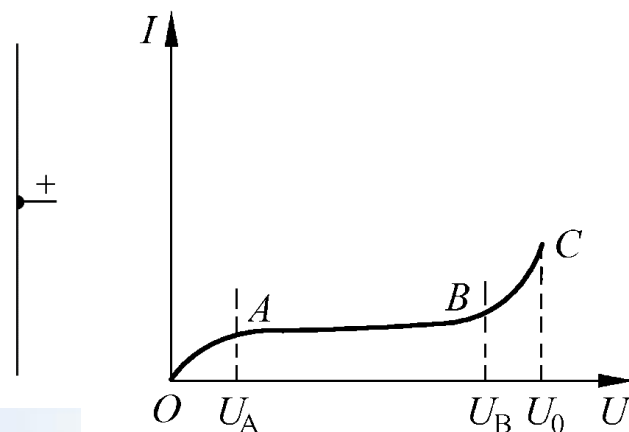
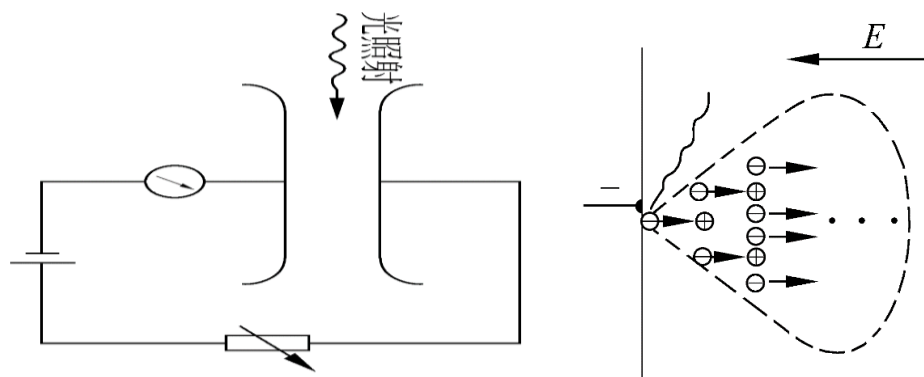
## 1.2 低气压下均匀电场自持放电的汤逊理论和巴申定律

### 1.2.1 汤逊理论

### 1.2.2 巴申定律与均匀电场击穿电压

### 1.2.3 汤逊理论的适用范围

平均自由程、碰撞电离、电子崩、  
碰撞电离系数 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、  
自持放电及其条件  $\gamma e^{\alpha d} = 1$



- J. S. Townsend根据大量实验，提出了基于碰撞电离的气体放电理论
- F. Paschen从大量实验中，总结出了气体间隙击穿电压的巴申定律



# 第1章 气体放电过程的分析

## 1.2 低气压下均匀电场自持放电的汤逊理论和巴申定律

电子崩、 $\alpha$ 过程、 $\gamma$  过程的碰撞电离，自持放电条件  $\gamma e^{\alpha d} = 1$   
场强对 $\alpha$ 系数、对碰撞电离的影响

## 1.3 高气压下均匀电场自持放电的流注理论

### 1.3.1 空间电荷对电场的畸变

高气压下碰撞电离更强烈，带电粒子密度剧增，原有电场畸变

### 1.3.2 流注的形成

空间光电离、二次电子崩。正、负流注的形成，速度、发展方向

### 1.3.3 均匀电场中的自持放电条件 $\gamma e^{\alpha d} = 1$ ， $\gamma$ 此处的数量级

### 1.3.4 流注理论对放电现象的解释

# 汤逊放电的简要回顾与讨论

## 基本知识：

- 碰撞电离、平均自由程、电子崩、碰撞电离系数、自持放电、自持放电条件

## 几点讨论：

- 汤逊放电理论好在哪里（至今仍用汤逊理论）？
- 为什么采用低气压？不采用低气压又会怎样？
- 汤逊做实验时为什么采用照射？
- 汤逊提出碰撞电离理论时哪些实验条件是必备的？



## 继续讨论：汤逊放电与高电压学科

- 汤逊放电理论成为所有与高电压有关学科最基本的理论基础  
高电压技术、高电压绝缘、高压输变电、高电压物理、脉冲功率技术

麦克斯韦电磁学理论最大的两方面应用：电力与电讯  
J.S.汤逊当初没想着要推动高电压学科的发展呀

为什么说汤逊的气体放电理论是所有高电压相关学科的基础？

什么原因使得汤逊理论成为高电压学科的基础？



# 第1章 气体放电过程的分析

## 1.4 高气压下不均匀电场气体击穿的发展过程

### 1.4.1 电场不均匀程度的划分

均匀场、稍不均匀场、极不均匀场。电场不均匀系数 $f = E_{\max} / E_{\text{av}}$

### 1.4.2 极不均匀电场气体的电晕放电

### 1.4.3 极不均匀电场的极性效应

### 1.4.4 长间隙击穿过程

### 1.4.5 稍不均匀电场的自持放电条件与极性效应

### 1.4.1 电场不均匀程度的划分

电场不均匀系数

$$f = E_{\max} / E_{\text{av}}$$

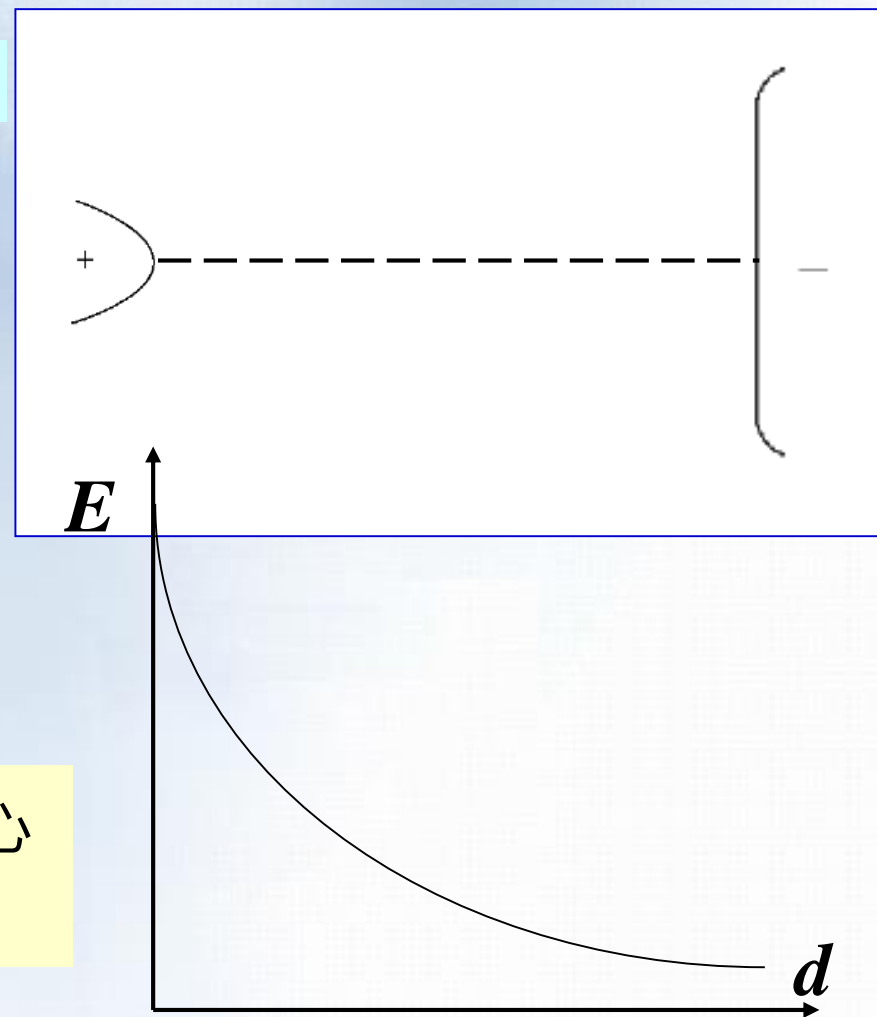
均匀场  $f = 1$

稍不均匀场  $f < 2$

极不均匀场  $f > 4$

区分稍不均匀场与极不均匀场的核心  
是两种间隙放电特点的不同

(电场利用系数  $\eta = E_{\text{av}} / E_{\max} = 1/f$ )



间隙最短距离沿线的电场分布



## 1.4.2 极不均匀电场气体的电晕放电

什么是极不均匀电场？

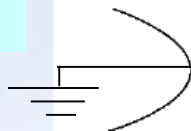
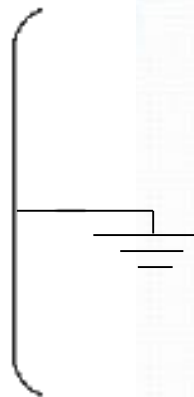
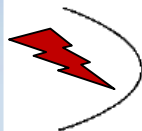
电极空间各点场强相差很大

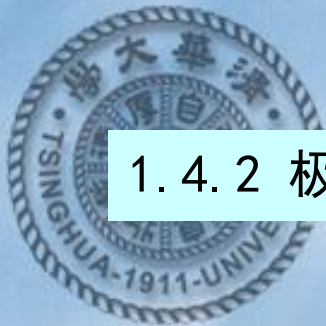
会有哪些与均匀场不同的放电现象？

仅局部区域达到碰撞电离条件，  
放电仅在电场很强的局部区域发生

高场强电极不一定是高电位电极

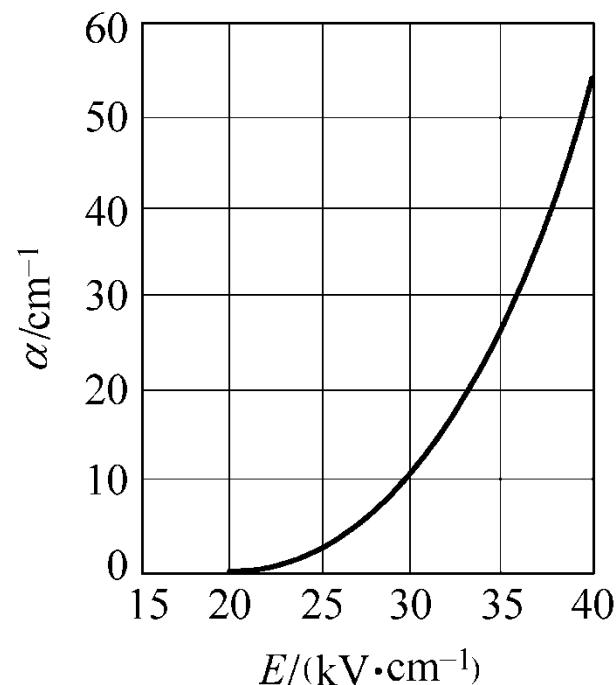
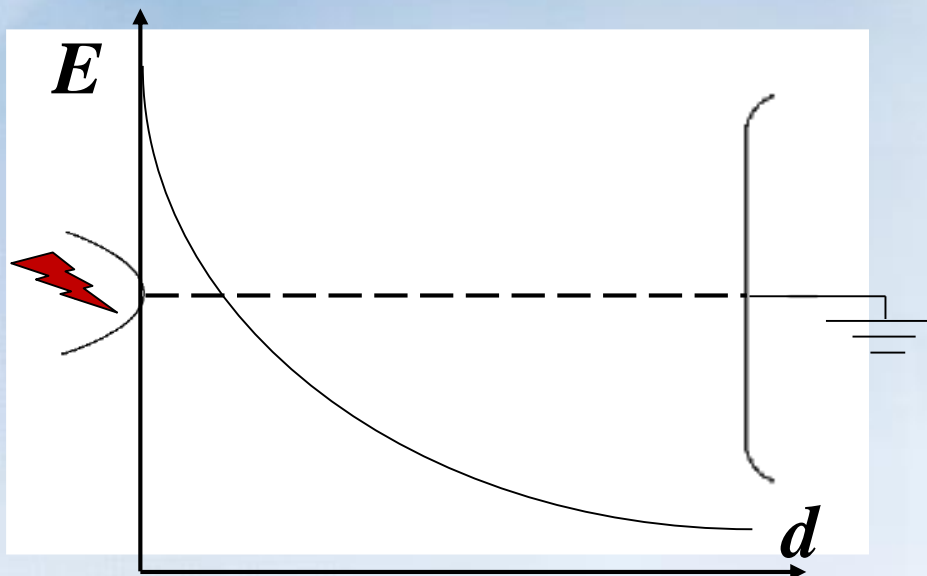
高场强电极的极性对放电有明显影响





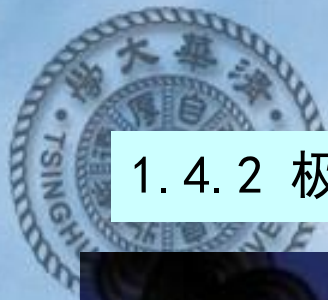
## 1.4.2 极不均匀电场气体的电晕放电

## 电晕起始电压、电晕起始场强



电极空间各点场强相差很大

仅局部区域达到碰撞电离条件，放电仅在局部区域发生  
且高场强电极的极性对放电有明显影响

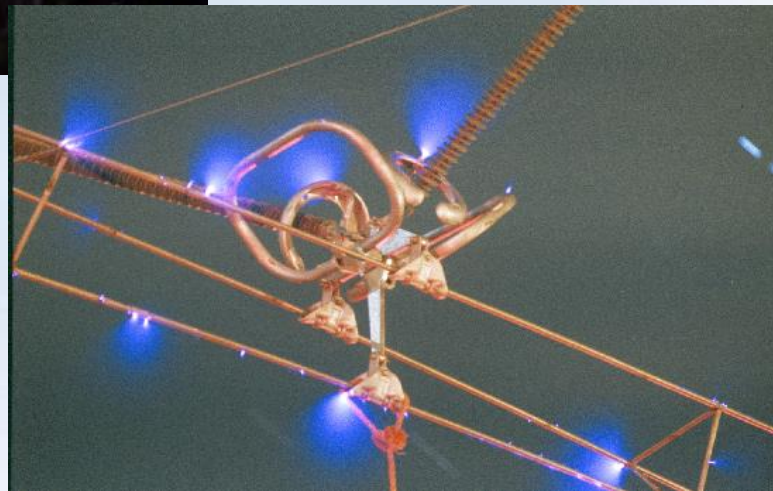


## 1.4.2 极不均匀电场气体的电晕放电

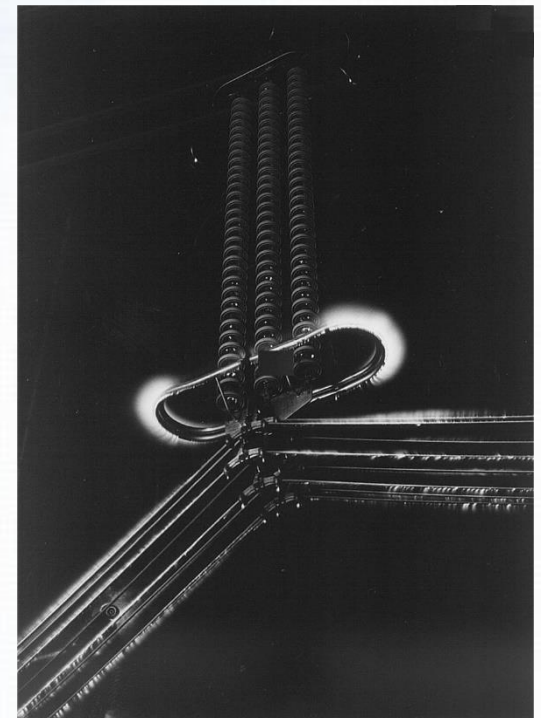


可见电晕

电晕起始电压、电晕起始场强



高场强电极处的电晕放电现象



### 1. 4. 2 极不均匀电场气体的电晕放电

电场不均匀系数

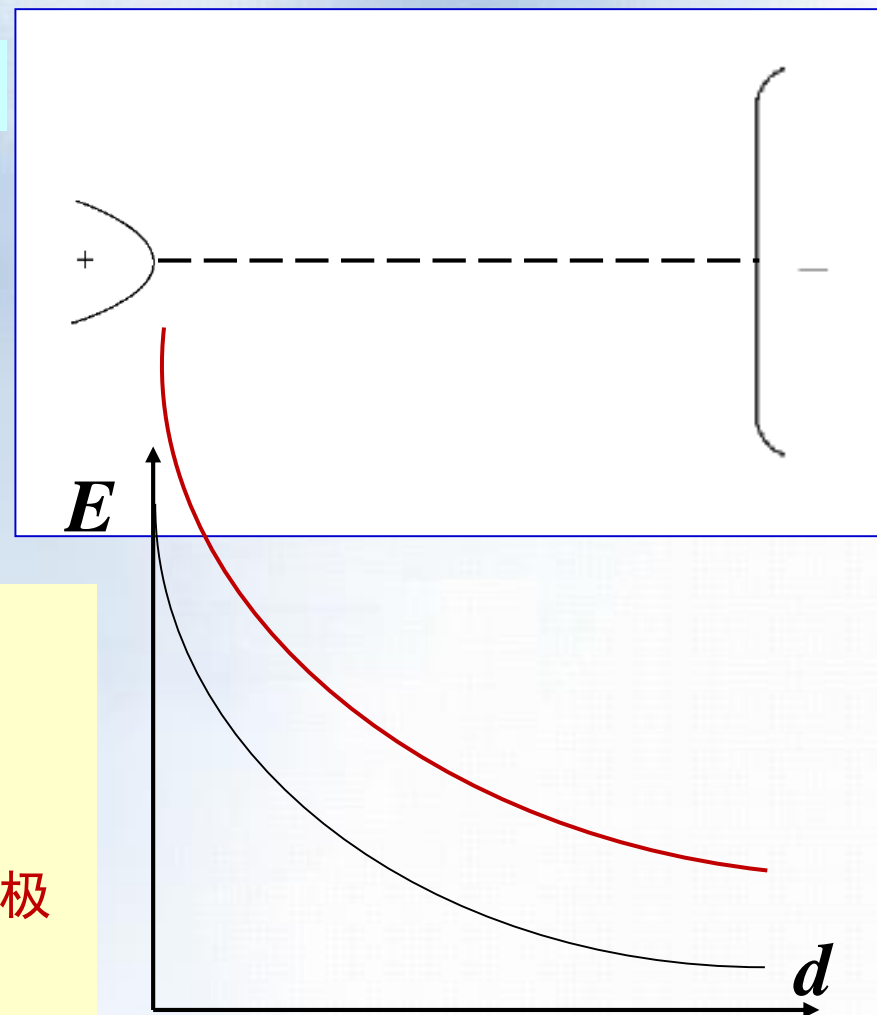
$$f = E_{\max} / E_{\text{av}}$$

均匀场  $f = 1$

稍不均匀场  $f < 2$

极不均匀场  $f > 4$

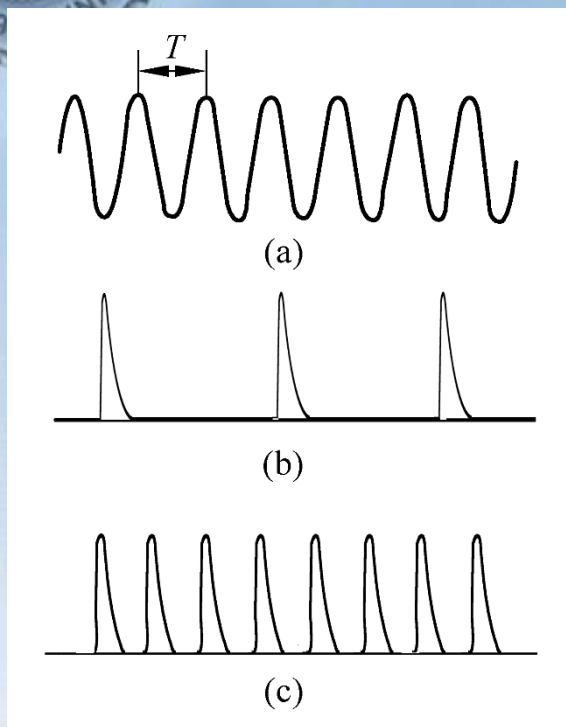
- 无空间电荷时，可算得电场分布
- 随外加电压的升高，电场分布不变，只是场中各点的场强和电位随之升高
- 场强分布与电压极性无关，与哪个电极接地、哪个电极加高压也无关



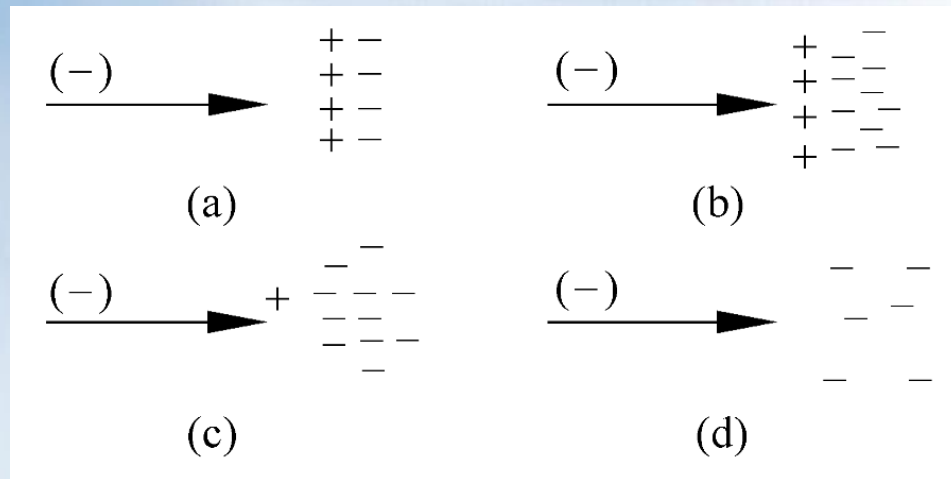
电极空间各点场强相差很大

仅局部区域达到碰撞电离条件，放电仅在局部区域发生  
且高场强电极的极性对放电有明显影响

## 1.4.2 极不均匀电场气体的电晕放电



负极性下尖-板间隙中的  
电晕电流波形(b)和(c)



### 负极性电晕起始阶段的说明

(恒定电压下的脉冲电流是如何形成的?)

注意电子崩的起始位置与发展方向  
注意电子、正离子、负离子的运动  
方向及其运动速度



## 1.4.2 极不均匀电场气体的电晕放电

对两根半径均为 $r$ 的平行圆导线  
电晕起始场强 $E_c$ 、电晕起始电压 $U_c$ 的比克公式

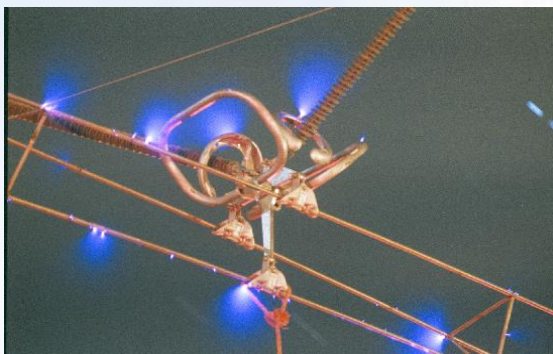
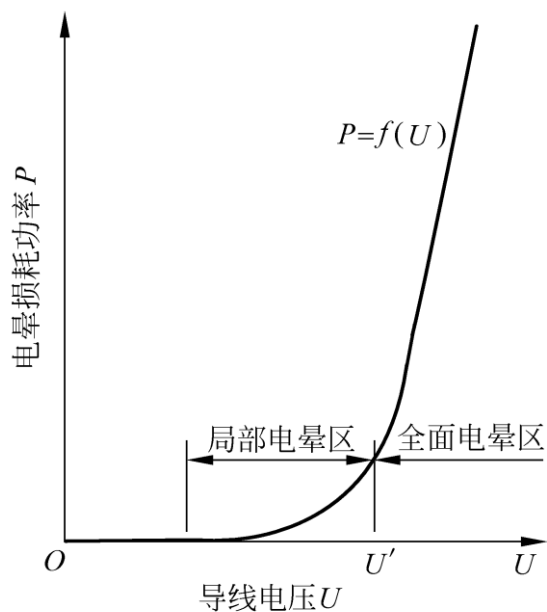
其他典型电极结构的比克公式见教材表2-1

电晕起始场强  
又是如何确定的？

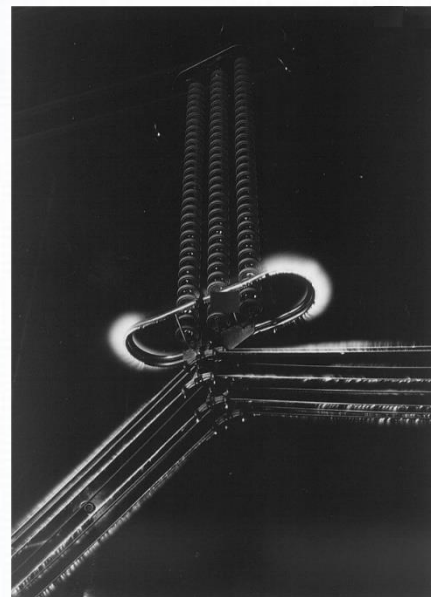
$$E_c = 30.3m\delta(1 + 0.298/\sqrt{r\delta})$$

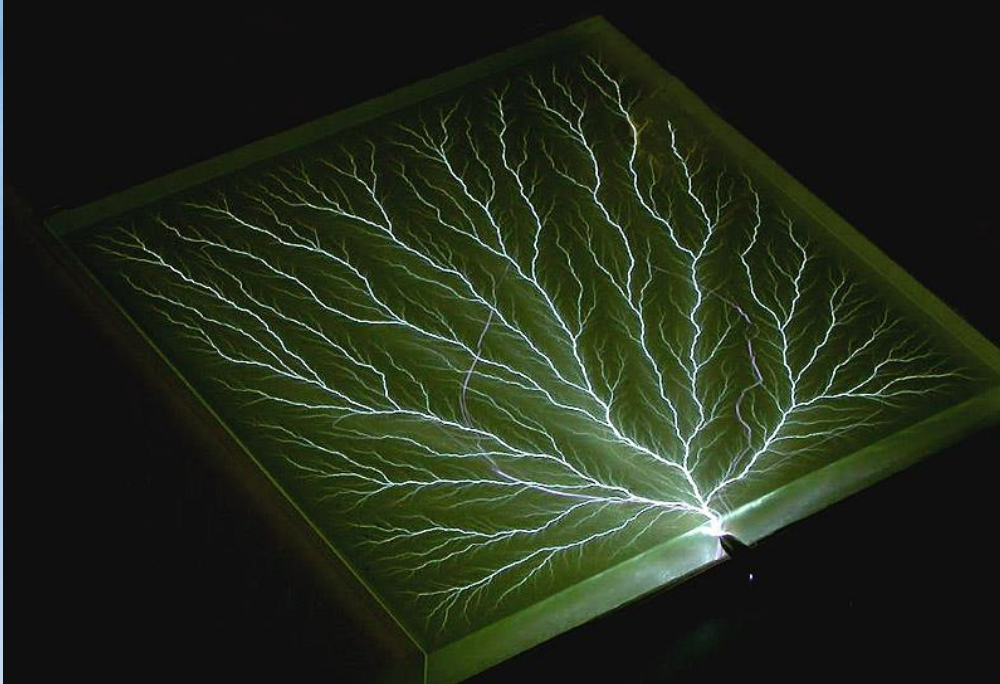
$$U_c = E_c r \ln\left(\frac{d}{r}\right)$$

### 输电线路的电晕



可见电晕！





还有大量人工制造的  
高压放电精美图片，  
不妨搜来看看

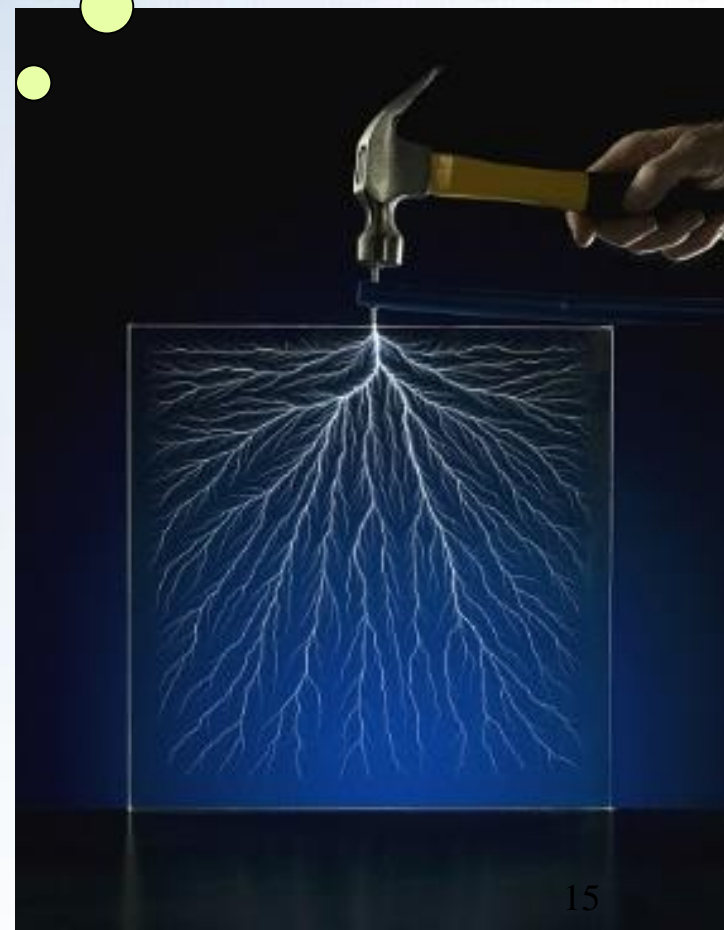






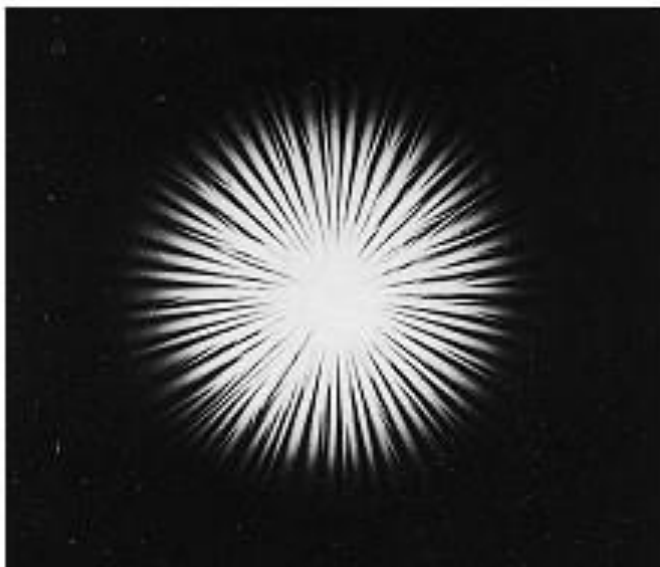
Figure 3.32 Photograph of a positive streamer corona, Lemke [3.38, 3.39].

极不均匀场产生电晕后，  
继续升高电压，则电晕范  
围扩大，出现流注放电

高场强电极的电压极性不  
同，则流注放电形状不同

极不均匀电场空气间隙的  
**正流注放电**





极不均匀场产生电晕后，  
继续升高电压，则电晕范  
围扩大，出现流注放电

高场强电极的电压极性不  
同，则流注放电形状不同

极不均匀电场空气间隙的  
正流注放电与  
负流注放电

Figure 3.35 Photograph of positive and negative streamer corona, "Lichtenberg Figures"  
taken by Toepler, TU Dresden.

### 1.4.3 极不均匀电场的极性效应

电晕起始电压的不同

间隙击穿电压的不同

注意电子崩及流注的  
起始位置与发展方向

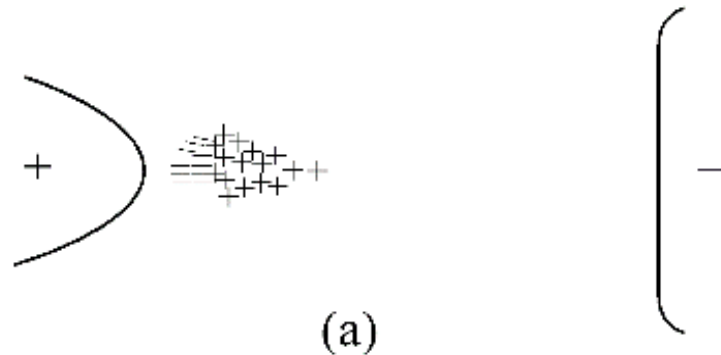
注意电子、正离子、负离子的  
运动方向及其运动速度

电晕的出现削弱了强场区的场强

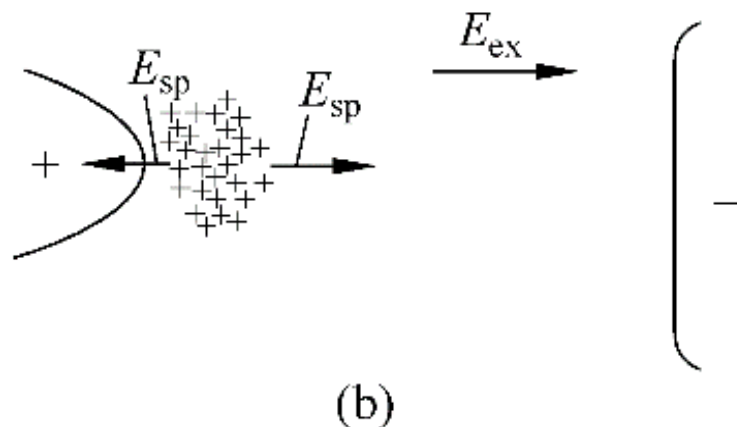
需要更高的电压才能维持电晕

正极性棒-板间隙

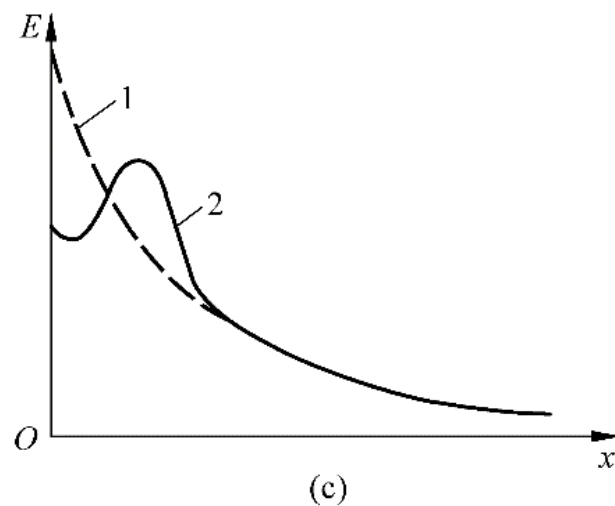
电晕起始后电场分布变化示意图



(a)



(b)



(c)

### 1.4.3 极不均匀电场的极性效应

电晕起始电压的不同

间隙击穿电压的不同

注意电子崩及流注的  
起始位置与发展方向

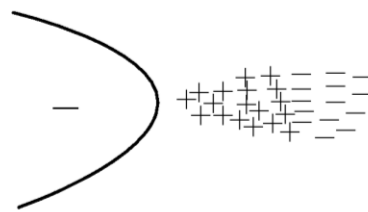
注意电子、正离子、负离子的  
运动方向及其运动速度

电晕的出现加强了强场区的场强  
削弱了外围场强

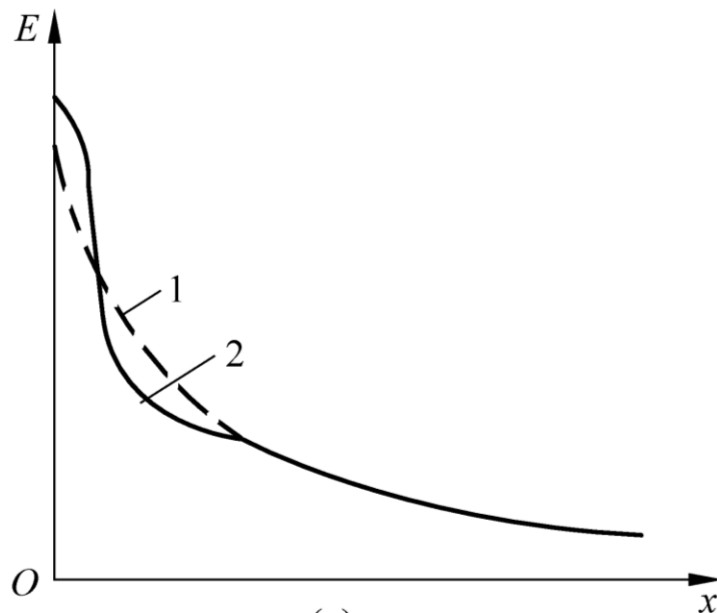
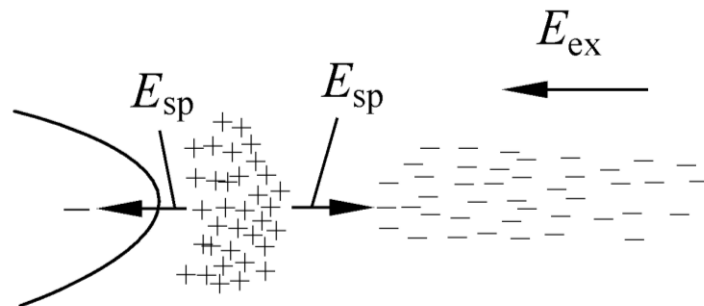
所以不需要更高的电压就能维持电晕  
但电晕也因此局限在电极附近

负极性棒-板间隙

电晕起始后电场分布变化示意图



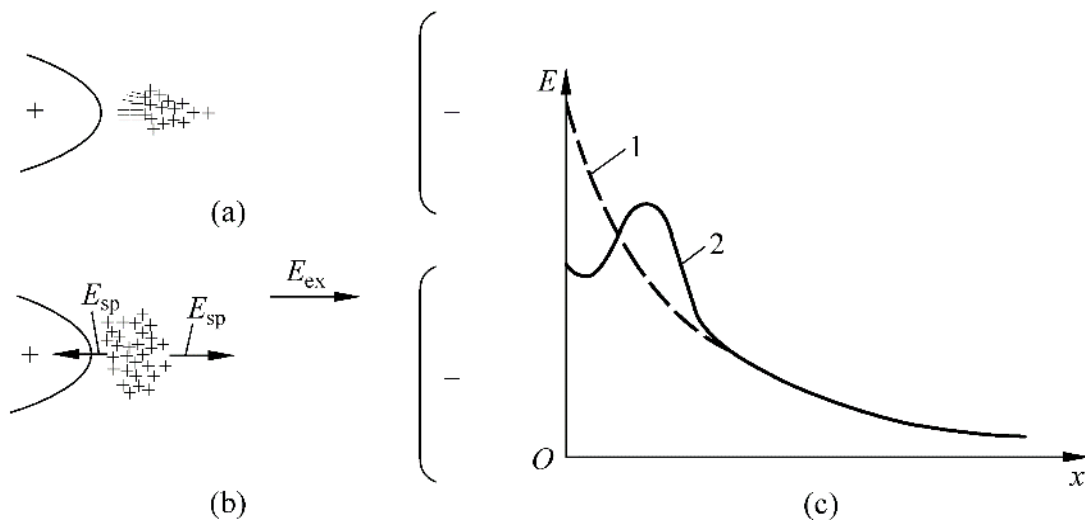
(a)



(c)

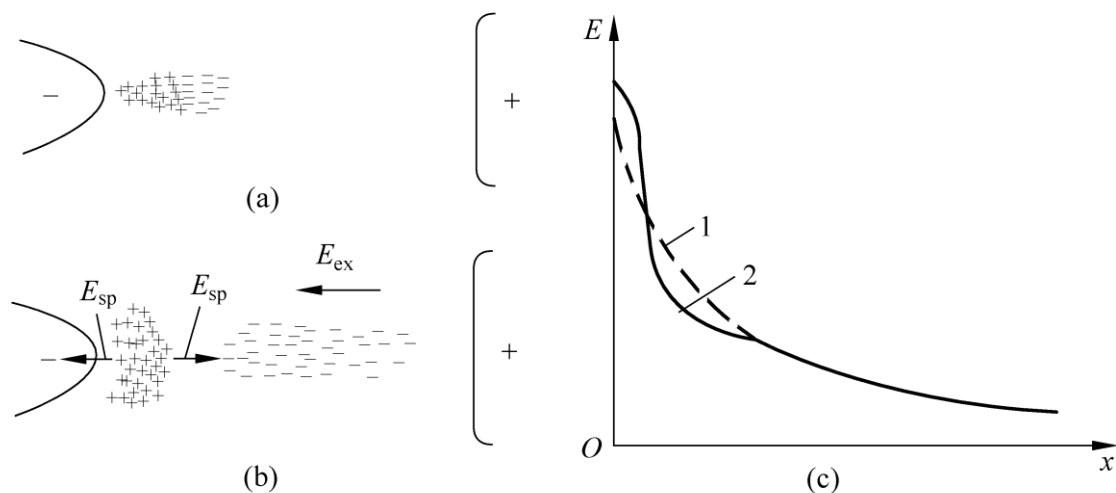
### 1.4.3 极不均匀电场的极性效应

#### 电晕起始电压的不同、间隙击穿电压的不同



正棒-板

电晕起始电压更高  
正极性不容易电晕

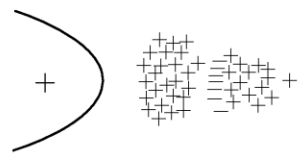


负棒-板

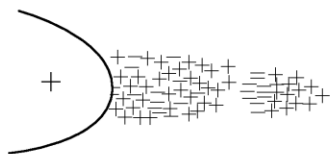
电晕起始电压更低  
负极性容易电晕

### 1.4.3 极不均匀电场的极性效应

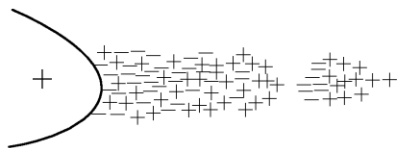
#### 电晕起始电压的不同、间隙击穿电压的不同



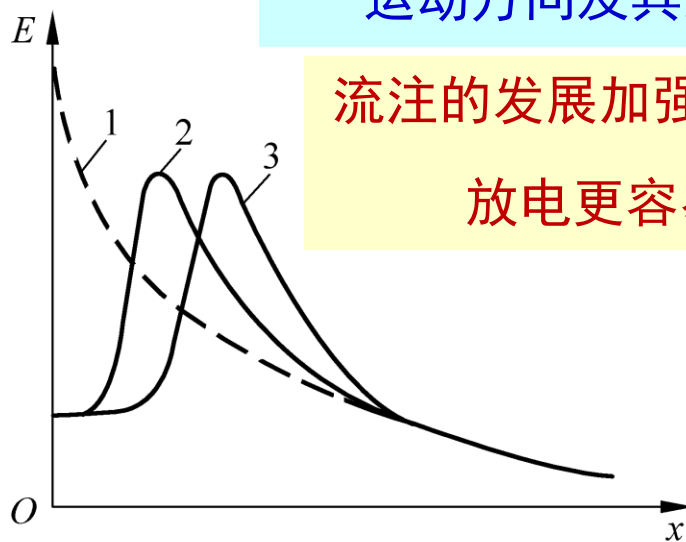
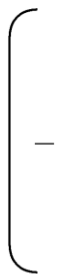
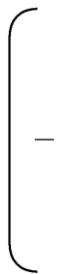
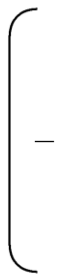
(a)



(b)



(c)



注意电子崩及流注的  
起始位置与发展方向

注意电子、正离子、负离子的  
运动方向及其运动速度

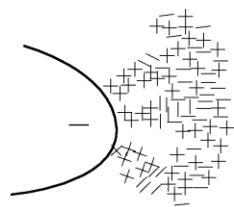
流注的发展加强了前方场强  
放电更容易发展

正棒-板间隙

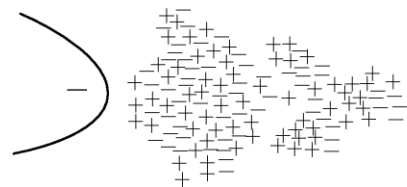
击穿过程场强分布变化示意图

### 1.4.3 极不均匀电场的极性效应

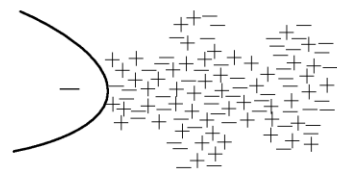
#### 电晕起始电压的不同、间隙击穿电压的不同



(a)



(b)

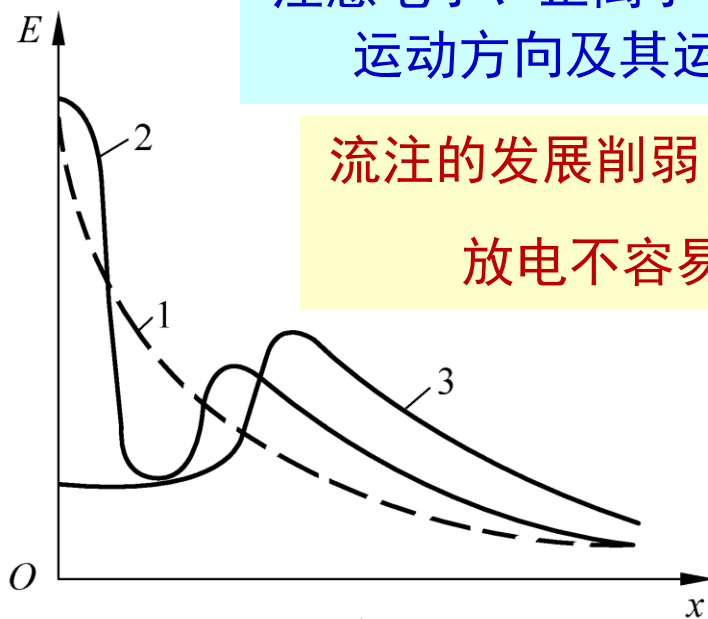


(c)

+

+

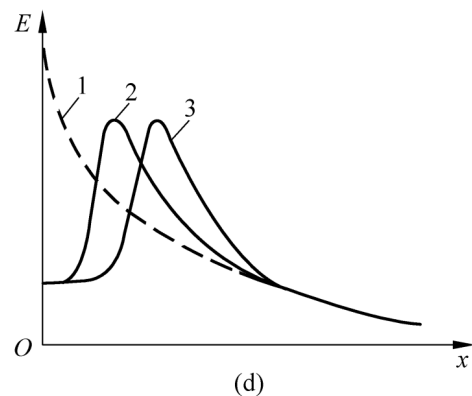
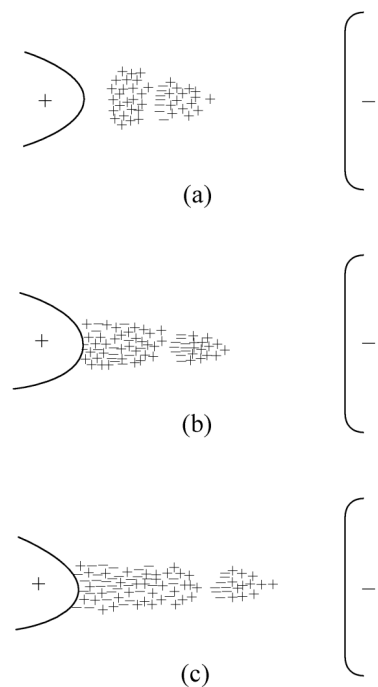
+



流注的发展削弱了前方场强  
放电不容易发展

负棒-板间隙

击穿过程场强分布变化示意图

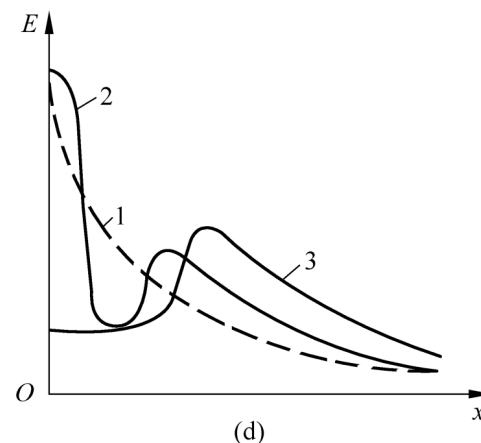
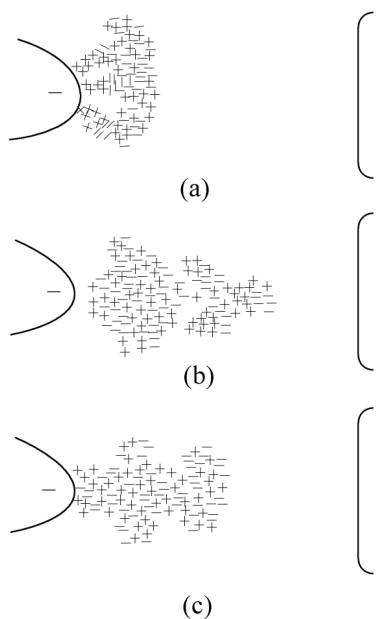


正棒板与负棒板电极的  
空气间隙击穿电压  
相差多大？见第二章

正棒-板

流注放电加强前方  
电场，放电更容易

间隙击穿电压低



负棒-板

放电长时间维持在一  
定区域内

间隙击穿电压高



# 第1章 气体放电过程的分析

## 1.4 高气压下不均匀电场气体击穿的发展过程

### 1.4.1 电场不均匀程度的划分

均匀场、稍不均匀场、极不均匀场。电场不均匀系数 $f = E_{\max} / E_{\text{av}}$

### 1.4.2 极不均匀电场气体的电晕放电

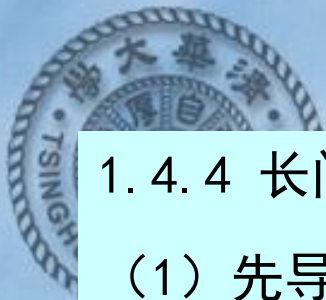
### 1.4.3 极不均匀电场的极性效应

### 1.4.4 长间隙击穿过程

先导放电、主放电

### 1.4.5 稍不均匀电场的自持放电条件与极性效应





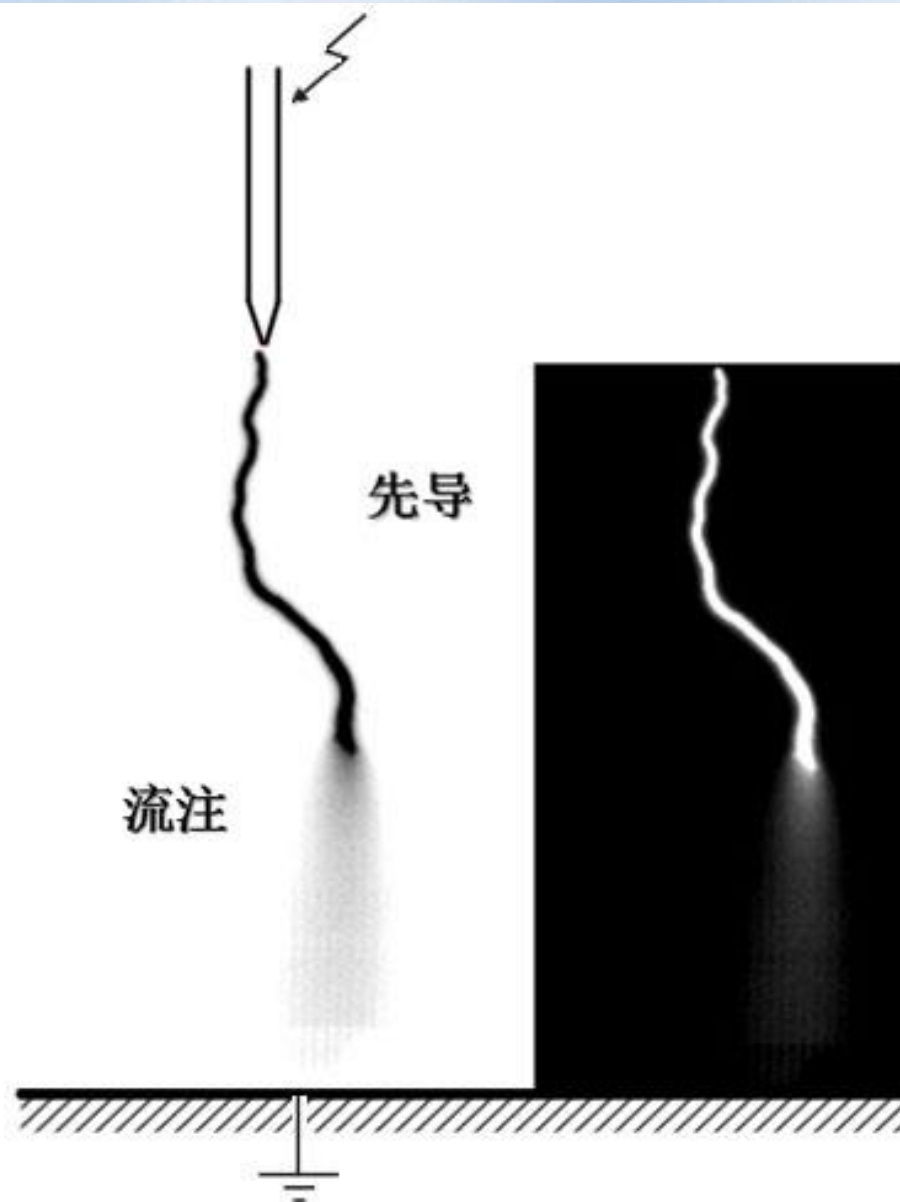
#### 1.4.4 长间隙击穿过程

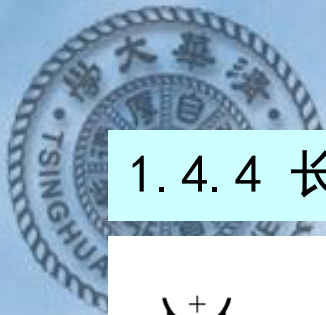
##### (1) 先导放电

棒-板间隙中的  
先导与前部流注  
示意图及实拍照片

先导放电的存在使得长间隙  
的平均击穿场强大为下降

10m长空气间隙的正极性操作  
冲击击穿电压仅1800kV

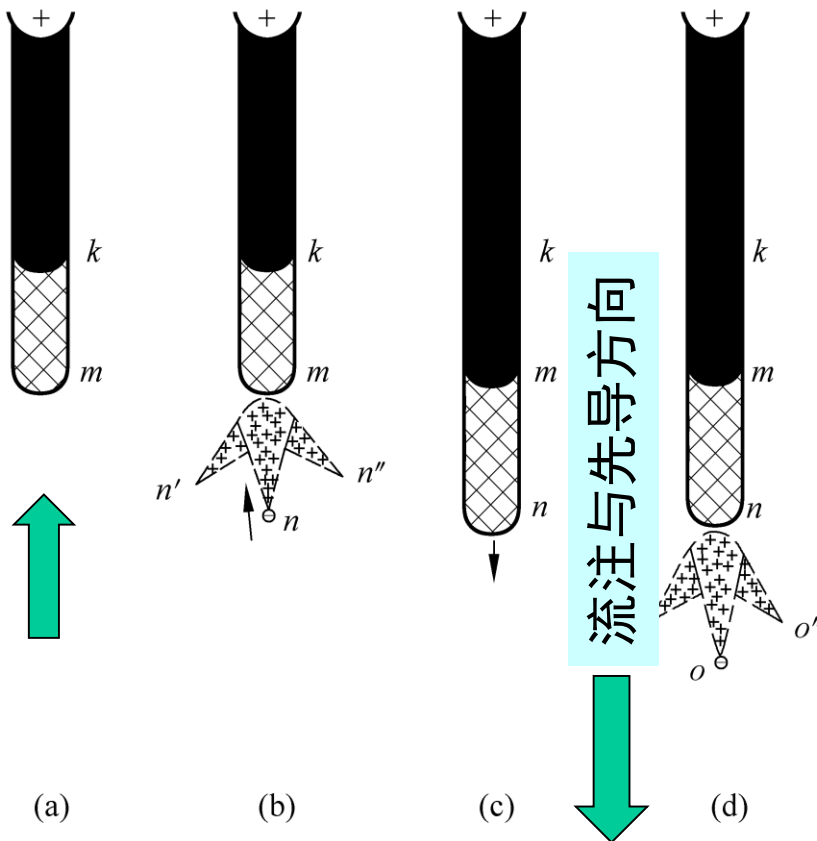
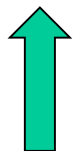




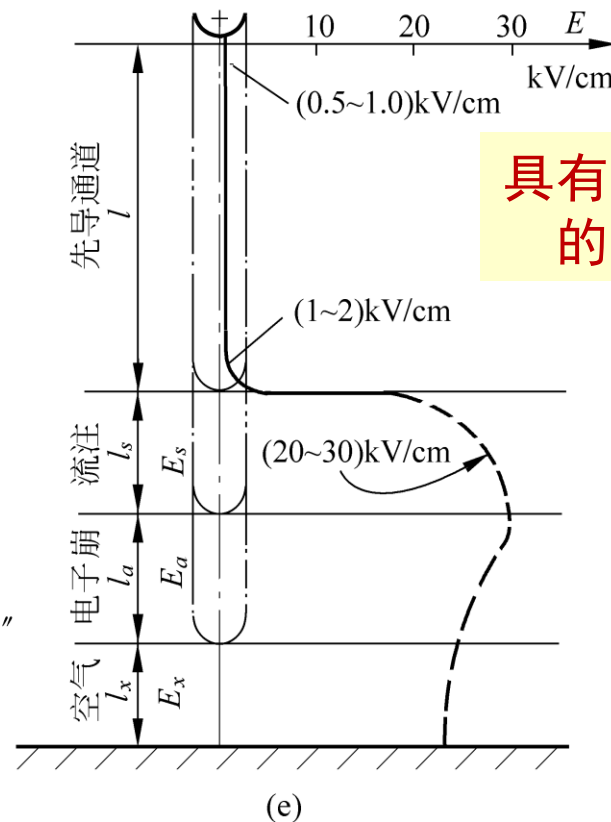
## 1.4.4 长间隙击穿过程

先导放电的存在使得长间隙的平均击穿场强大为下降

电子崩方向



流注与先导方向



具有热电离过程的  
先导通道

正棒-板间隙中先导通道的发展示意图

先导通道电荷密度 $10^{18}/\text{cm}^3$   
电流可达几百A

# 长间隙放电中的先导与流注

91.6

183.1

208

241.4

249.7

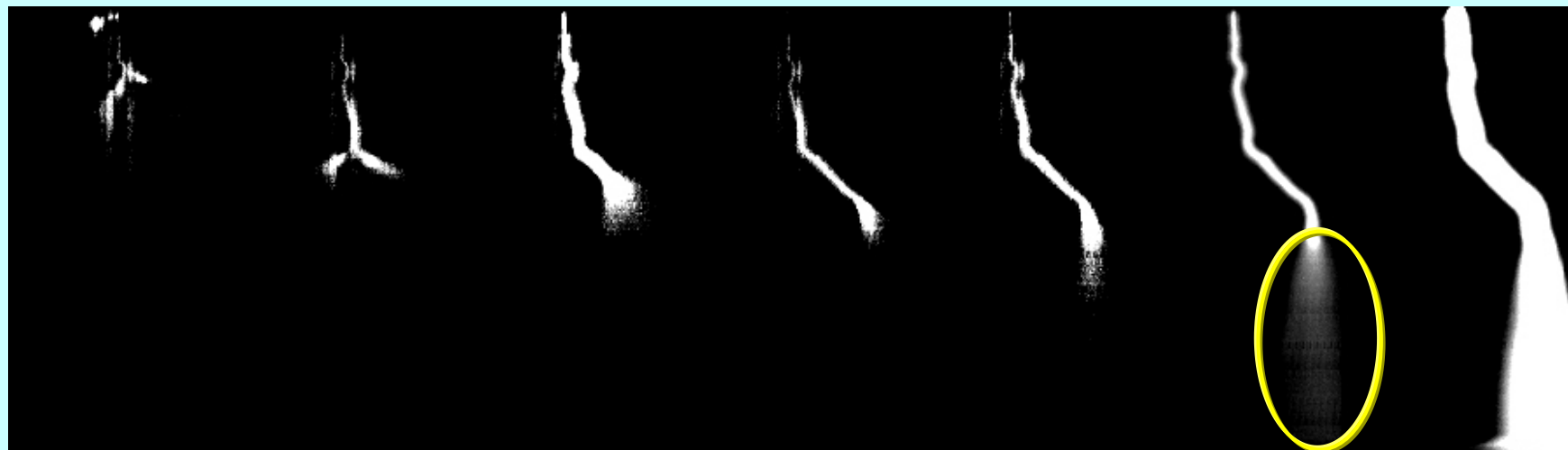
258

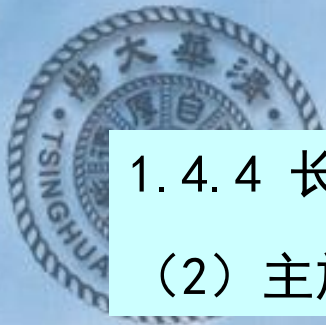
266.3  $\mu\text{s}$

(a)



(b)





#### 1.4.4 长间隙击穿过程

##### (2) 主放电

- 当先导通道头部发展到接近对面电极时，剩余间隙中场强剧增，放电十分强烈，并沿着先导通道反方向扩展到棒极，同时中和先导通道中多余的空间电荷，这个过程称为主放电过程。
- 主放电过程使贯穿两极间的通道最终改造成为温度很高的、电导很大的、轴向场强很小的等离子体火花通道（如电源功率足够，则转为电弧通道），从而使间隙完全失去了绝缘性能，间隙的击穿就完成了。
- 主放电阶段的放电发展速度很快，可达 $10^9\text{cm/s}$ 。



# 第1章 气体放电过程的分析

## 1.4 高气压下不均匀电场气体击穿的发展过程

### 1.4.1 电场不均匀程度的划分

均匀场、稍不均匀场、极不均匀场。电场不均匀系数 $f = E_{\max} / E_{\text{av}}$

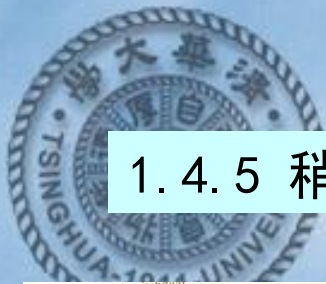
### 1.4.2 极不均匀电场气体的电晕放电

### 1.4.3 极不均匀电场的极性效应

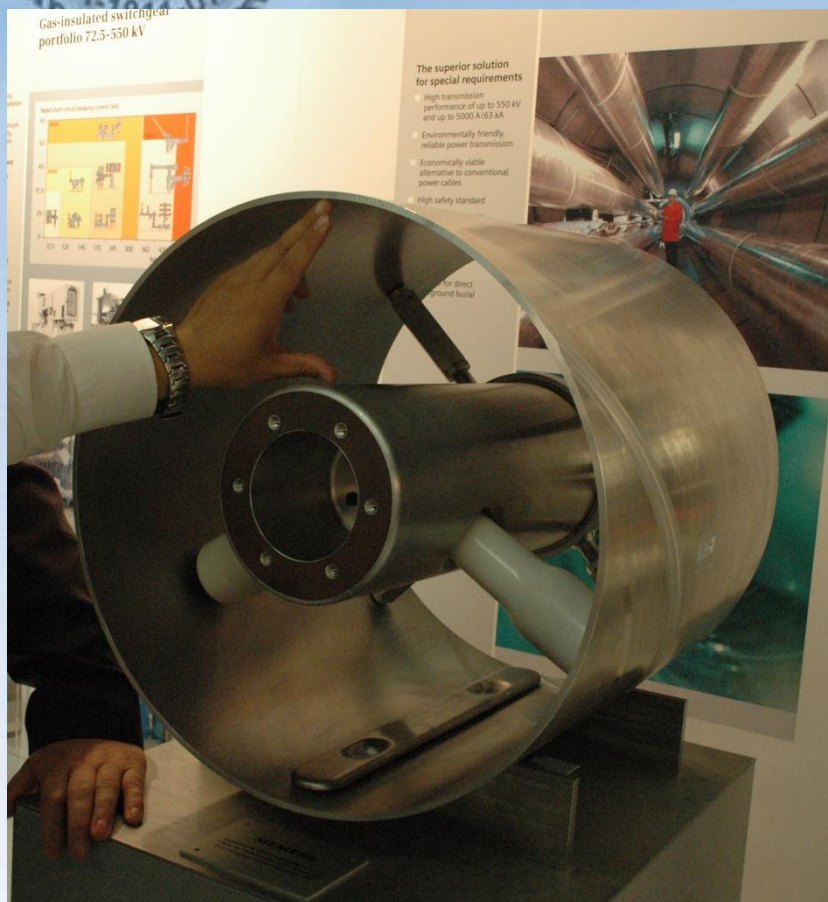
### 1.4.4 长间隙击穿过程

### 1.4.5 稍不均匀电场的自持放电条件与极性效应

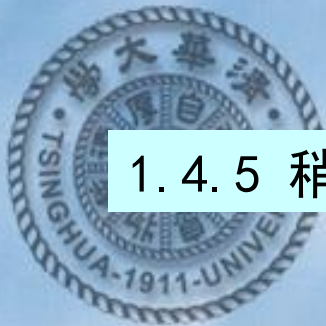




## 1.4.5 稍不均匀电场的自持放电条件与极性效应



采用稍不均匀场的  
气体绝缘开关  
气体绝缘管道



## 1.4.5 稍不均匀电场的自持放电条件与极性效应

采用稍不均匀场的高压测量球隙





### 1.4.5 稍不均匀电场的自持放电条件与极性效应

稍不均匀电场不会产生电晕现象；

流注一经产生即贯穿间隙，间隙击穿；

自持放电条件即击穿条件；

击穿电压的极性效应与极不均匀场相反，负极性击穿电压比正极性低

稍不均匀场空气间隙击穿电压的估算见第二章

