

一、气体带电粒子的产生和消灭

空气是天然绝缘介质。
气体的电导和放电有理论和实际价值，
有助于对液体和固体的电导和击穿的理解。

一、气体带电粒子的产生和消灭

◆ 气体中带电粒子产生和消灭

(1) 激发：处于正常状态的原子、分子和离子，在气体空间，当获得一定能量时，其电子，最外层价电子就可能跃迁到较高能级上。

一、气体带电粒子的产生和消灭

激发能：激发所需要的能量 W_e

激发电压 $U_e = \frac{W_e}{e}$

激发态平均寿命 $10^{-7} \sim 10^{-8} s$

之后恢复到正常区态，以光子的形式
发出激发能 $W_e = h\nu$

一、气体带电粒子的产生和消灭

介稳态：原子未恢复到正常状态，必须再获取能量跃迁到更高能级上，才能恢复到正常态，其平均寿命 $10^{-4} \sim 10^{-2} s$

一、气体带电粒子的产生和消灭

(2) 电离：原子、分子和离子获得足够能量，使价电子摆脱了原子核的束缚成为自由电子的过程。

电离能：电离过程需要的能量 W_i

电离电压 U_i

一、气体带电粒子的产生和消灭

a、辐射电离：光辐射电离、紫外热辐射电离

b、碰撞电离：电子、离子与气体分子碰撞发生的电离

一、气体带电粒子的产生和消灭

(3) 附着：当电子与分子碰撞时，电子有可能被吸引而附着在分子上形成负离子，这个过程称附着。

一、气体带电粒子的产生和消灭

(4) 复合：正离子和负离子相碰撞而恢复成为分子叫复合，伴随光辐射现象，复合是带电粒子消失的过程。

一、气体带电粒子的产生和消灭

(5) 电子或离子自发地由浓度较高的区域向浓度较低的区域转移的过程，带电粒子的扩散是由热运动造成的。

一、气体带电粒子的产生和消灭

◆ 电极表面发射

为使气体放电中有电荷循环，还必然有阴极金属发射电子的过程。

一、气体带电粒子的产生和消灭

阴极金属发射电子，是放电中带电粒子的一个重要来源。

金属表面的电子从金属中脱离出来也需要一定的能量——逸出功。

一、气体带电粒子的产生和消灭

阴极表面发射电子有几类：

(1) 正离子碰撞阴极，使金属表面释放出电子。

(2) 光电效应：金属表面受光辐射，也发射电子——光电效应。光子的能量必须大于逸出功。

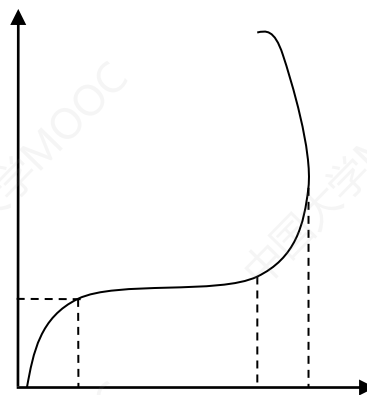
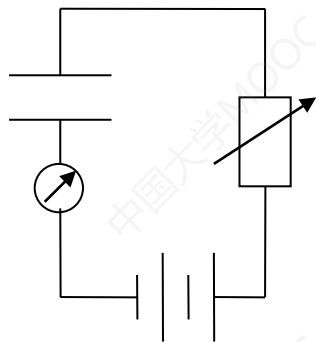
一、气体带电粒子的产生和消灭

(3) 热电子发射：阴极被加热到很高温度，金属中的电子获得巨大的动能而逸出，形成热电子发射。

(4) 强场发射：当阴极附近电场强度很高时，阴极也发射电子，称场致发射或冷发射。

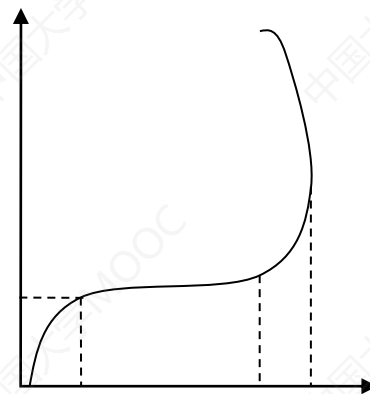
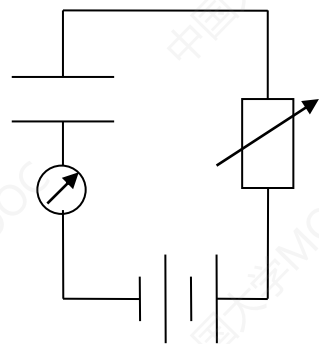
二、气体的j-E特性和放电现象

◆j-E特性



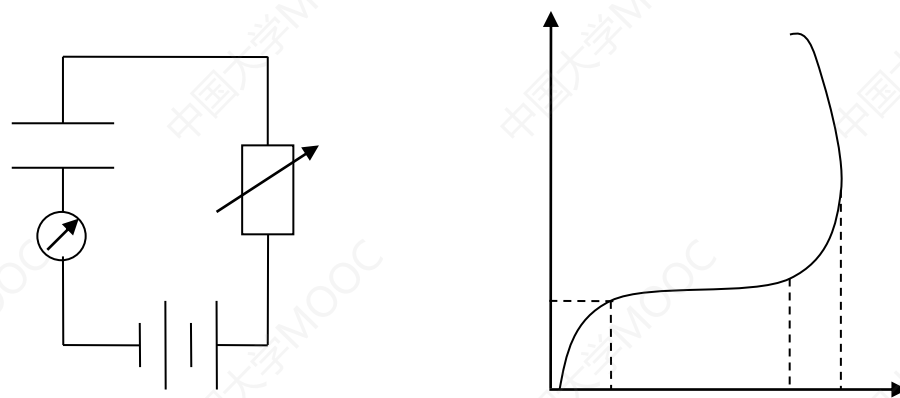
第一部分：电流密度随电场强度呈正比增加，大致符合欧姆定律。

二、气体的j-E特性和放电现象



第二部分：电流密度 j 不再随电场强度发生变化，其饱和电流密度值极小，处于良好绝缘状态。（ j 很小）

二、气体的j-E特性和放电现象



第三部分：场强增至 E_2 附近，电流又增长，气体的绝缘性能尚未遭破坏，气隙并没有击穿。当 $E_2 \rightarrow E_\beta$ ，临界电场强度， j 急剧增大，伴有明显的声、光现象，绝缘性被破坏，气体击穿。标准状态下空气击穿强度平均值 3MV/m。

二、气体的j-E特性和放电现象

◆击穿后放电现象

气体放电受压力、电极、极间距离、电源功率等因素影响。

二、气体的j-E特性和放电现象

(1) 辉光放电：气体压力较小，电源功率很低，当外加电压增加到一定数值时，回路中电流增加，管内电极间整个空间忽然出现发光现象，电极间出现均匀的明暗相间的辉光区（霓虹灯）。

二、气体的j-E特性和放电现象

(2) 火光放电：电压增高，气压不太低（常压附近），气隙中发出明亮的火花，火花在电极间出现细光束，在电源功率不大时，火花会瞬时熄灭，又突然发生（雷电放电）。

二、气体的j-E特性和放电现象

(3) 电晕放电：电极曲率半径很小，电场不均匀，在电极尖端附近出现微光，并发出声音（高压装置的导体尖端）。

二、气体的j-E特性和放电现象

(4) 电弧放电电源功率足够大，而外电路电阻较小，气隙发生火花放电之后，便立即发展至对面电极，并形成非常明亮的连续弧光，电导很高，电流密度很大，电弧温度很高（电焊）。

三、气体的电导

正常状态的气体是不导电，是优良绝缘体。

实际气体存在少量带电粒子（大气 $10^9/m^3$ 正负离子），在电场作用下载流子沿电场方向定向迁移，形成电导电流。

三、气体的电导

紫外线、宇宙射线以及地层辐射线使气体分子获足够能量而电离，出现（产生）正负离子，同时，由于热运动，带电离离子相互碰撞，可能发生复合而生成分子，使带电粒子消失。

三、气体的电导

未加电场时，设单位时间内，
单位体积中离子复合数 N_1'

正比于正、负离子浓度 n_+, n_-

$N_1' = \beta n_+ n_-$ β 为复合系数

$$n_+ = n_- \quad N_1' = \beta n^2$$

常温，大气压下 $\beta \sim 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$

三、气体的电导

电离的作用使带电粒子浓度产生的速率 N 。

在平衡时，复合数与电离数

$$N = N_1' = \beta n^2$$

载流子浓度： $n = \sqrt{N/\beta}$

电导率 γ 与带电粒子浓度有关，不随时间发生变化。

三、气体的电导

在电场作用下：弱电场，带电粒子产生情况不变，带电粒子消失情况改变，除复合消失外，还有定向迁移到极板而消失—电导电流。

其减少速率 $N_1'' = \frac{I}{qAd} = j/qd$

总减少率 $N_1 = N_1' + N_1'' = \beta n^2 + \frac{j}{qd}$

三、气体的电导

(1) 电场很弱时，迁移远小于复合

带电粒子的带电粒子数

$$N \approx N_1' = \beta n^2$$
$$\gamma = nq(\mu_+ + \mu_-) = \sqrt{\frac{N}{\beta}} q(\mu_+ + \mu_-)$$

γ 为常数, $j \propto E$, 服从欧姆定律, 随电场强度升高。迁移速度加大, 复合和消失的粒子数减少, 达到电极上中和的带电粒子数增大。

三、气体的电导

在标准状态下, $N = 4 \times 10^6 / m^3 \cdot s$

$$\beta = 1.6 \times 10^{-13} m^3 / s \quad \mu_+ = 1.3 \times 10^{-4} m^2 / v \cdot s$$

$$m = 1.8 \times 10^{-4} m^2 / v \cdot s \quad q = 1.6 \times 10^{-19} C$$

空气 $\gamma = 7.8 \times 10^{-14} s / m$ $\rho = 1.3 \times 10^{12} \Omega \cdot m$
良绝缘体

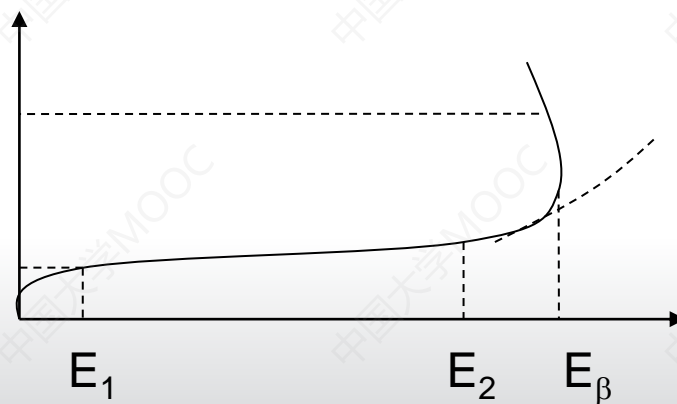
三、气体的电导

(2) 电场升高, 电离产生的带电粒子 N_1' 全部迁移到极板上而没有发生复合 $\beta n^2 \rightarrow 0$ $j = N_1' q d = j_s$

j_s 为饱和电流, 仍很小, 为良好绝缘体。

三、气体的电导

(3)当电场超过 E_2 时，产生很多新的载流子，电流密度又重新增长，气体开始放电。



四、均匀电场中气体放电和击穿

◆ 均匀电场中的气体放电和击穿

气体放电的汤逊理论（气体放电的碰撞电离理论）

四、均匀电场中气体放电和击穿

1、气体放电电流

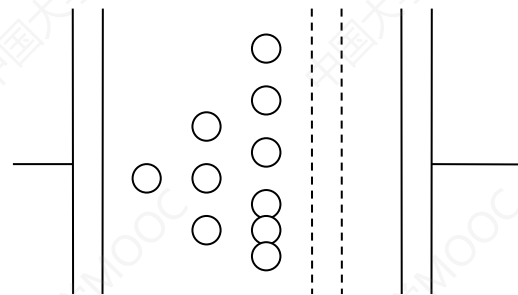
(1) a 过程引起的电流增长方程

当电场强度增加到一定程度时，两极间气隙中的自由电子奔向阳极过程中积累了足够大的能量，与气体分子相碰撞，发生碰撞电离，在强场的加速下，使气体中载流子数目不断增加，发生电子雪崩。这种电子连锁发生的过程称电子崩过程，急剧增长着的电子流称电子崩。

四、均匀电场中气体放电和击穿

电子崩的初始电子：光电效应从阴极表面发射的电子是引起电子崩的起始电子。 n_0 为单位表面积发射的电子数， a 为一个电子在单位距离上产生的电子数或正离子数，或平均碰撞电离次数，称电子碰撞电离系数或汤逊第一电离系数。

四、均匀电场中气体放电和击穿



n_x 是距阴极 x 截面上单位面积穿过的电子数。
则当 n_x 个电子经过 dx 行程后，碰撞电离产生的电子数 dn_x

$$dn_x = n_x \alpha dx \quad n_x = n_0 e^{\int_0^x \alpha dx}$$

四、均匀电场中气体放电和击穿

对均匀电场, α 处处相等 $n_x = n_0 e^{\alpha x}$ 指数增长

达阳极的电子数 $n_d = n_0 e^{\alpha d}$

从阴极每个电子平均产生的新电子数
(或新正离子数) $\frac{n_d - n_0}{n_0} = e^{\alpha d} - 1$

气体放电电流密度 $j = en_d = en_0 e^{\alpha d} = j_0 e^{\alpha d}$

四、均匀电场中气体放电和击穿

气体放电电流密度 $j = en_d = en_0 e^{\alpha d} = j_0 e^{\alpha d}$

j_0 是阴极初始电流密度，这种电子碰撞电离所形成的电子崩称 α 过程，其电子称 α 电子。

四、均匀电场中气体放电和击穿

当外界电离因素除去后，放电就停止
($j_0 = 0$, $j = 0$)，气体恢复绝缘状态，
外界电离因素除去后，放电即行停止
的过程称非自持放电。
如果气体放电只有 α 过程，则放电不
能自持。

四、均匀电场中气体放电和击穿

(2) γ 过程同时存在的电流增长方程
除 α 过程产生电子崩外，还有其它
过程可放出电子。

(a) 正离子轰击阴极，使阴极表面
电离，释放出电子；

四、均匀电场中气体放电和击穿

(b) 阴极表面光电离产生的光电子。

光子来源于：气体分子或离子从激发态恢复到正常态释放出的光子，介稳态的粒子再次激发后恢复到正常状态释放出的光子，正负带电粒子复合释放出的光子。

四、均匀电场中气体放电和击穿

以上两种过程称 γ 过程，由 γ 过程释放出的电子称 γ 电子， γ 电子在强电场加速下，进一步形成电子崩。

气体放电的电流由 α 和 γ 过程同时形成。

四、均匀电场中气体放电和击穿

- γ 过程与阴极材料及表面状态有关。
- γ 又称汤逊第二电离系数。
- γ 定量的表示：每个碰撞阴极表面的正离子使阴极金属释放出的平均自由电子数。

四、均匀电场中气体放电和击穿

由阴极发射出一个起始电子通过 α 过程和 γ 过程，使阳极获得 Z 个电子：

$$Z = e^{\alpha d} + \gamma(e^{\alpha d} - 1)e^{\alpha d} + \gamma^2(e^{\alpha d} - 1)^2 e^{\alpha d} + \dots + \gamma^n(e^{\alpha d} - 1)^n e^{\alpha d} + \dots$$

$$= \left[\frac{1 - \gamma^n(e^{\alpha d} - 1)^n}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \right] e^{\alpha d}$$

四、均匀电场中气体放电和击穿

单位时间内阴极表面单位面积上发射个电子 n_0 ，则单位时间内进入阳极表面单位面积的电子数 n_α ：

$$n_\alpha = n_0 Z = n_0 \left[\frac{1 - \gamma^n (e^{\alpha d} - 1)^n}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \right] e^{\alpha d}$$

电流密度：
$$j = en_0 \left[\frac{1 - \gamma^n (e^{\alpha d} - 1)^n}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \right] e^{\alpha d}$$

四、均匀电场中气体放电和击穿

其中： $j_0 = en_0$ 外电离因素引起的起始电流密度
当 $\gamma(e^{\alpha d} - 1) < 1$ 上述级数收敛。

$$j = j_0 e^{\alpha d} \frac{1}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

由于 $e^{\alpha d} \gg 1$ $j \approx j_0 e^{\alpha d} \frac{1}{1 - \gamma e^{\alpha d}}$

四、均匀电场中气体放电和击穿

2、汤逊击穿判据

A: 当 $\gamma(e^{\alpha d} - 1) < 1$ $j_0 = 0$ $j = 0$ 非自持
放电 当 $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ $j_0 = 0$ $j > 0$ 自持放电

放电仍然能够自行维持下去。

由于 $e^{\alpha d} \gg 1$ $\gamma e^{\alpha d} \approx 1$ $\alpha d = \ln \frac{1}{\gamma}$

四、均匀电场中气体放电和击穿

物理意义：

$(e^{\alpha d} - 1)$ 是从阴极发出的一个电子在进入阳极之前由 α 过程所形成的正离子数。 $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ 则表示 $(e^{\alpha d} - 1)$ 个正离子在回到阴极之际，由 γ 过程在阴极上释放出的二次电子数。

四、均匀电场中气体放电和击穿

$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ 表示二次电子数为1时，这个电子又再次重复形成过程和过程。每个电子在阳极消失时，都能由自身引起的过程重新产生一个“后代”。这样纵然消失外电离因素，放电依然能够维持下去不停止——自持放电。

四、均匀电场中气体放电和击穿

气体的击穿就是从非自持放电到自持放电的转变。

自持放电的条件就是气体击穿的判据，称汤逊击穿判据：

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$$

四、均匀电场中气体放电和击穿

3、汤逊电离系数 α 和 γ

系数 α 、 γ 与气体系统有关，还与电场强度 E 、气体气压 P 、气温 T 有关。