

第2讲

气体放电的物理过程

(一)



Thunderbolt
www.webshots.com



气体放电

研究在电场作用下，气体间隙中带电粒子的形成和运动过程

- 气隙中带电粒子是如何形成的
- 气隙中的导电通道是如何形成的
- 气隙中导电通道形成后是如何维持持续放电的



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



名词解释

- ◆ 激励
- ◆ 电离
- ◆ 电子平均自由行程
- ◆ 复合
- ◆ 电子崩

原子激励

原子能级 以电子伏为单位

$$1\text{eV} = 1\text{V} \times 1.6 \times 10^{-19}\text{C} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$$

原子激励

原子在外界因素作用下，其电子跃迁到能量较高的状态，所需能量称为激励能 W_e ，原子处于激励态

激励状态恢复到正常状态时，辐射出相应能量的光子，光子（光辐射）的频率 ν ， h 普朗克常数

$$W_e = h\nu$$

原子激励

- 原子处于激励态的平均寿命只有 $10^{-7}\sim 10^{-8}$ 秒
- 激励电位: $U_e = W_e / e$
- 几种气体和金属蒸汽的第一激励电位
 - N: 6.3 V, N₂: 6.1 V
 - O: 9.1V,, O₂: 没有
 - Cs: 1.38V (最小)
- 原子具有亚稳激励态, 其寿命长 $10^{-4}\sim 10^{-2}$ 秒

原子电离

原子电离

在外界因素作用下，其一个或几个电子脱离原子核的束缚而形成自由电子和正离子

电离过程所需要的能量称为电离能 W_i (ev)，也可用电离电位 U_i (v)

分级电离

通过亚稳激励态

原子电离

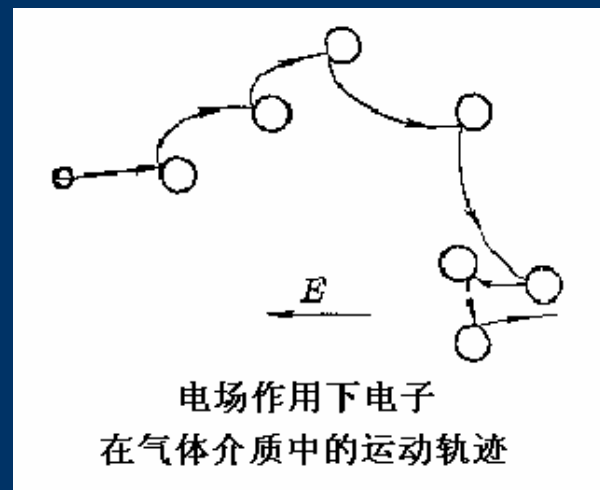
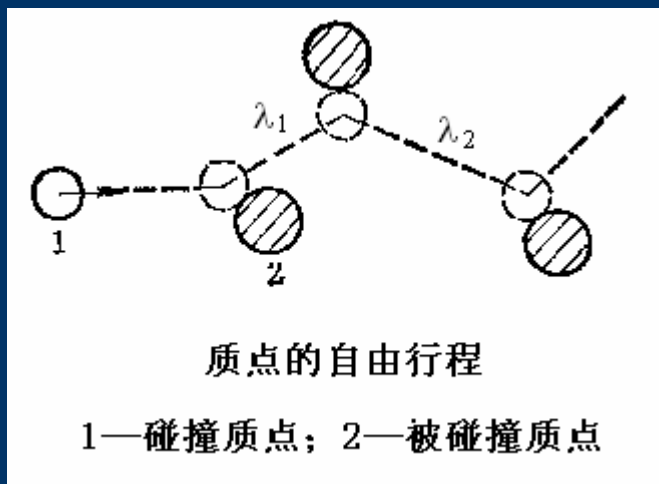
几种气体的第一电离电位

N: 14.5 V, N₂: 15.5 V

O: 13.6 V, O₂: 12.2 V

Cs: 3.88V

质点的平均自由行程



自由行程

一个质点在与气体分子相邻两次碰撞之间自由地通过的行程

平均自由行程 (λ)

自由行程具有统计性， λ 定义为质点自由行程的平均值

质点的平均自由行程

- 气体中电子和离子的自由行程是它们和气体分子发生碰撞时的行程
- 电子的平均自由行程要比分子和离子的自由行程大得多
- 气体分子密度越大，其中质点的平均自由行程越小。对于同一种气体，其分子密度和该气体的密度成正比，空气中电子 $\lambda_e=10^{-5}$ cm

$$\lambda \propto \frac{T}{p}$$

质点的平均自由行程

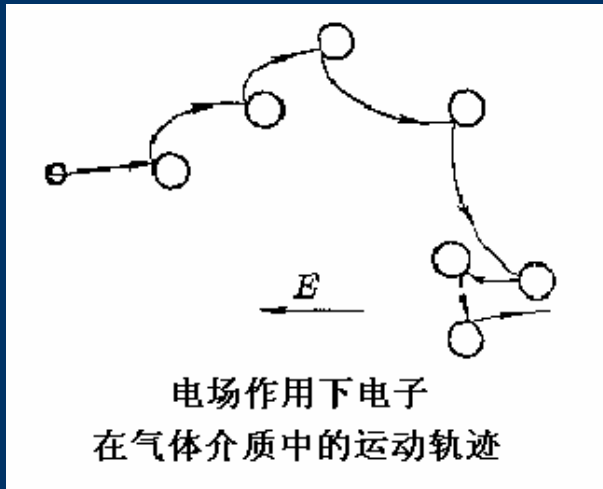
- 自由行程的分布：具有统计性的规律。质点的自由行程大于 x 的概率为

$$f(x) = e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

- 如果起始有 n_0 个质点（或一个质点的相继 n_0 次碰撞），则其中行过距离 x 后，尚未被碰撞的质点数（或次数） $n(x)$ 应为

$$n(x) = n_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

质点的平均自由行程



电子在其自由行程内从外电场获得动能，能量除决定于电场强度外，还和其自由行程有关

第一节 气体中带电质点的产生和消失

■ 气体中带电质点的产生

(一) 气体分子本身的电离，可由下列因素引起：

(1) 电子或正离子与气体分子的碰撞电离

(2) 各种光辐射（光电离）

(3) 高温下气体中的热能（热电离）

(4) 负离子的形成

(二) 气体中的固体或液体金属的表面电离

1、碰撞电离（撞击电离）

- **必要条件** 撞击质点所具有的总能量（包括**动能和势能**）大于被撞击质点在该种状态下所需的电离能
- 需要一定的相互用用的时间和条件
- 仅考虑动能，在**电场作用下**，撞击质点被加速而获得动能。将可能引起碰撞电离的条件

$$\frac{1}{2}m_e v_e^2 \geq W_i$$

m_e : 电子的质量

v_e : 电子的速度

W_i : 气体分子的电离能

1、碰撞电离（撞击电离）

- 碰撞电离的形成与电场强度和平均自由行程的大小有关
- 气体放电中，碰撞电离主要是电子和气体分子碰撞而引起的

2、光电离

- 光辐射引起的气体分子的电离过程称为光电离
自然界、人为照射、气体放电过程
- 光子能量满足下面条件，将引起光电离，分解成电子（**光电子**）和正离子

$$h\nu \geq W_i$$

- 光辐射能够引起光电离的临界波长（即最大波长）：

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eU_i} = \frac{1234}{U_i} \quad \text{nm}$$

2、光电离

- 铯蒸汽的电离电位最小（**3.88V**），产生直接光电离的波长应小于**318 nm**（紫外）
- 对所有气体来说，在可见光（**400~750nm**）的作用下，一般是不能发生直接光电离的
- 分级电离
- 光电离在气体放电中起重要作用

反激励、复合释放具有一定能量的光子(具有较大的初始速度)

3、热电离

- 因气体热状态引起的电离过程称为热电离

$$\bar{W}_m = \frac{3}{2}KT$$

K ：波尔茨曼常数

$$K=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$$

T ：绝对温度，K

- ◆ 分子的热运动所固有的动能不足以产生碰撞电离，20°C时，气体分子平均动能约0.038eV。热电离起始温度为10³K
- ◆ 在一定热状态下物质会发出辐射，热辐射光子能量大，会引起光电离

3、热电离

- 热电离实质上是热状态下碰撞电离和光电离的综合

例如：**发生电弧放电**时，气体温度可达数千度，气体分子动能就足以导致发生明显的碰撞电离，高温下**高能热辐射光子**也能造成气体的电离

4、负离子的形成

- 有时电子和气体分子碰撞非但没有电离出新电子，反而是碰撞电子附着分子，形成了负离子
- 形成负离子时可**释放出能量**
- 有些气体容易形成负离子，称为**电负性气体**（如氧、氟、氯等），**SF₆**在工业上有典型应用
- 负离子的形成起着**阻碍放电的作用**

5、金属（阴极）的表面电离

- 金属阴极表面发射电子

逸出功：与金属的**微观结构**、**表面状态**有关

- 金属的逸出功一般比气体的电离能**小得多**，在气体放电中起重要作用

- 金属表面电离所需能量获得的方式

正离子碰撞阴极（二次发射）

正离子碰撞阴极

➤ 正离子碰撞阴极时把能量（主要是势能）传递给金属中的电子，使其逸出金属

➤ 正离子必须碰撞出一个以上电子时才能产生自由电子

正离子与电子复合时发出的势能起作用

➤ 逸出的电子有一个和正离子结合成为原子，其余的成为自由电子

5、金属（阴极）的表面电离

◆ 光电效应

金属表面受到**短波光**的照射。同样的光辐射引起的电极表面电离要比引起空间光电离强烈得多

◆ 强场放射（冷放射）

当阴极附近所加外电场足够强时，可使阴极发射出电子。场强在 **10^6V/cm** 左右，一般气体击穿场强远低于此值

此情况会出现在高气压间隙和高真空间隙放电中

5、金属（阴极）的表面电离

◆ 热电子放射

当阴极被加热到很高温度时，其中的电子获得巨大动能，逸出金属表面

对于某些电弧放电的过程有重要的意义

第一节 气体中带电质点的产生和消失

■ 气体中带电质点的消失

- (一) 电场作用下气体中带电质点的运动流入电极
- (二) 带电质点的扩散
- (三) 带电质点的复合

1、电场作用下气体中带电质点的运动

- 带电质点产生以后，在外电场作用下将作定向运动，形成电流：

$$j = env_d \quad v_d: \text{平均速度}$$

带电质点在一定的电场强度下运动达到某种稳定状态，保持平均速度，即上述的带电质点的驱引速度

$$v_d = bE \quad b: \text{迁移率}$$

- 电子迁移率比离子迁移率大两个数量级

2、带电质点的扩散

- 带电质点的扩散是由于**热运动**造成，带电质点的扩散规律和气体的扩散规律相似
- 气体中带电质点的扩散和**气体状态有关**，气体压力越高或者温度越低，扩散过程也就越弱
- 电子的质量远小于离子，所以电子的热运动速度很高，它在热运动中受到的碰撞也较少，因此，**电子的扩散过程比离子的要强得多**

3、带电质点的复合

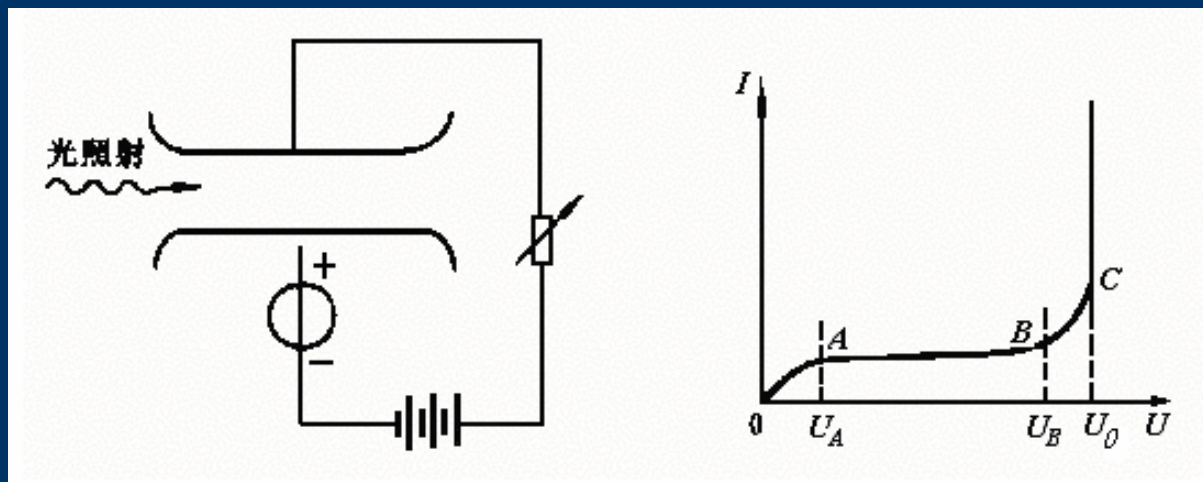
- 正离子和负离子或电子相遇，发生电荷的传递而互相中和、还原为分子的过程
- 在带电质点的复合过程中会发生光辐射，这种光辐射在一定条件下又成为导致电离的因素
- 参与复合的质点的相对速度愈大，复合概率愈小。通常放电过程中离子间的复合更为重要
- 带电质点浓度越大，复合速度越大，强烈的电离区也是强烈的复合区

第二节 气体放电机理

- 气体放电的主要形式
 - 非自持放电和自持放电
- 汤森德气体放电理论
- 流注放电理论

第二节 气体放电机理

1、气体放电的主要形式



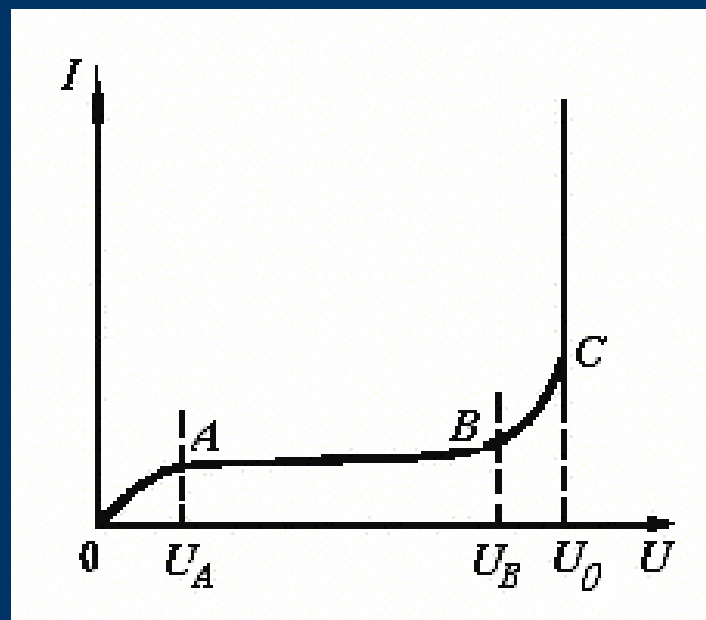
外电离因数：宇宙线、地面上的放射性辐射、太阳光中的紫外线等

1cm^3 气体介质中每秒产生一对离子，达到平衡状态，离子浓度约为 $500\sim 1000$ 对/ cm^3

非自持放电

外施电压小于 U_0 时，间隙电流远小于微安级，此阶段气体绝缘性能完好

电流要依靠外电离因素来维持。如果取消外电离因素，那么电流也将消失

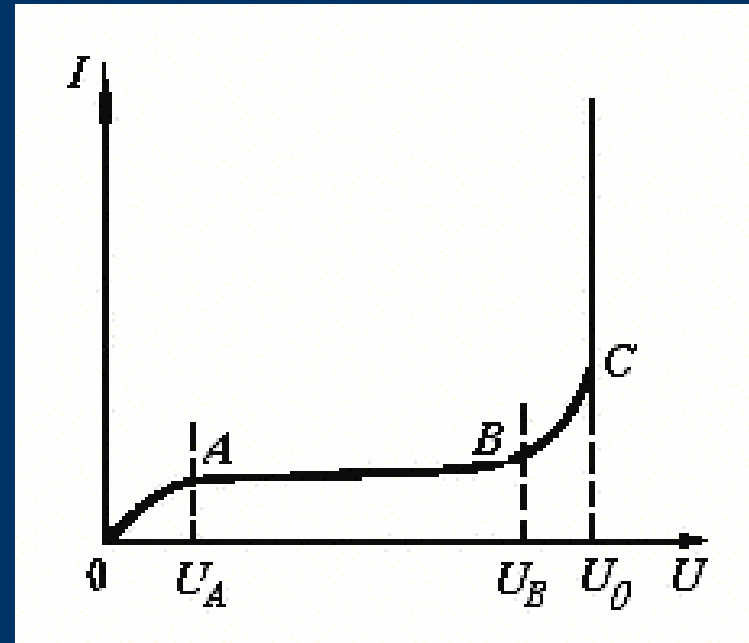


U_0 以前的放电形式称为非自持放电

自持放电

当电压达到 U_0 后，气体中发生了强烈的电离，电产生电子崩，电流剧增

气体中电离过程只靠电场作用可自行维持，不再需要外电离因素了



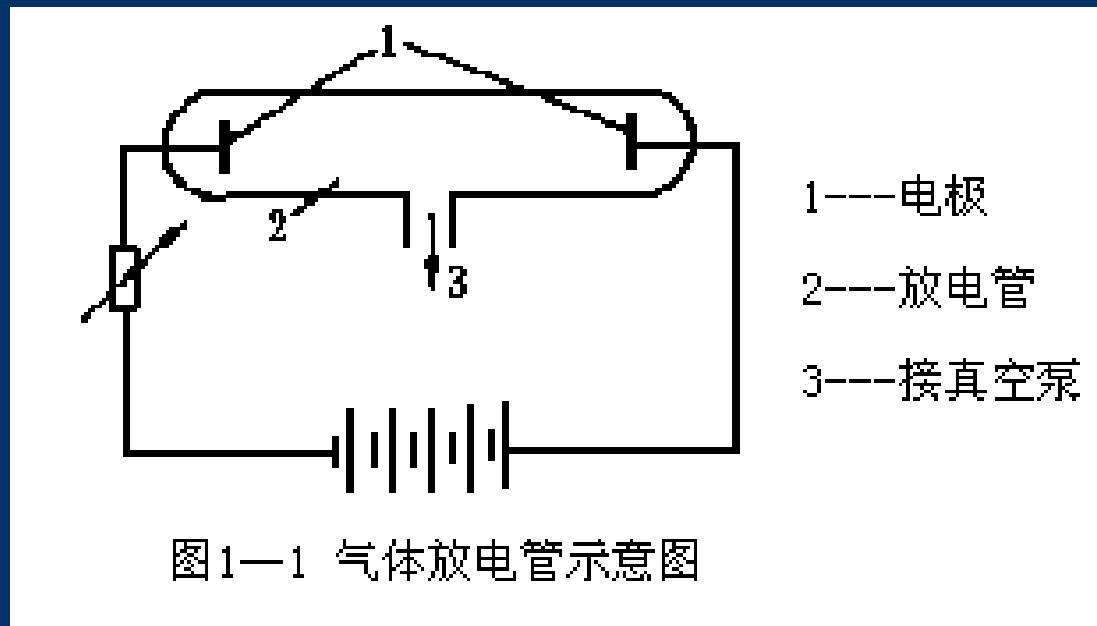
U_0 以后的放电形式称为自持放电

非自持放电和自持放电

- 由非自持放电转入自持放电的电场强称为临界场强(E_{cr}), 相应的电压称为临界电压(U_{cr})
- 如电场比较均匀, 则间隙将被击穿, 此后根据气压、外回路阻抗等条件形成辉光放电、火花放电或电弧放电, 而间隙的击穿电压 U_b 也就是形成自持放电的临界电压 U_{cr}
- 如电场极不均匀, 则当放电由非自持转入自持时, 在大曲率电极表面电场集中的区域发生电晕放电, 这时临界电压是间隙的电晕起始电压, 而击穿电压可能比起始电压高很多

1、气体放电的主要形式

根据**气体压力**、**电源功率**、**电极形状**等因素的不同，击穿后气体放电可具有多种不同形式。利用放电管可以观察放电现象的变化



- 辉光放电
- 电弧放电
- 火花放电
- 电晕放电
- 刷状放电

1、气体放电的主要形式

辉光放电

- 当气体压力不大，电源功率很小（放电回路中串入很大阻抗）时，外施电压增到一定值后，回路中电流突增至明显数值，管内阴极和阳极间整个空间忽然出现发光现象
- 特点是放电电流密度较小，放电区域通常占据了整个电极间的空间。霓虹管中的放电就是辉光放电的例子，管中所充气体不同，发光颜色也不同

1、气体放电的主要形式

火花放电

- 在较高气压（例如大气压力）下，击穿后总是形成收细的发光放电通道，而不再扩散于间隙中的整个空间。当外回路中阻抗很大，限制了放电电流时，电极间出现**贯通两极的断续的明亮细火花**
- 火花放电的特征是**具有收细的通道形式，并且放电过程不稳定**
- 火花间断的原因

1、气体放电的主要形式

电弧放电

- 减小外回路中的阻抗，则电流增大，电流增大到一定值后，**放电通道收细，且越来越明亮**，管端电压则更加降低，说明通道的电导越来越大
- 电弧通道和电极的温度都很高，电流密度极大，电路具有短路的特征

1、气体放电的主要形式

电晕放电

- 电极曲率半径很小或电极间距离很远（电场极不均匀），当电压升高到一定值后，首先在**紧贴电极电场最强处出现发光层**，回路中出现用一般仪表即可察觉的电流。随着电压升高，发光层扩大，放电电流也逐渐增大
- 发生电晕放电时，**气体间隙的大部分尚未丧失绝缘性能，放电电流很小，间隙仍能耐受电压的作用**

1、气体放电的主要形式

刷状放电

- 电极间距较大、电场极不均匀情况下，如电压继续升高，从电晕电极伸展出许多较明亮的细线状光束，称为刷状放电
- 电压再升高，根据电源功率而转入火花放电或电弧放电，最后整个间隙被击穿
- 电场稍不均匀，则可能不出现刷状放电，而由电晕放电直接转入击穿

2、汤森德气体放电理论

- 汤森德 (Townsend) 放电理论
- 流注 (Streamer) 放电理论

这两种理论互相补充，可以说明广阔的 $\delta \cdot S$ (δ 为气体的相对密度，以标准大气条件下的大气密度为基准； S 为气隙距离) 范围内气体放电的现象

2、汤森德气体放电理论

- α 过程（电子崩的形成）
- γ 过程
- 自持放电条件
- α 过程和 γ 过程同时作用产生的电流
- 击穿电压、帕邢定律
- 汤森德放电理论的适用范围

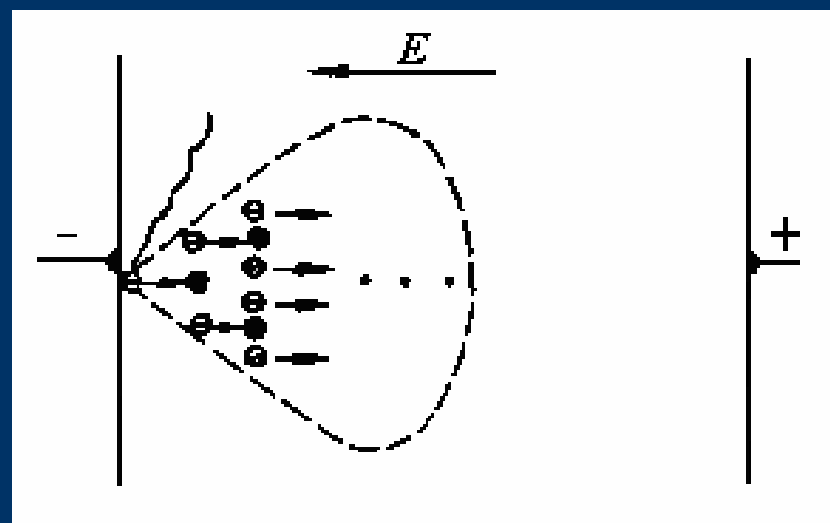
2、汤森德气体放电理论

20世纪初，汤森德根据大量的试验研究成果，提出了较均匀电场和 $\delta \cdot S$ 较小时气体放电理论

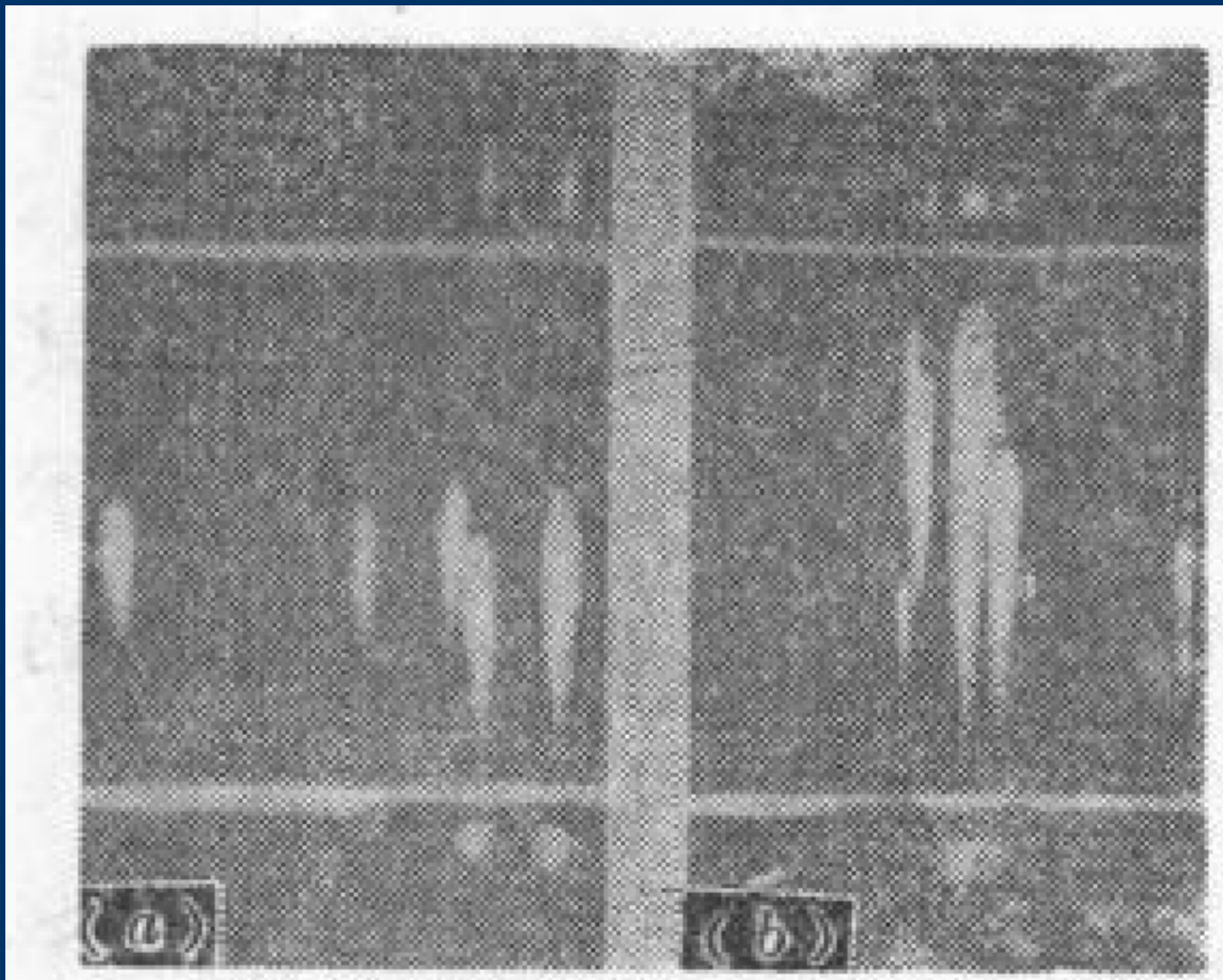
- ◆ 理论认为，电子的碰撞电离和正离子撞击阴极造成的表面电离起主要作用
- ◆ 提出气隙放电电流和击穿电压的计算公式

■ α 过程（电子崩的形成）

- ◆ 一个起始电子自电场获得动能后，会碰撞电离出一个**第二代电子**
- ◆ 这两个电子作为新的第一代电子，又将电离出新的第二代电子，这时空间已存在四个自由电子
- ◆ 这样一代一代不断增加的过程，会使电子数目迅速增加，如同冰山上发生雪崩一样，形成了**电子崩**



电子崩



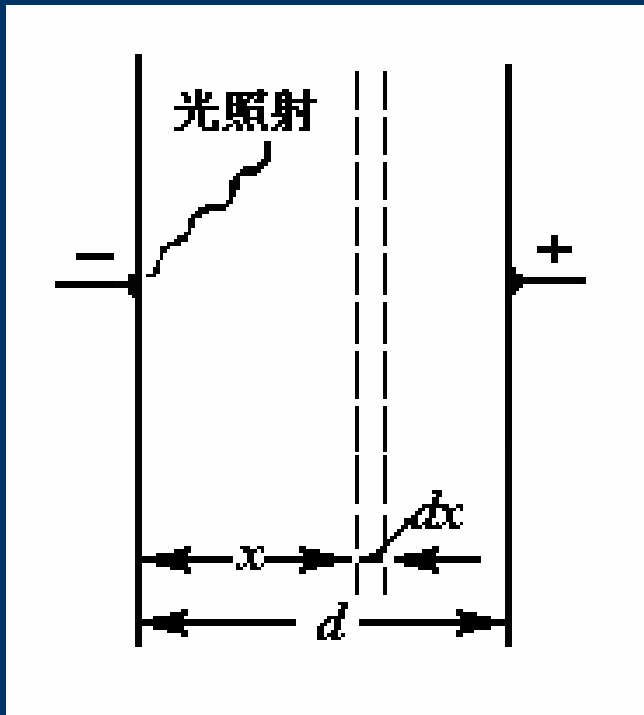
α 过程

◆ α 电离系数

定义：一个电子沿着电场方向行经1cm长度，与气体分子发生碰撞所产生的自由电子数

α 即是一个电子在单位长度行程内新电离出的电子数或正离子数

α 过程



设：在外电离因素光辐射 的作用下，单位时间内阴极单位面积产生 n_0 个电子

在距离阴极为 x 的横截面上，单位时间内单位面积有 n 个电子飞过

这 n 个电子行过 dx 之后，又会产生 dn 个新的电子

$$dn = n\alpha dx$$

将此式积分，可得电子的增长规律为 $n = n_0 \exp \int_0^x \alpha dx$

α 过程

对于均匀电场， α 不随空间位置而变

$$n = n_0 e^{\alpha x}$$

相应的电子电流增长规律为

$$I = I_0 e^{\alpha x}$$

令 $x=S$ ，得进入阳极的电子电流，即外回路中的电流

$$I = I_0 e^{\alpha \cdot s}$$

■ γ 过程

- ◆ 正离子在间隙中造成的空间电离过程不可能具有显著作用，一般不考虑 β 过程
- ◆ 正离子向阴极移动，依靠它所具有的动能及位能，在撞击阴极时能引起表面电离，使阴极释放出自由电子
- ◆ γ 电离系数

定义 一个正离子碰撞到阴极表面时使阴极金属表面平均释放出的自由电子数

γ 过程

从阴极飞出 n_0 个电子，到达阳极后电子数将增加为

$$n = n_0 e^{\alpha \cdot s}$$

正离子数为

$$n = n_0 (e^{\alpha \cdot s} - 1)$$

正离子到达阴极，从阴极电离出的电子数为

$$\Delta n = n_0 \gamma (e^{\alpha \cdot s} - 1)$$

■ 自持放电条件

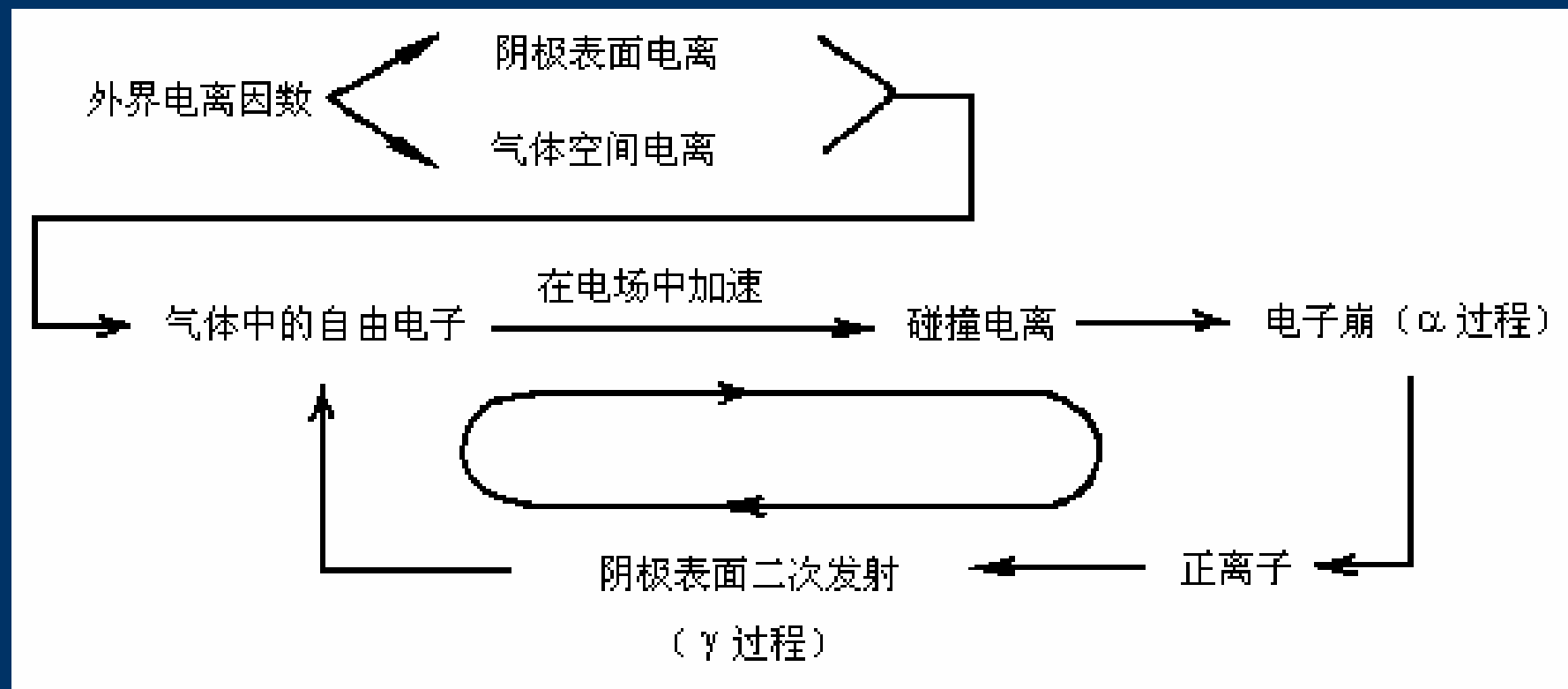
设 $n_0=1$, $\Delta n = n_0\gamma(e^{\alpha \cdot s} - 1)$

放电有非自持转入自持的条件为

$$\gamma(e^{\alpha \cdot s} - 1) \geq 1$$

在均匀电场中，这也就是间隙击穿的条件，上式具有清楚的物理意义

当自持放电条件得到满足时，就会形成图解中闭环部分所示的**循环不息**的状态，放电就能**自己维持**下去



■ α 过程和 γ 过程同时作用产生的电流

设： n_0 表示在外电离因素作用下单位时间内阴极单位面积产生的电子数

Δn 表示单位时间内阴极单位面积由于 γ 过程产生的电子数

则单位时间内阴极单位面积上产生的电子总数

$$n_c = n_0 + \Delta n$$

从阴极出来的电子到达阳极后，电子数 n_a 成为

$$n_a = n_c e^{\alpha s}$$

α 过程和 γ 过程同时作用产生的电流

产生的正离子数为 $n_a - n_c$

阴极金属平均释放出的电子数 $\Delta n = \gamma(n_a - n_c)$

得

$$n_a = n_0 \frac{e^{\alpha \cdot s}}{1 - \gamma(e^{\alpha \cdot s} - 1)}$$

回路电流

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha \cdot s}}{1 - \gamma(e^{\alpha \cdot s} - 1)}$$

放电自持的条件为

$$1 - \gamma(e^{\alpha \cdot s} - 1) = 0$$

■ 击穿电压、帕邢定律

◆ 击穿电压：根据自持放电条件推导击穿电压

设电子在均匀电场中行经距离 x 而未发生碰撞，电子从电场获得的能量为 eEx ，电子如要能够引起碰撞电离，必须满足条件

$$eEx \geq W_i \quad \text{或} \quad Ex \geq U_i$$

只有那些自由行程超过 $x_i = U_i / E$ 的电子，才能与分子发生碰撞电离。若电子的平均自由行程为 λ_e ，自由行程大于 x_i 的概率为

$$e^{-x_i / \lambda_e}$$

击穿电压、帕邢定律

在1 cm长度内，一个电子的平均碰撞次数为 l/λ_e

$\frac{1}{\lambda_e} e^{-x_i/\lambda_e}$ 是一个电子自由行程超过 x_i 而发生的碰撞数，
即碰撞电离次数

根据系数 α 定义，有 $\alpha = \frac{1}{\lambda_e} e^{-\frac{x_i}{\lambda_e}} = \frac{1}{\lambda_e} e^{-\frac{U_i}{E\lambda_e}}$

$$\lambda_e \propto \frac{T}{p}$$

$\frac{1}{\lambda_e} = A\delta$ ，并令 $AU_i = B$ ，可得

$$\alpha = A\delta \cdot e^{-\frac{B\delta}{E}}$$

击穿电压、帕邢定律

将 α 的计算式代入自持放电条件 $(1 - \gamma(e^{\alpha S} - 1)) = 0$ ，得到

$$A\delta \cdot S \cdot e^{-\frac{B\delta \cdot S}{U_b}} = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)$$

击穿电压 U_b

$$U_b = \frac{B\delta \cdot S}{\ln\left(\frac{A\delta \cdot S}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right)}$$

结论：均匀电场中气体的击穿电压 U_b 是气体相对密度和电极间距离的乘积 $\delta \cdot S$ 的函数

$$U_b = f_1(\delta \cdot S)$$

击穿电压、帕邢定律

系数A及B和温度有关。当气体温度不变时：

$$\frac{1}{\lambda_e} = A'p \quad A'U_i = B' \quad \delta = \frac{T_0}{p_0} \times \frac{p}{T} = 2892 \times \frac{p}{T}$$

击穿电压 U_b

$$U_b = \frac{B'pS}{\ln\left(\frac{A'pS}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right)}$$

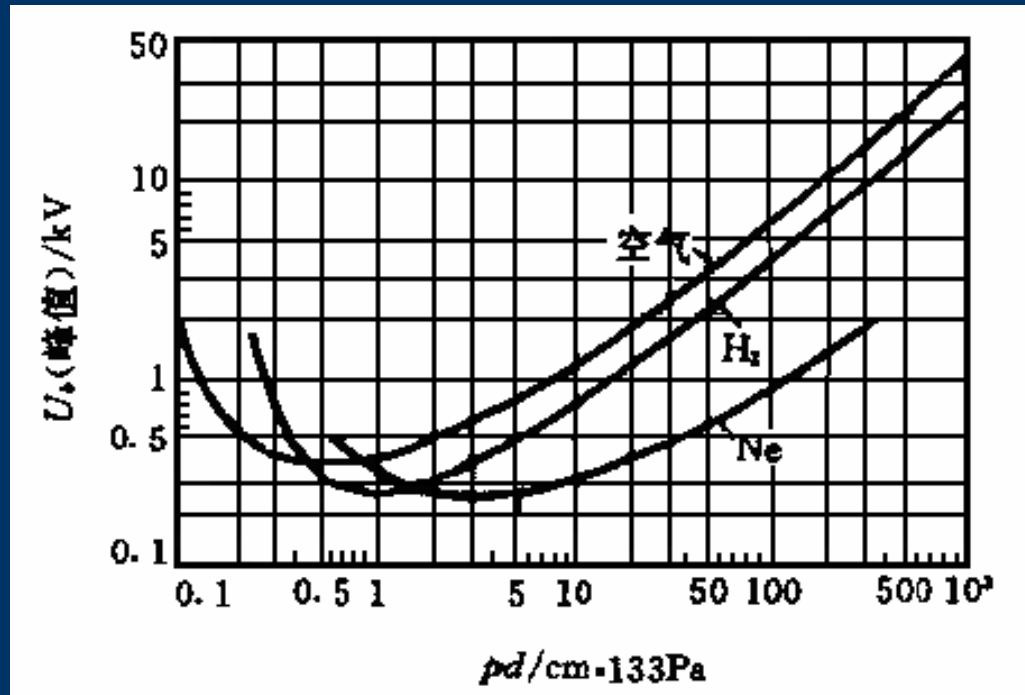
温度不变时，均匀电场中气体的击穿电压 U_b 是气体压力和电极间距离的乘积 pS 的函数

$$U_b = f_2(p \cdot S)$$

-
- 大量的试验证明，在 $\delta \cdot S$ 较小的情况下，气体的击穿电压与 $\delta \cdot S$ 具有有稳定的关系，计算值与实验值较吻合
 - 试验证明，在 $\delta \cdot S$ 较小的情况下，击穿电压受 γ （阴极材料）的影响

■ 击穿电压、帕邢定律

◆ 帕邢（Paschen）定律



击穿电压与 $\delta \cdot S$ 的规律在汤逊碰撞电离学说提出之前，帕邢已从实验中总结出来了，汤逊理论从理论上解释了试验结果

帕邢定律

- 从试验曲线上可以看出，存在一个**最小值**
- **气压很小时**，气体稀薄，虽然电子自由程大，可以得到足够的动能，但碰撞总数小，所以击穿电压升高
- **气体增大时**，电子自由程变小，得到的动能减小，所以击穿电压升高。
- 总有一个气压对碰撞电离最有利，此时击穿电压最小

■ 汤森德放电理论的适用范围

- ◆ 汤逊气体放电模型只适用于 $\delta \cdot S$ 较小的情况
- ◆ 当 $\delta \cdot S$ 过小或过大时，放电机理会出现变化

例如 $\delta \cdot S$ 极小时（气压极低时），电子的自由程远大于间隙距离，碰撞电离不可能发生，按汤逊理论击穿电压应无限大。事实上场致发射在真空中起作用

例如 电力工程上经常接触到的是气压较高的情况（从一个大气压到数十个大气压），间隙距离通常也很大，气体击穿的很多实验现象和电压值都无法在汤森德理论中得到解释

两者间的主要差异如下：

1. 放电外形

汤森德：均匀连续，如辉光放电

大气压：分枝的明细通道

2. 放电时间

火花放电时间的实测值比汤森德理论的计算值（正离子到达阴极造成二次电子所用时间）要小得多

3. 击穿电压

汤森德自持放电条件求得的击穿电压和大气压实验值有很大出入

4. 阴极材料的影响

汤森德：和阴极材料有关

大气压：实测击穿电压和阴极材料无关

大气压下气体放电有新的机制

Electrifying, Seattle, Washington
www.webshots.com



Thunderbolt
www.webshots.com

