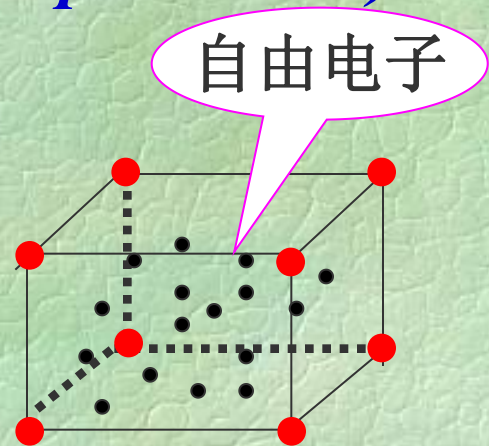


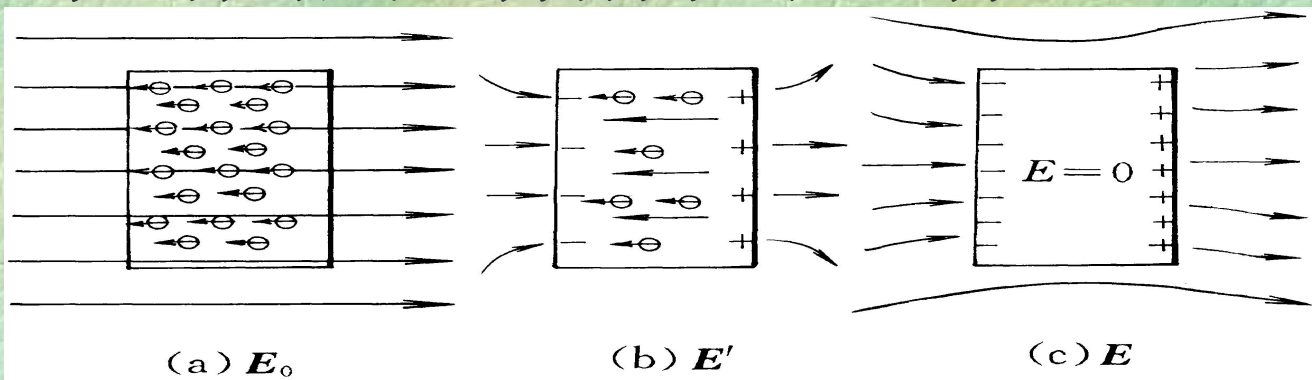
§ 1-5 静电场中的金属导体

一、金属导体的静电平衡 (*electrostatic equilibrium*)

通常的金属导体都是以金属键结合的晶体，处于晶格结点上的原子很容易失去外层的价电子，而成为正离子。脱离原子核束缚的价电子可以在整个金属中自由运动，称自由电子。

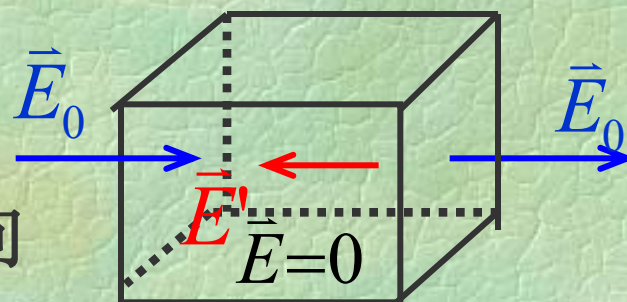


当把导体放入静电场 E_0 中，导体中的自由电子在外电场 E_0 的作用下定向运动，并在导体一侧集结出现负电荷，而另一侧出现正电荷，称静电感应现象。集结的电荷称为感应电荷。



外电场与自由电荷移动后的附加场 \vec{E}' 之和为总场强

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$



当导体内部和表面都无电荷定向移动的状态称为**静电平衡**状态。

1. 整个导体是等势体，导体的表面是等势面。

在导体内部任取两点 P 和 Q ，它们之间的电势差可以表示为

$$V_P - V_Q = \int_P^Q \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

2. 由于电场线与等势面垂直，因此导体表面附近的电场强度处处与表面垂直。

3. 导体内部不存在净电荷，所有过剩电荷都分布在导体表面上。

在导体内部任取一闭合曲面 S ，运用高斯定理，应有

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i$$

因为导体内部的电场强度为零，上式积分为零，所以导体内部必定不存在净电荷。

二、导体表面的电荷和电场

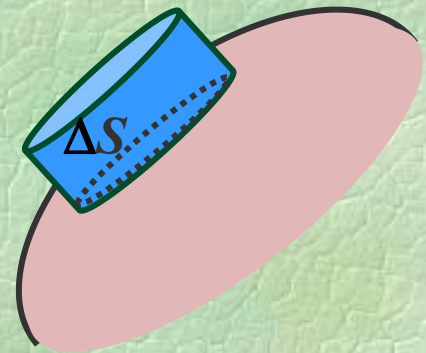
导体表面电荷的分布与导体本身的形状以及附近带电体的状况等多种因素有关。大致的规律为：在导体表面凸起部尤其是尖端处，面电荷密度较大；表面平坦处，面电荷密度较小；表面凹陷处，面电荷密度很小，甚至为零。

在带电导体表面任取一面元 ΔS ，可认为其电荷面密度 σ 为均匀分布。包围 ΔS 作一圆柱状闭合面，使其上、下底面与导体表面平行。通过整个圆柱状闭合面的电通量等于通过圆柱上底面的电通量。

根据高斯定理，有

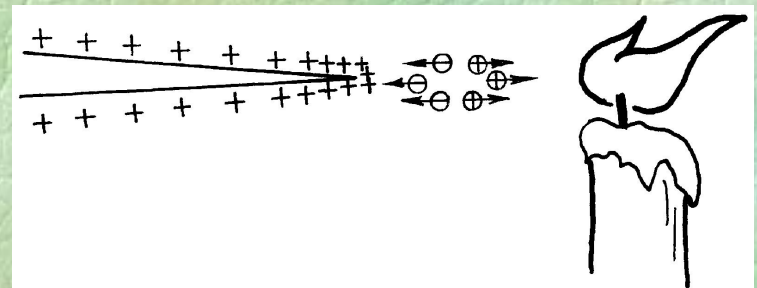
$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = E \Delta S$$

$$E \Delta S = \frac{\sigma \Delta S}{\epsilon_0} \quad \therefore E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$



上式表示，带电导体表面附近的电场强度大小与该处面电荷密度成正比。

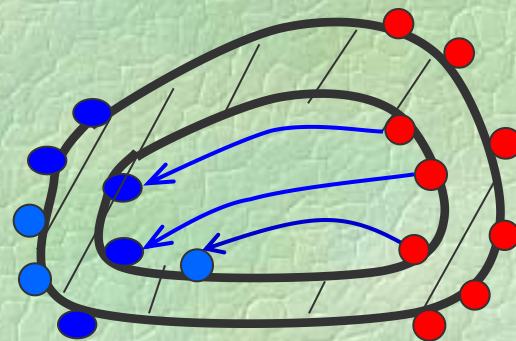
金属针上的电荷形成的“电风”会将蜡烛的火焰吹向一边，这就是尖端放电现象。



三、空腔导体

1. 内表面上不存在净电荷，所有净电荷都只分布在外表面。

可能有两种情形，第一种情形是等量异号电荷宏观上相分离，并处于内表面的不同位置上，与静电平衡条件相矛盾。因此只能是第二种情形，即内表面上处处电量为零。



2. 空腔内部电场强度为零，即它们是等电势。

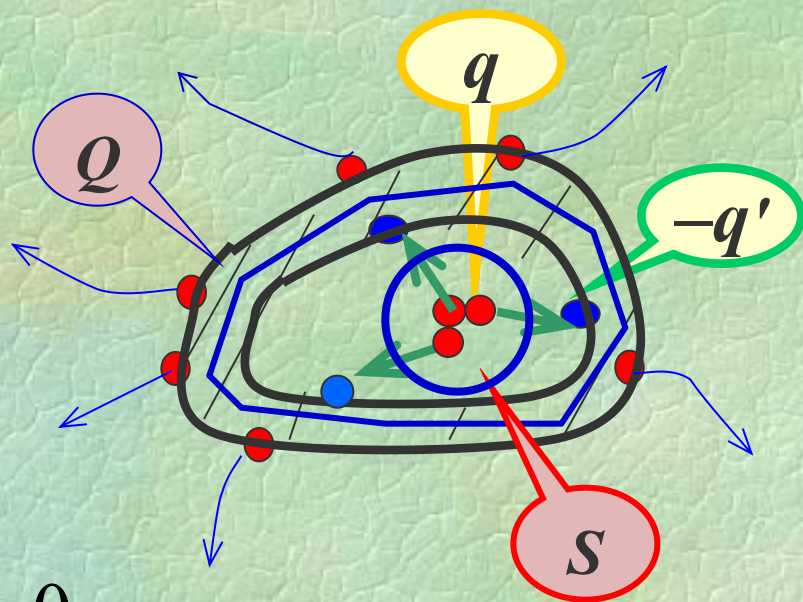
腔内若存在电场，则电场线只能在腔内空间闭合，而静电场的环路定理已经表明其电场线不可能是闭合线，所以整个腔内不可能存在电场，电势梯度为零。即电势处处相等并等于导体的电势。

若金属空腔导体内部有带电体,

由高斯定理可得:

在空腔内:
$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \sum \frac{q_i}{\epsilon_0}$$

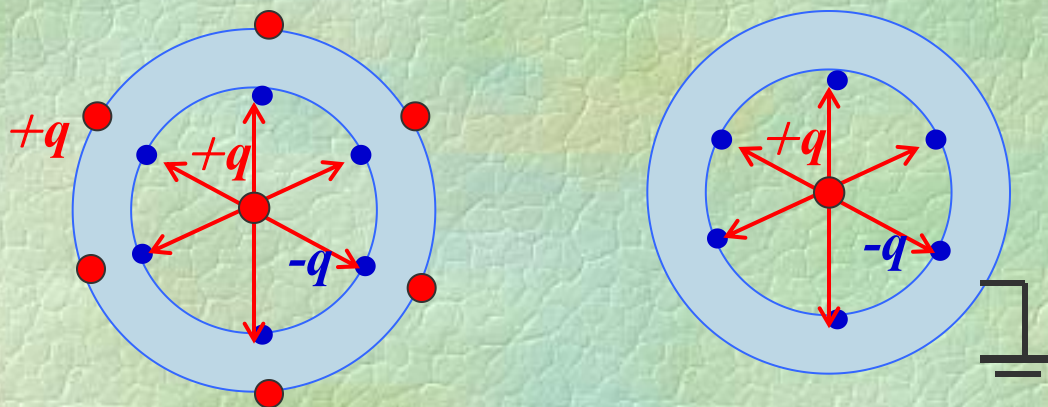
在导体内:
$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = \sum \frac{q_i}{\epsilon_0} = 0$$



说明空腔内表面所带总电量与空腔内带电体的电量相等、符号相反。导体空腔是等势体，腔内场强不为零，不是等电势区间。

四、导体静电平衡性质的应用

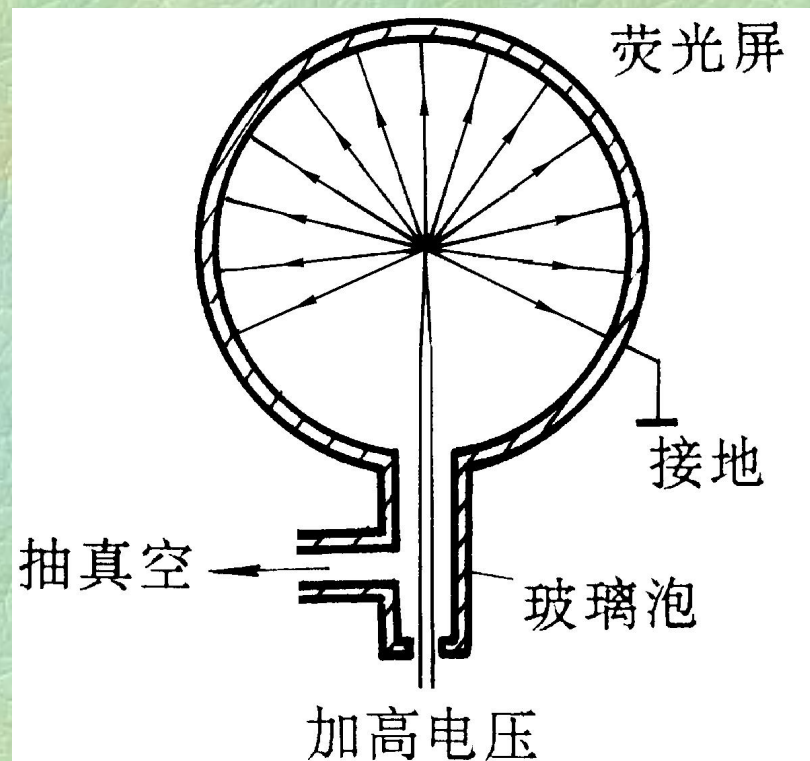
1. 静电屏蔽 (*electrostatic shielding*)



利用导体静电平衡的性质，使导体空腔内部空间不受腔外电荷和电场的影响，或者将导体空腔接地，使腔外空间免受腔内电荷和电场影响，这类操作都称为静电屏蔽。无线电技术中有广泛应用，例如，常把测量仪器或整个实验室用金属壳或金属网罩起来，使测量免受外部电场的影响。

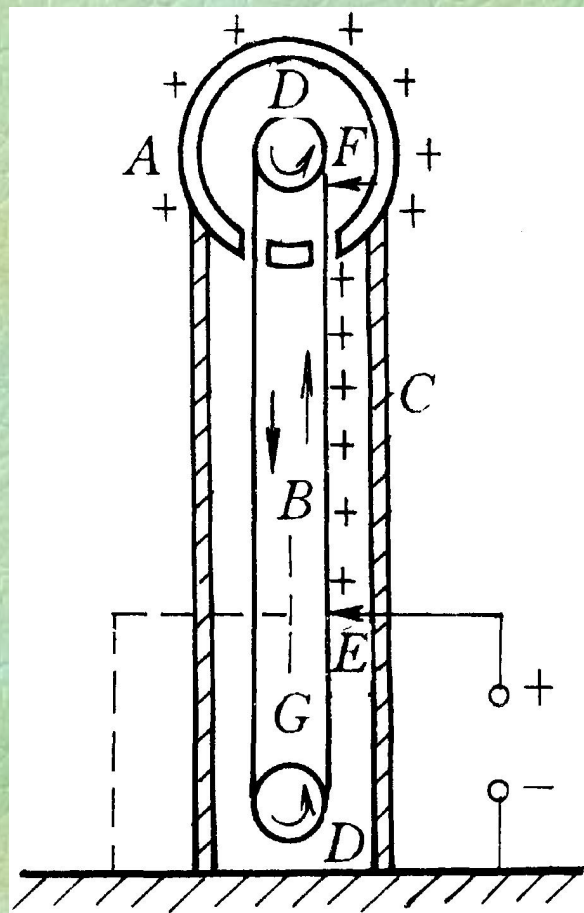
2. 场致发射显微镜

右图是场致发射显微镜的原理图。在真空玻璃泡内充以少量氦气并在中心放置被测试金属针，泡的内壁涂敷荧光导电膜。若在金属针与荧光导电膜之间有很大的电势差，泡内上部空间会产生辐射状的电场。氦分子在尖端处被电离成氦离子并沿辐射状电场线射向荧光导电膜。于是就在膜上产生一个荧光点，它就是该氦离子与金属尖端相碰的那个金属原子的“像”。利用荧光膜上的光点将描绘出金属针尖端表面的原子分布图像。



3. 范德格拉夫静电高压起电机

这种起电机是利用导体空腔所带电荷总是分布在外表面的原理做成的。右图是范德格拉夫静电高压起电机的示意图，起电机工作时A的电势可达 $2 \times 10^6 \text{ V}$ 。这种装置是静电加速器的关键部件，主要用于加速带电粒子以进行核反应实验，也用于离子注入技术以制备半导体器件。



4. 库仑平方反比律的精确证明

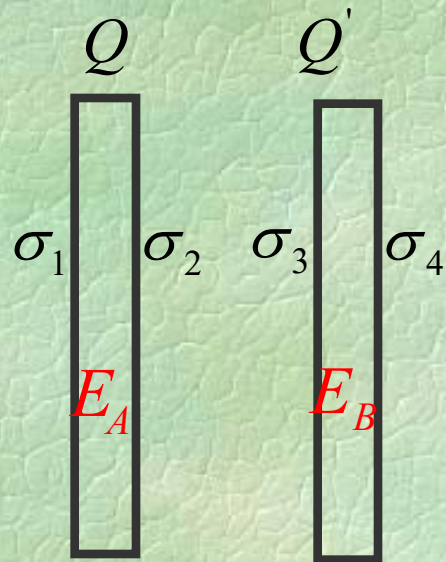
由于库仑定律是电磁理论的基本规律之一，另外，库仑定律是否为严格的平方反比律，即在下式中 δ 是否严格等于零，是与一系列重大物理问题相联系的

$$F \propto \frac{1}{r^{2 \pm \delta}}$$

在证明高斯定理时我们已经看到，高斯定理的成立是由于库仑定律满足平方反比律，即 $\delta = 0$ ；而处于静电平衡的金属导体内部不存在净电荷的结论，是高斯定理的直接结果。试设想，库仑平方反比律不严格成立，高斯定理就不存在，处于静电平衡的金属导体内部就可能存在净电荷。所以，用实验方法测量导体内部不存在净电荷，可以精确地验证库仑平方反比律。

例1： 两块导体平板平行并相对放置，所带电量分别为 Q 和 Q' ，如果两块导体板的面积都是 S ，且视为无限大平板，试求这四个面上的面电荷密度。

解： 设四个面的面电荷密度分别为 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 和 σ_4 ，空间任一点的场强都是由四个面的电荷共同提供的。由高斯定理，各面上的电荷所提供的场强都是 $\sigma_i / 2\epsilon_0$ 。另外，由于导体内部的合成场强为零。若取向右为正方向，则处于导体内部的点 A 和点 B 的场强可以表示为



$$E_A = \frac{1}{2\epsilon_0} (\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_4) = 0$$

$$E_B = \frac{1}{2\epsilon_0} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 - \sigma_4) = 0$$

根据已知条件

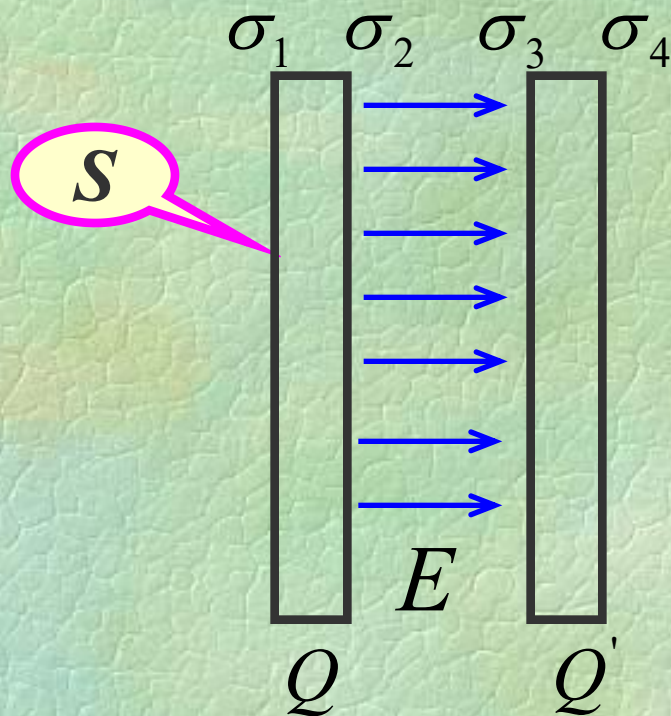
$$S(\sigma_1 + \sigma_2) = Q$$

$$S(\sigma_3 + \sigma_4) = Q'.$$

可解得

$$\sigma_1 = \sigma_4 = \frac{(Q + Q')}{2S}$$

$$\sigma_2 = -\sigma_3 = \frac{(Q - Q')}{2S}$$



上式表明两块无限大的导体平板，相对的内侧表面上面电荷密度大小相等、符号相反，相反的外侧表面上面电荷密度大小相等、符号相同。如果 $Q = -Q'$ ，可以求出：

$$\sigma_1 = \sigma_4 = 0, \quad \sigma_2 = -\sigma_3 = \frac{Q}{S}$$