

第3讲

气体放电的物理过程

(二)



主要内容

- 气体中带电质点的产生和消失
- 气体放电机理
- 电晕放电
- 不均匀电场中气体击穿的发展过程
- 雷电放电



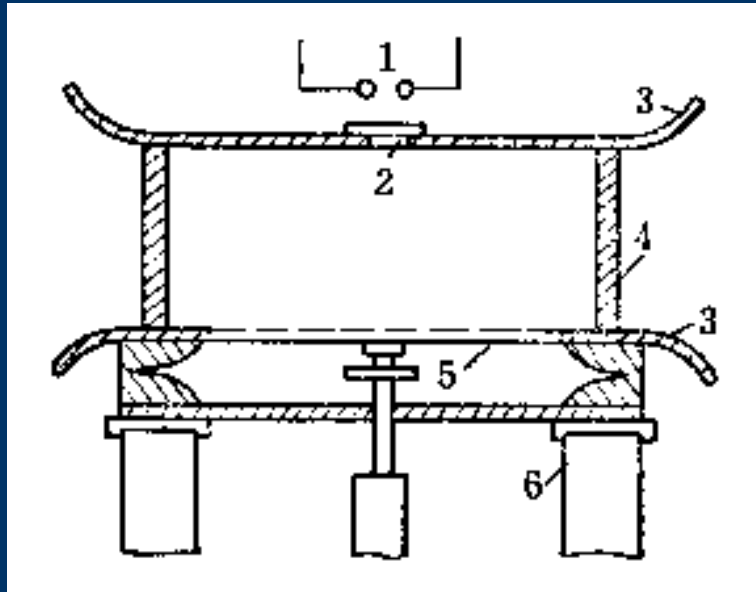
第二节 气体放电机理

1. 气体放电的主要形式
2. 汤森德放电理论
3. 流注放电理论

3、流注放电理论

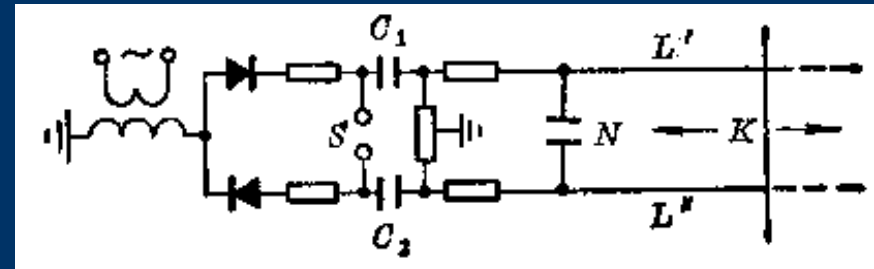
- **对象**：工程上感兴趣的压力较高的气体击穿，如大气压力下空气的击穿
- **特点**：认为**电子碰撞电离**及**空间光电离**是维持自持放电的主要因素，并强调了**空间电荷畸变电场**的作用
- 通过大量的**实验研究**（主要在电离室中进行的）说明放电发展的机理

电离室



电离室结构示意图

1—照射火花间隙；2—石英窗；3—电极
4—玻璃壁；5—橡皮膜；6—绝缘柱



研究放电时的电路图

N—电离室；S—火花间隙；
 L' 、 L'' 、K—短路回路

3、流注放电理论

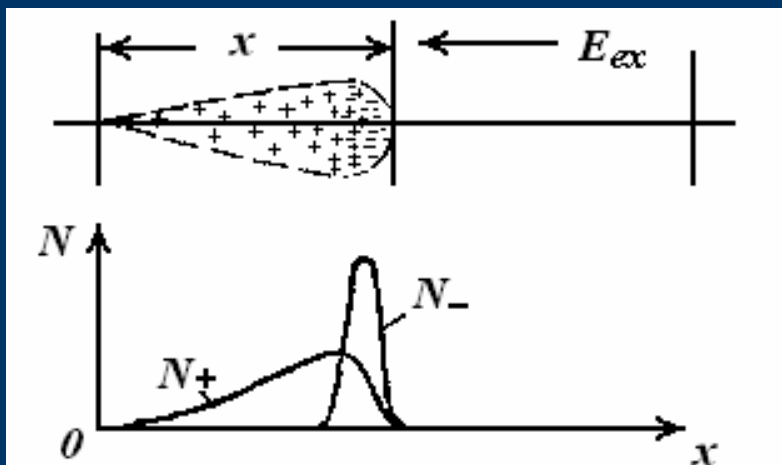
- 电子崩阶段 空间电荷畸变外电场
- 流注阶段 电离形成二次电子崩，等离子体
- 自持放电条件
- 流注理论对 δS 较大时放电现象的解释

■ 电子崩阶段

- ◆ **电子崩外形** 好似球头的锥体，空间电荷分布极不均匀，电子崩中的电子数： $n = e^{\alpha x}$

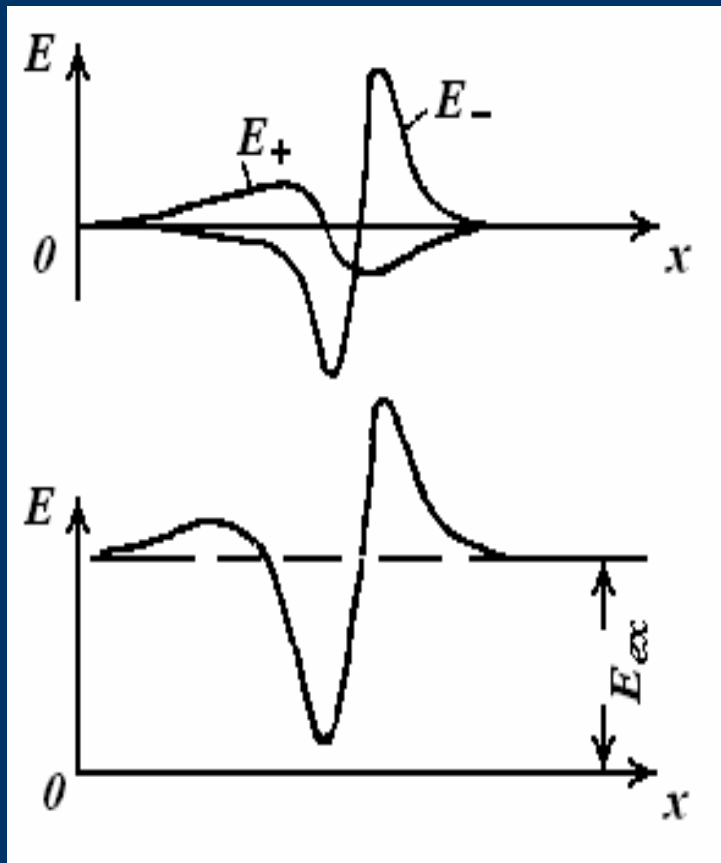
例如，正常大气条件下，若 $E = 30\text{kV} / \text{cm}$ ，则 $\alpha \approx 11\text{cm}^{-1}$ ，计算随着电子崩向阳极推进，崩头中的电子数

x / cm	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
n	9	27	81	245	735	2208	6634	19930	59874



◆ 空间电荷畸变了外电场

大大加强了崩头及崩尾的电场，削弱了崩头内正、负电荷区域之间的电场



电子崩头部

电场明显增强，电离过程强烈，有利于发生分子和离子的激励现象，当它们回复到正常状态时，发射出光子

崩头内部正负电荷区域

电场大大削弱，有助于发生复合过程，发射出光子

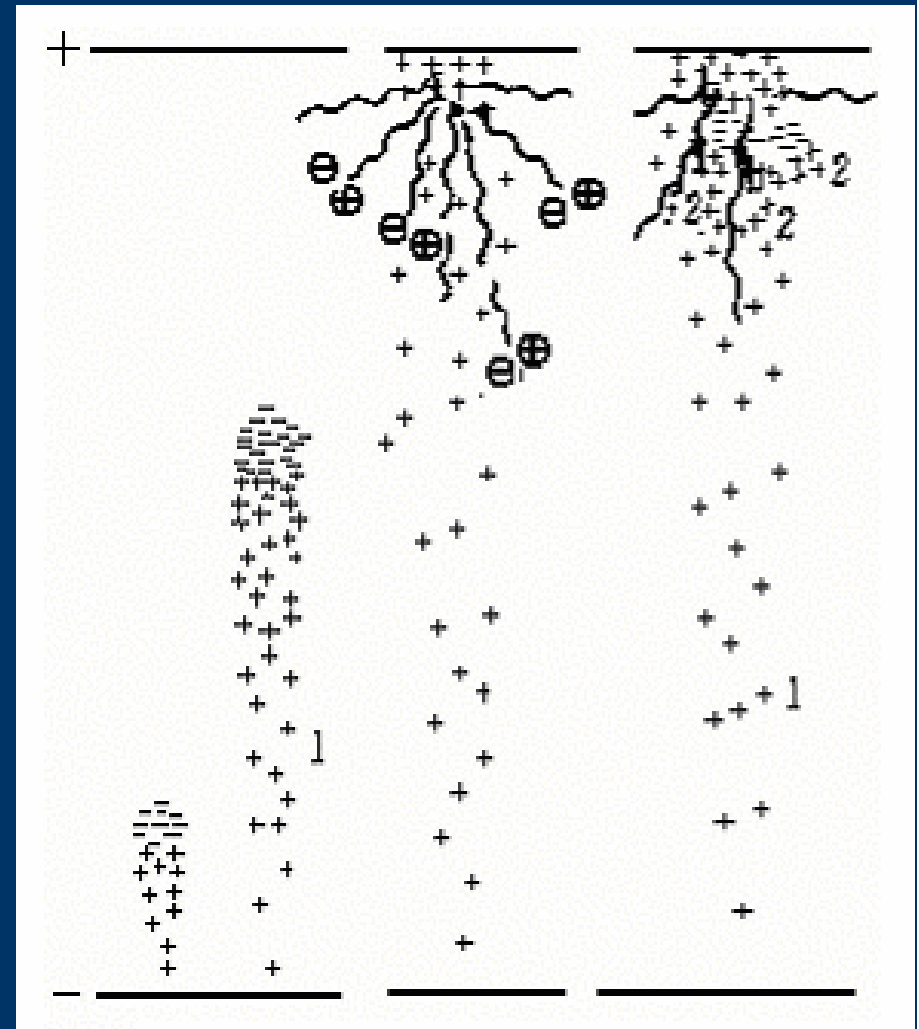
■ 流注阶段

◆ 光电离、二次崩

电子崩走完整个间隙后，大密度的头部正离子空间电荷大大加强了后部的电场，并向周围放射出大量光子

光子引起空间光电离，其中电子被主电子崩头部的正空间电荷所吸引，在受到畸变而加强了的电场中，造成了新的电子崩，称为二次电子崩

- 1: 主电子崩
- 2: 二次电子崩
- 3: 流注



◆ 正流注的形成

(外加电压等于击穿电压时)

二次电子崩中的电子进入主电子崩头部的正空间电荷区（电场强度较小），大多形成负离子。大量的正、负带电质点构成了等离子体，这就是正流注

流注通道导电性良好，其头部又是二次电子崩形成的正电荷，因此流注头部前方出现了很强的电场

1—主电子崩

2—二次电子崩

3—流注

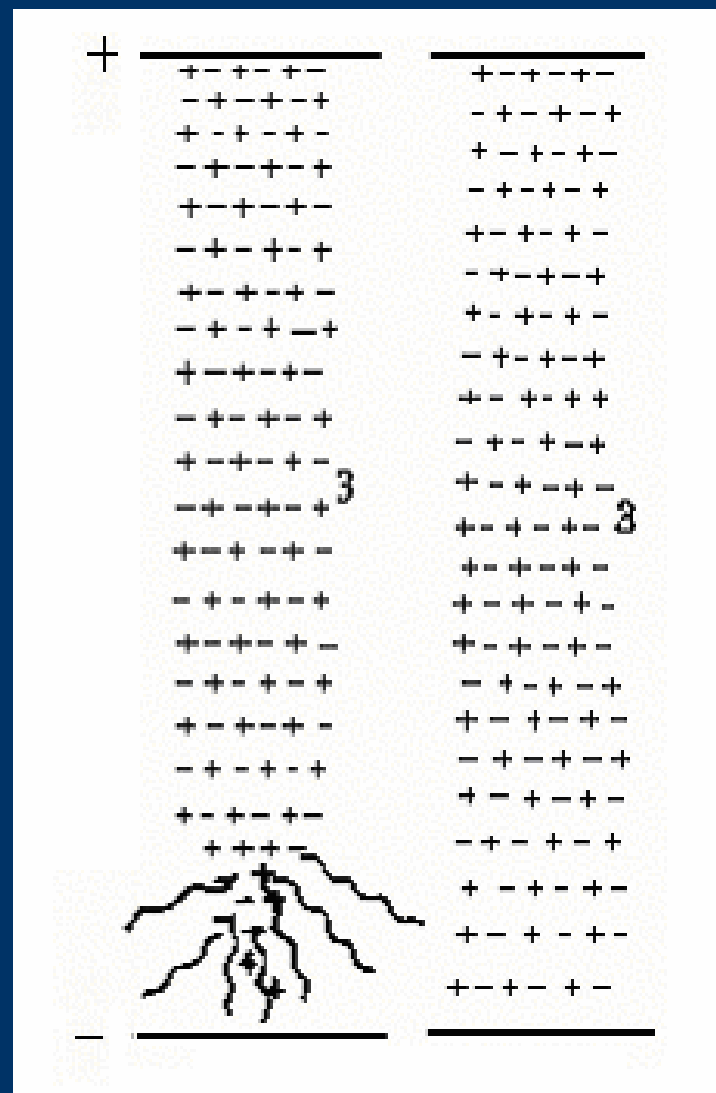


◆ 正流注向阴极推进

流注头部的电离放射出大量光子，继续引起空间光电离。流注前方出现新的二次电子崩，它们被吸引向流注头部，延长了流注通道

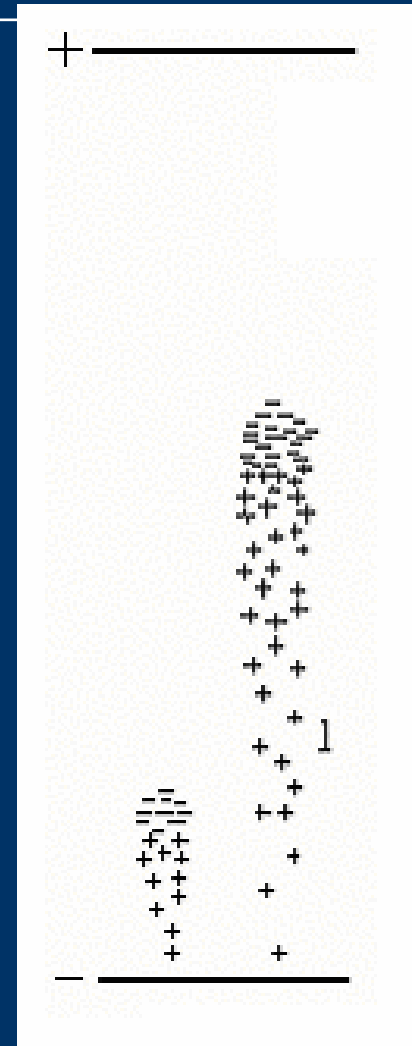
流注不断向阴极挺进，且随着流注接近阴极，其头部电场越来越强，因而其发展也越来越快

流注发展到阴极，间隙被导电良好的等离子通道所贯通，间隙的击穿完成，这个电压就是击穿电压



◆ 负流注的形成（电压高于击穿电压）

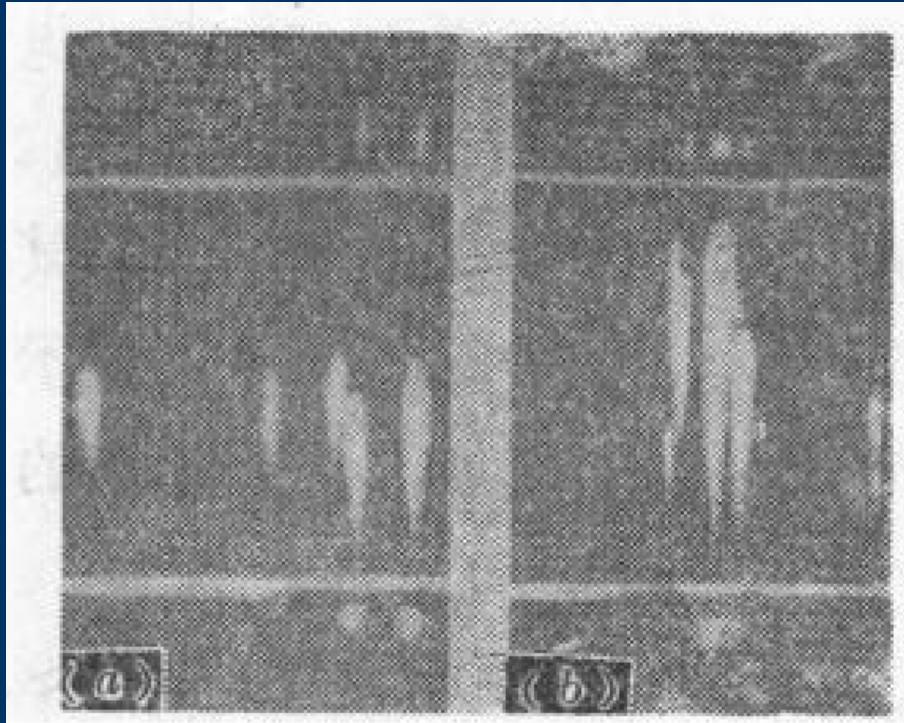
- 电压较低时，电子崩需经过整个间隙才形成流注，电压较高时，电子崩不需经过整个间隙，其头部电离程度已足以形成流注
- 主电子崩头部的电离很强烈，光子射到主崩前方，在前方产生新的电子崩，主崩头部的电子和二次崩尾的正离子形成混合通道，形成向阳极推进的流注，称为**负流注**
- 间隙中的正、负流注可以同时向两极发展。



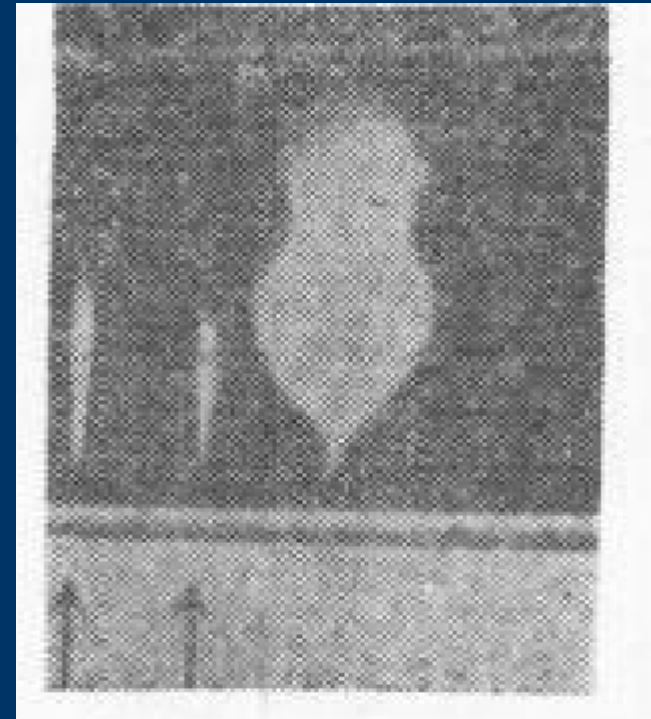
◆ 正流注的分支（高电压时）

- 在较高电压下，正流注的发展可能出现分支
- 均匀电场中形成流注的机制：初始电子崩头部的电荷必须积累到一定的程度，使电场畸变并加强到一定程度，已造成足够的空间光电离

试验测量结果：电子崩



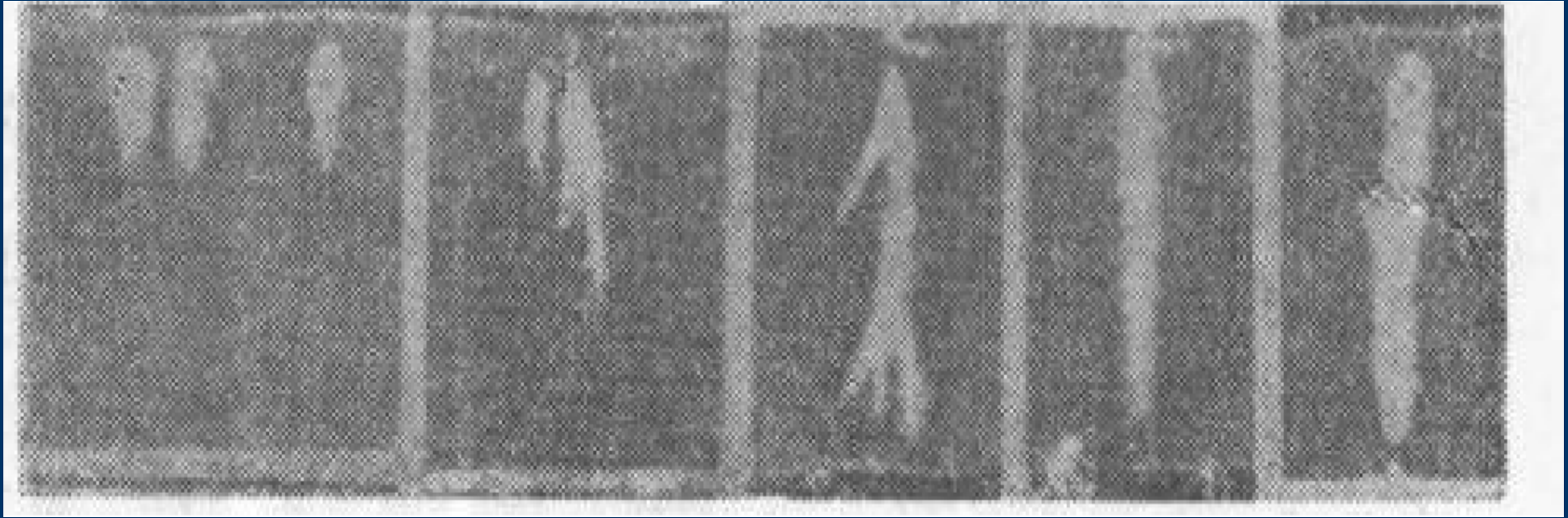
在电离室中得到的初始电子崩照片
图a和图b的时间间隔为 1×10^{-7} 秒
 $p=270$ 毫米汞柱， $E=10.5$ 千伏/厘米



初始电子崩转变为
流注瞬间照片
 $p=273$ 毫米汞柱， $E=12$ 千伏/厘米

电子崩在空气中的发展速度约为 1.25×10^7 cm/s 14

试验测量结果：正流注



在电离室中得到的阳极流注发展过段的照片

正流注的发展速度约为 $1 \times 10^8 \sim 2 \times 10^8 \text{ cm/s}$

试验测量结果

- 电子崩是沿着电力线直线发展，流注会出现曲折的分支
- 电子崩可以同时有多个互不影响地向前发展
- 当某个流注由于偶然的原因向前发展得更快时，其周围的流注会受到抑制
- 汤森德放电是弥散的一片，流注放电有明亮的细通道

3、流注放电理论

■ 自持放电条件

- 一旦形成流注，放电就进入了新的阶段，放电可以由本身产生的空间光电离而自行维持，即转入自持放电了
- 如果电场均匀，间隙就将被击穿。所以流注形成的条件就是自持放电条件，在均匀电场中也就是导致击穿的条件

■ 流注理论对 δS 较大时放电现象的解释

◆ 放电外形： δS 较大时，放电具有通道形式

流注中电荷密度很大，电导很大，其中电场强度很小。因此流注出现后，对周围空间内的电场有屏蔽作用，并且随着其向前发展而更为增强

当某个流注由于偶然原因发展更快时，将抑制其它流注的形成和发展，并且随着流注向前推进而越来越强烈

二次电子崩在空间的形成和发展带有统计性，
所以火花通道常是曲折的，并带有分枝

电子崩则不然，由于其中电荷密度较小，故电场强度还很大，因而不致影响到邻近空间内的电场，所以不会影响其它电子崩的发展，如图所示。这就可以说明，汤逊放电呈连续一片

■ 流注理论对 δS 很大时放电现象的解释

◆ 放电时间

光子以光速传播，所以流注发展速度极快，这就说明 δS 很大时放电时间特别短的现象

◆ 阴极材料的影响

根据流注理论，维持放电自持的是空间光电离，而不是阴极表面的电离过程，这可说明为何很大 δS 下击穿电压和阴极材料基本无关了

流注理论现存的问题

- 只有放电的定性描述，没有定量描述
- 缺少数学模型
- 太依赖于实验



主要内容

- 气体中带电质点的产生和消失
- 气体放电机理
- 电晕放电
- 不均匀电场中气体击穿的发展过程
- 雷电放电



第三节 电晕放电

1. 发生电晕放电现象的条件
2. 电晕放电效应
3. 对工程实践的重要意义

不均匀系数 f

引入电场不均匀系数 f 表示各种结构的电场的均匀程度

$$f = \frac{E_{\max}}{E_{av}}$$

$$E_{av} = \frac{U}{d}$$

$f < 2$, 稍不均匀电场

$f > 4$, 极不均匀电场

1、发生电晕放电现象的条件

- 电场比较均匀的情况

放电达到自持时， α 在整个间隙中部已达到相当数值。这时和均匀电场中情况类似

- 电场不均匀程度增加但仍比较均匀的情况

大曲率电极附近 α 达到足够数值，间隙中很大一部分区域 α 也都已达相当数值，流注一经产生，随即发展至贯通整个间隙，导致间隙完全击穿

1、发生电晕放电现象的条件

■ 电场极不均匀的情况

大曲率电极附近很小范围内 α 已达相当数值时，间隙中大部分区域值 α 都仍然很小，放电达到自持放电后，间隙没有击穿

电场越不均匀，击穿电压和电晕起始电压间的差别也越大

局部强场区的放电过程造成-----自持放电

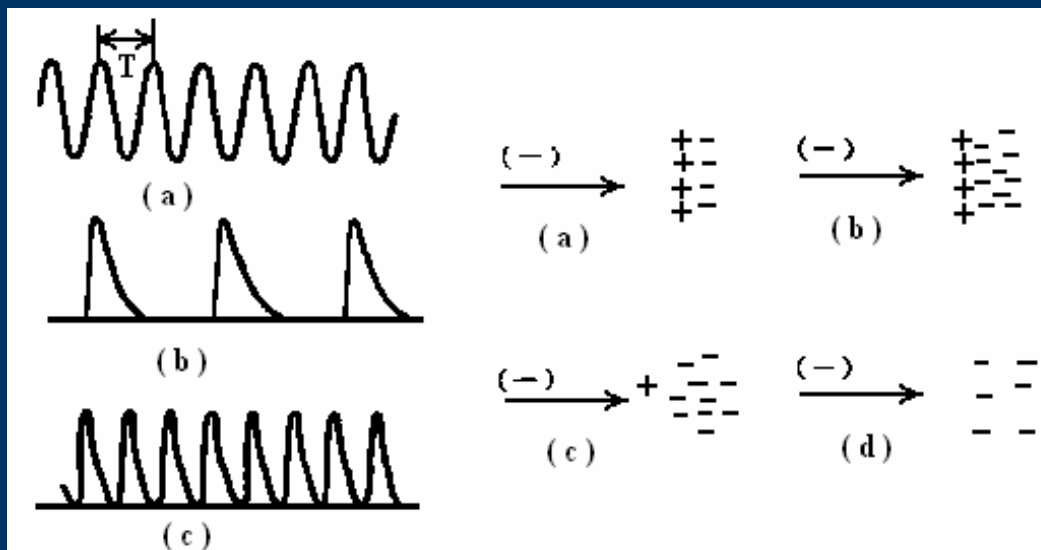
2、电晕放电的效应

- 滋滋的声音、臭氧的气味、电极附近空间蓝色的晕光
- 化学反应产生新物质
- 回路电流明显增加(绝对值仍很小), 可以测量到能量损失
- 产生高频脉冲电流-----干扰源

高频脉冲电流

■ 尖极为负的电晕

1. 到一定值时，有规律的重复电流脉冲，平均电流为 μA
2. 升高脉冲幅值基本不变，频率增高，平均电流增大
3. 再升高，电晕电流为持续电流，平均值继续增大
4. 继续升高，出现不规则的电流脉冲，幅值大得多---流注型



(a) 时间刻度 $T=125\mu\text{s}$

(b) $0.7\mu\text{A}$ 电晕电流平均值

(c) $2\mu\text{A}$ 电晕电流平均值

高频脉冲电流

■ 尖极为正的电晕

1. 电压达到一定值，电晕电流为无规律的重复电流脉冲
2. 电压升高，脉冲特性愈来愈不显著，电晕电流转变为持续电流
3. 电压继续升高，出现幅值大得多的不规则的流注型电晕电流脉冲

2、电晕放电的效应

- 对工程实践有重要意义

不利影响： 能量损失；放电脉冲引起的高频电磁波干扰；化学反应引起的腐蚀作用等

有利方面： 电晕可削弱输电线上雷电冲击电压波的幅值及陡度；利用电晕放电改善电场分布，提高击穿电压；利用电晕放电除尘等

3、直流输电线上的电晕

■ 单导线表面电晕的临界场强

皮克实验：同心圆筒

$$E_{cor} = 31.5\delta\left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{r_0\delta}}\right) \text{ (kV/cm)}$$

r_0 ：起晕导线的半径，cm；

δ ：空气的相对密度。

适用导线与平行平面电极之间的电晕放电

3、直流输电线上的电晕

- 双平行导线表面电晕的临界场强 皮克实验

$$E_{cor} = 30.3\delta\left(1 + \frac{0.298}{\sqrt{r_0\delta}}\right) \quad (\text{kV/cm})$$

$$U_{cor} = E_{cor} r_0 \ln \frac{2H}{r_0} \quad (\text{kV})$$

$2H$: 两平行起晕导线间的距离, cm

U_{cor} : 导线相对零电位平面的电压

- 双平行导线的起晕电压比单导线的要低
原因: 导线周围空间电荷对电场的影响

3、交流输电线上的电晕

■ 单导线表面电晕的临界场强 皮克实验

$$E_{cor} = 21.4m_1m_2\delta\left(1 + \frac{0.298}{\sqrt{r_0\delta}}\right) \text{ [kV(eff)/cm]}$$

r_0 : 起晕导线的半径, cm;

δ : 空气的相对密度;

m_1 : 导线表面状态系数, 0.8 ~ 1.0;

m_2 : 气象系数, 0.8 ~ 1.0。

3、交流输电线上的电晕

- 三相导线对称排列，导线表面电晕的临界场强

$$E_{cor} = 21.4m_1m_2\delta\left(1 + \frac{0.298}{\sqrt{r_0\delta}}\right) \text{ [kV(eff)/cm]}$$

r_0 : 起晕导线的半径, cm;

δ : 空气的相对密度;

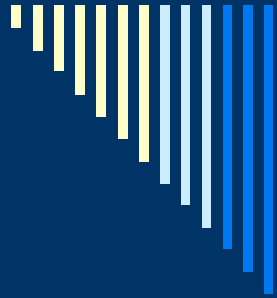
m_1 : 导线表面状态系数, 0.8 ~ 1.0;

m_2 : 气象系数, 0.8 ~ 1.0。



主要内容

- 气体中带电质点的产生和消失
- 气体放电机理
- 电晕放电
- 不均匀电场中气体击穿的发展过程
- 雷电放电



第四节

不均匀电场中气体击穿的发展过程

1. 短间隙的放电过程
2. 长间隙的放电过程

1、极不均匀电场中的放电过程（短间隙）

- 非自持放电阶段
- 流注发展阶段

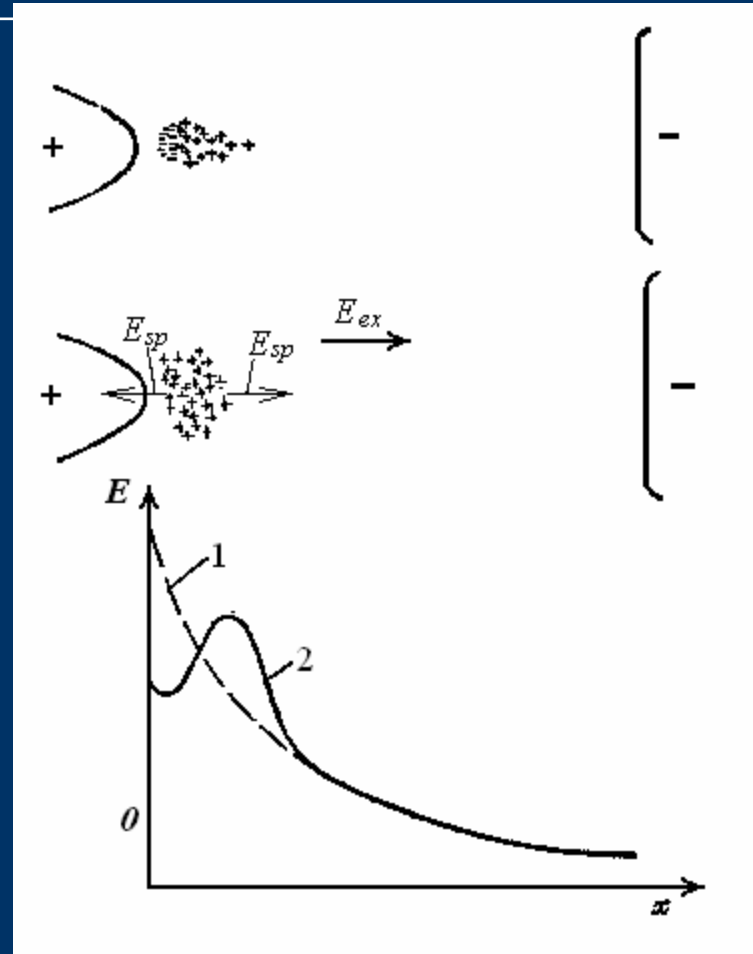
1、极不均匀电场中的放电过程（短间隙）

以棒—板间隙为例

■ 非自持放电阶段

当棒具有正极性时

在棒极附近，积聚起正空间电荷，减少了紧贴棒极附近的电场，而略微加强了外部空间的电场，棒极附近难以造成流注，使得自持放电、即电晕放电难以形成



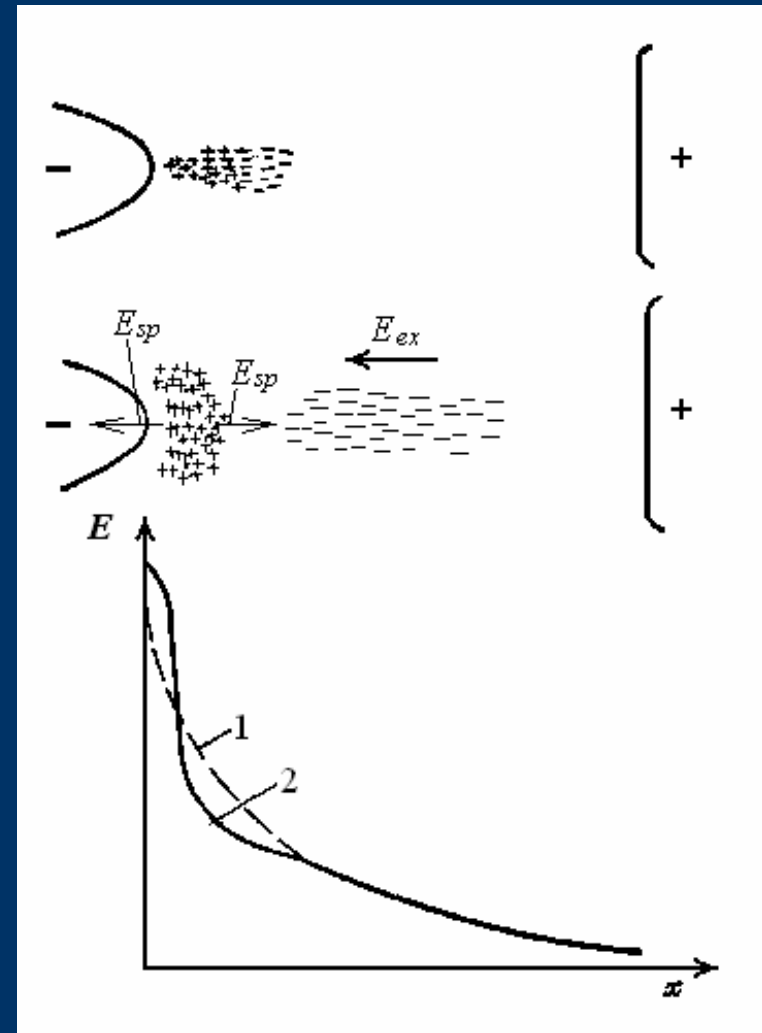
E_{ex} —外电场

E_{sp} —空间电荷的电场²⁸

当棒具有负极性时

电子崩中电子离开强电场区后，不再引起电离，正离子逐渐向棒极运动，在棒极附近出现了比较集中的正空间电荷，使电场畸变

棒极附近的电场得到增强，因而自持放电条件就易于得到满足、易于转入流注而形成电晕放电



E_{ex} —外电场

E_{sp} —空间电荷的电场²⁹

极性效应

实验表明：

棒—板间隙中棒为正极性时电晕
起始电压比负极性时略高

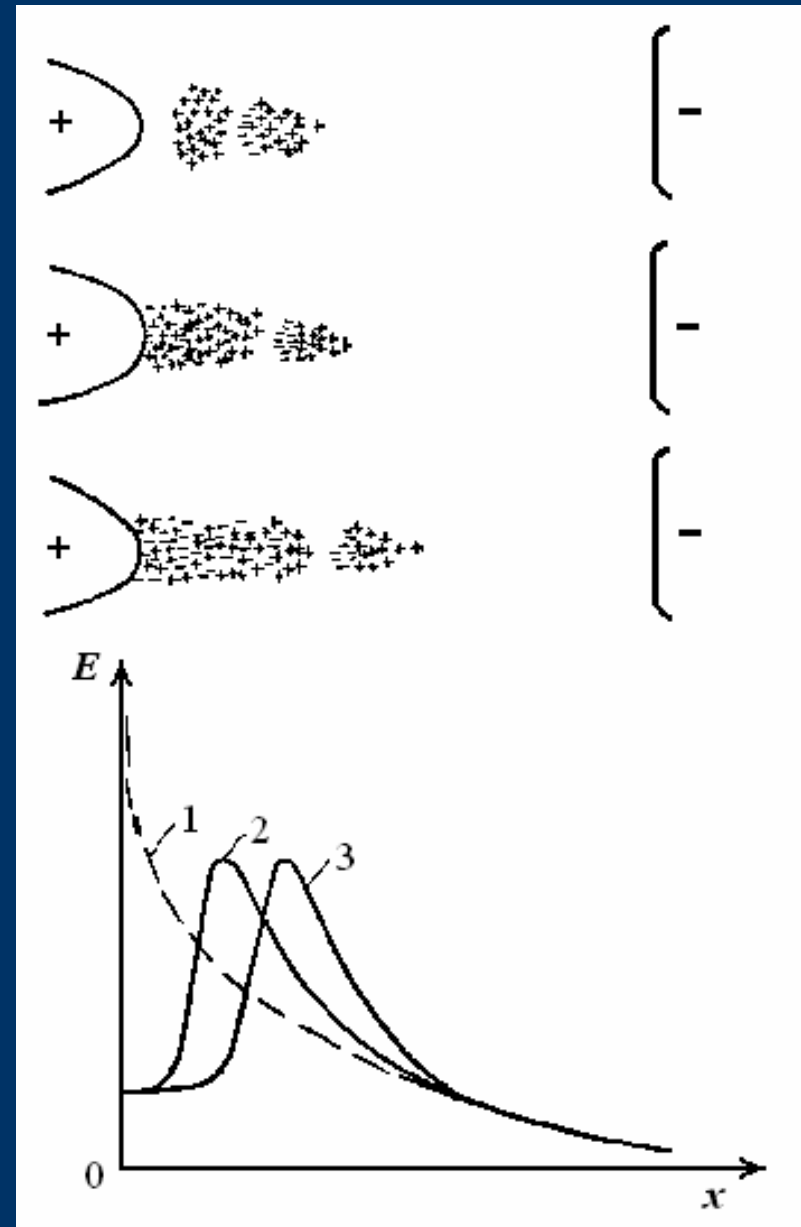
■ 流注发展阶段

当棒具有正极性时

电子崩进入棒电极，正电荷留在棒尖加强了前方（板极方向）的电场（曲线2）

电场的加强对形成流注发展有利。头部前方产生新电子崩，吸引入流注头部正电荷区内，加强并延长流注通道

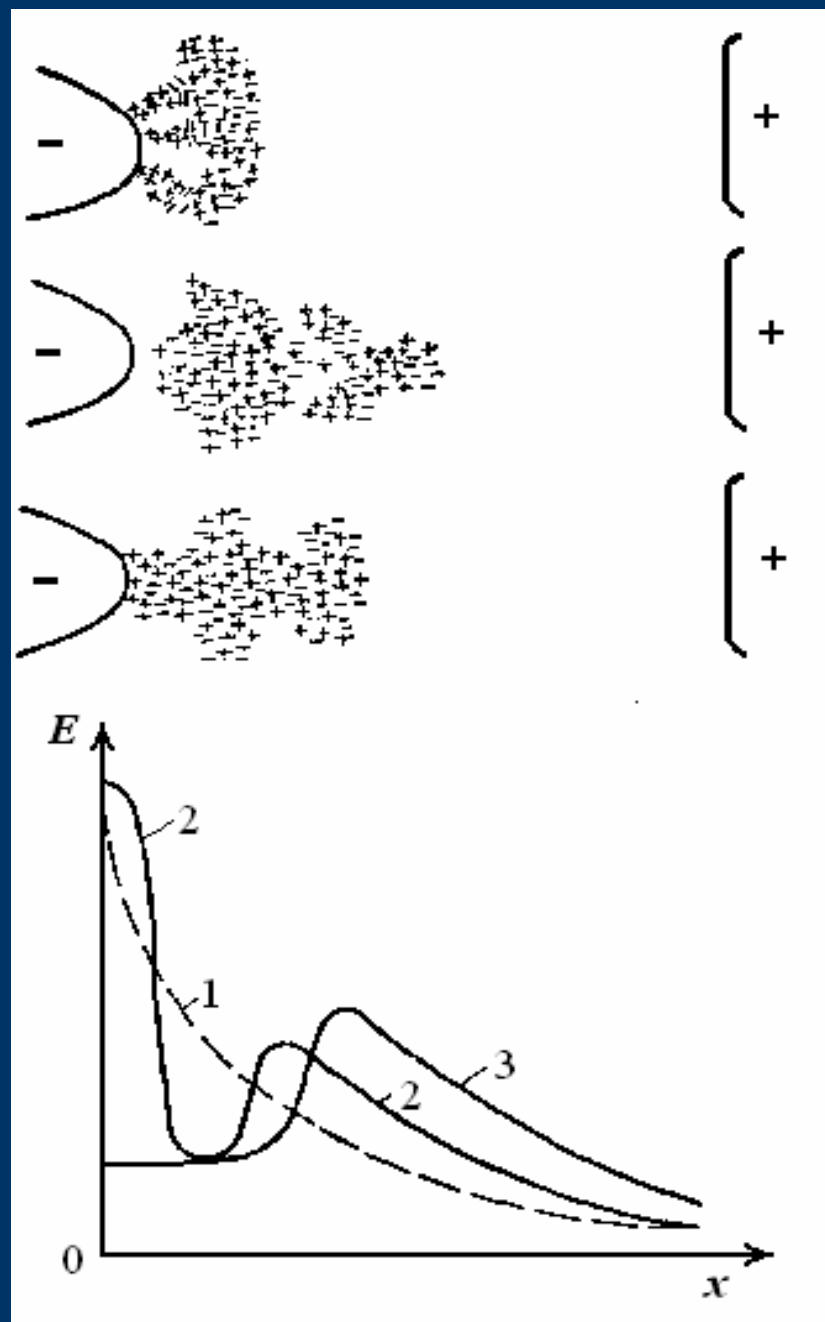
流注及其头部的正电荷使强电场区更向前移（曲线3），促进流注通道进一步发展，逐渐向阴极推进，**形成正流注**



当棒具有负极性时

电子崩由强场区向弱场区发展，对电子崩发展不利。棒极前的正电荷区消弱了前方（阳极方向）空间的电场，使流注发展不利（曲线2）

等离子体层前方电场足够强后，发展新电子崩，形成了大量二次电子崩，汇集起来后使得等离子体层向阳极推进，**形成负流注**



极性效应

实验表明：

棒—板间隙中棒为负极性时击穿电压
比正极性时高

放电进一步发展

- 外电压较低时，流注通道深入间隙一段距离后，就停止不前了，形成电晕放电或刷状放电
- 外电压足够高时，流注通道将一直达到另一电极，从而导致间隙完全击穿

2、极不均匀电场中的放电过程（长间隙）

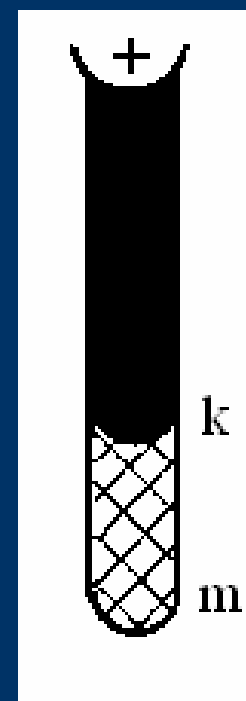
- 非自持放电阶段
- 流注发展阶段
- 先导放电 —— 热电离过程
- 主放电阶段

■ 先导放电

先导通道

流注通道发展到足够的长度后，将有较多的电子循通道流向电极，通过通道根部的电子最多，于是流注根部温度升高，出现了热电离过程

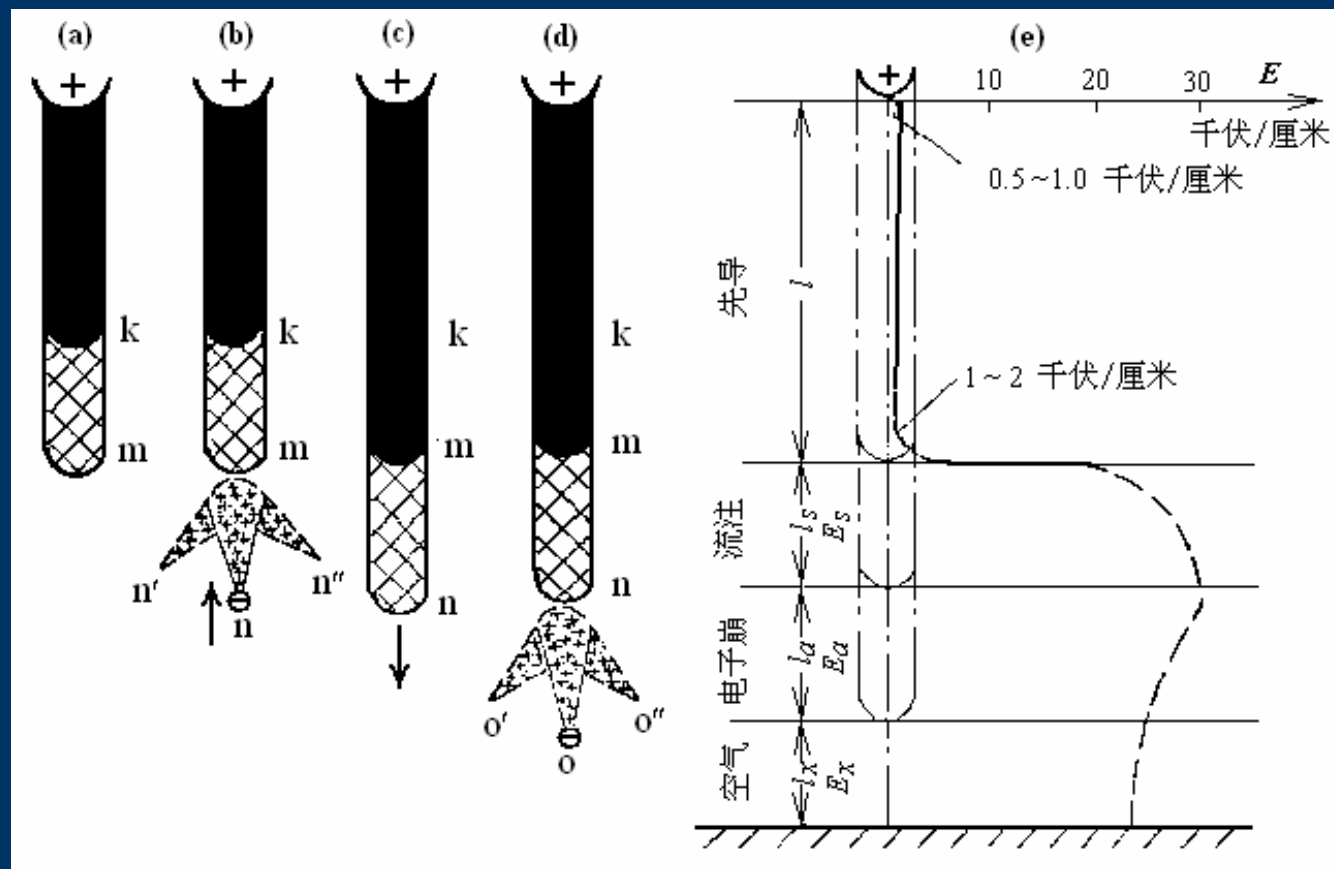
这个具有热电离过程的通道称为
先导通道



正棒—负板间隙中
先导通道

■ 先导放电

正棒—负板间隙中
先导通道的发展

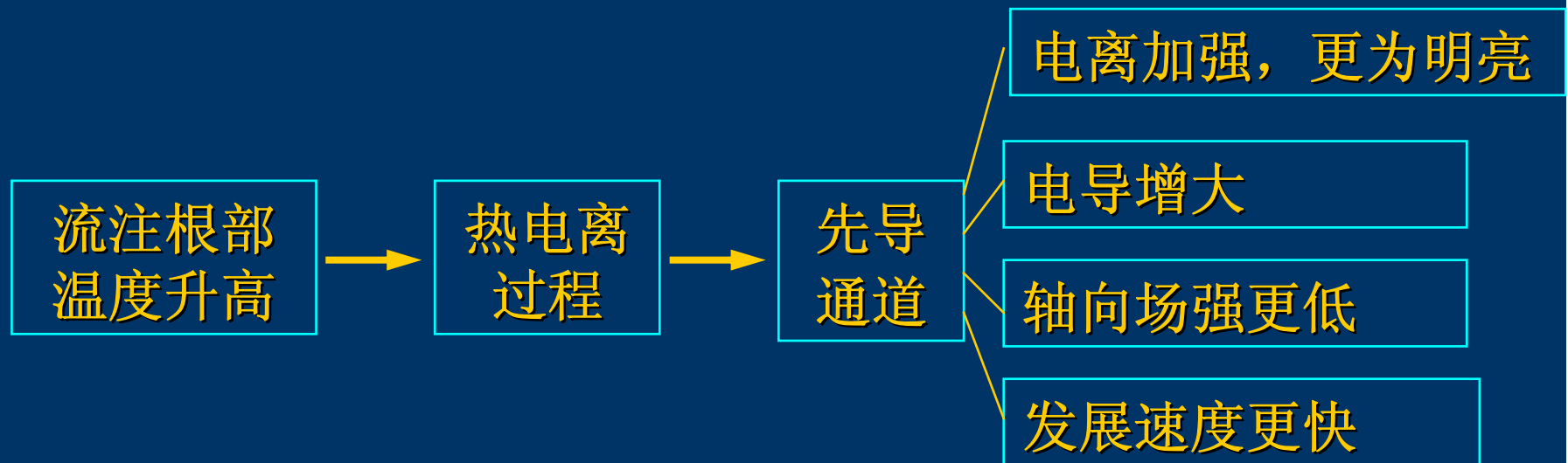


(a) 先导和其头部的流注km (b) 流注头部电子崩的形成

(c) km由流注转变为先导和形成流注mn (d) 流注头部电子崩的形成

(e) 沿着先导和空气间隙电场强度的分布

正先导



长空气间隙的平均击穿场强远低于短间隙

负先导

- 负棒—正板，正空间电荷大大加强棒极附近原已很强的电场，该区域发生强烈的电离，高场强和大电流密度，使棒极附近产生热电离，形成负先导
- 负空间电荷在通道前端形成反向电场—电场屏蔽，屏蔽减弱后，发展新负流注、新负先导，因此，负先导具有分级的特性
- 前伸的平均速度是正先导的 $1/5\sim 1/3$

迎面先导

- 条件:

- 上电极为正先导，下电极的几何结构能提供局部强场

- 上电极为负先导，下电极的几何结构无特殊要求，平板、尖端

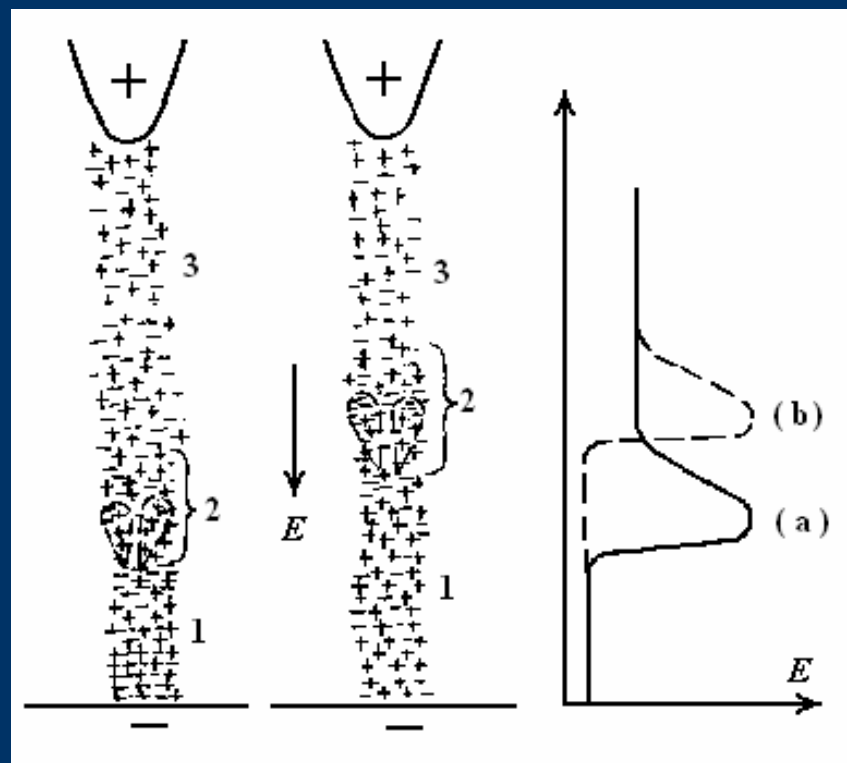
- 雷电放电多为负先导，接地的建筑物上可产生向上的迎面先导，其影响到下行先导的发展路线及雷击点

■ 主放电

主放电发展和通道中轴向电场强度分布图

当**先导**通道头部极为接近板极时，间隙场强可达极大数值，引起强烈的电离，间隙中出现离子浓度远大于先导通道的等离子体

新出现的通道大致具有极板的电位，在它与先导通道交界处保持极高的电场强度，继续引起强烈的电离



- 1—— 主放电通道
- 2—— 主放电和先导通道的交界区
- 3—— 先导通道

■ 主放电

高场强区（强电离区）迅速向阳极传播，强电离通道也迅速向前推进，这就是主放电过程

主放电过程使贯穿两电极间的先导通道最终成为温度很高、电导很大、轴向电场很小的等离子体通道

第五节 雷电放电

- 雷电放电主要研究**雷云对大地放电**
表面空间电场强度 $>25\sim30\text{kV/cm}$
- **上行雷、下行雷**
- **90%是负极性雷**，即雷云流入大地电荷为负
- 下行负极性雷分三个阶段：
先导放电、主放电、余光放电
- 雷电放电有**后续分量**，几个到十几个

1、雷电的先导过程

- 下行负先导，先导过程逐级发展，平均速度约为 $(1\sim 8) \times 10^5 \text{m/s}$ ，延续约几毫秒
- 先导通道中电荷量平均为 $0.5\sim 5 \text{C/km}$ ，平均电流为 $150\sim 1500 \text{A}$ 。其中高温导电部分的直径为 mm 级，轴向场强为几百伏/厘米，外围电离区的半径超过 6m
- 先导中心根部（在云中）对地电势约为 $50\sim 100 \text{MV}$ ；先导头部的对地电势为 $20\sim 80 \text{MV}$

1、雷电的先导过程

- 接地的建筑物上可产生向上的**迎面先导**，其影响到下行先导的发展路线及雷击点
- **高电导、高温、具极高电位的**先导通电将雷云到大地之间的**气隙击穿**，通道中有大量的与雷云同极性的电荷

2、雷电的主放电过程

- 先导头部对地极大的电位差作用在剩余短间隙（流注）上，**强烈的电离**：
电子迅速流入大地，形成雷电流的波前部分
正离子与先导通道中的负电荷中和
- 主放电通道**温度**达 $(2\sim 3)\times 10^4\text{K}$ ，**压力**初期达几十个大气压，**发展速度**约为 $(0.05\sim 0.5)c$
- 主放电过程中通道明亮，发出巨大的雷声，产生幅值很大（几十至几百千安）、近百微秒（不超过 $50\sim 100\mu\text{s}$ ）的冲击电流

3、雷电的后续分量

- 雷云中存在多个电荷聚集中心
- 主放电后，临近的电荷中心对第一电荷中心放电，并沿老通道继续向地发展，形成后续分量
- 电流幅值为第一分量的 $1/2\sim 1/3$ ， $2\sim 100\text{KA}$ ；电流波前时间平均为 $0.5\sim 1\mu\text{s}$ （陡度上升），电流波尾平均约为 $40\mu\text{s}$ （较短）
- 分量数多达 $10\sim 30$ 个，平均 $3\sim 4$ 个，间隔时间约为几十毫秒，平均约为 $40\sim 65\text{ms}$

雷电放电



雷电放电



作业

- 1、空气主要由氮和氧组成，其中氧分子的电离电位较低，为 **12.5V**。
 - (1) 若由电子碰撞使其电离，求电子的最小速度；
 - (2) 若由光子碰撞使其电离，求光子的最大波长，它属于那种性质的射线？
 - (3) 若由气体分子自身的平均动能产生热电离，求气体的最低温度。
- 2、试论述气体放电过程的 α 、 γ 系数。
- 3、什么叫巴申定律？在何种情况下气体放电不遵循巴申定律？
- 4、均匀电场和极不均匀电场气隙放电机理、放电过程和放电现象有何不同？
- 5、长间隙放电与短间隙放电的本质区别在哪里？试解释长空气间隙的平均击穿场强远低于短间隙的原由，形成先导过程的条件是什么？

录像