大学物理学电子教案

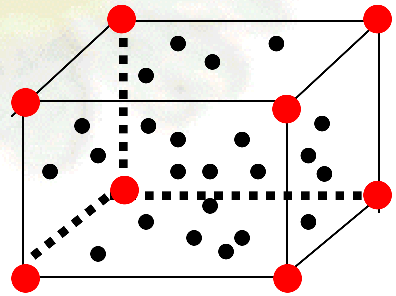
静电场中的导体和电介质

7-1 静电场中的导体
7-2 电介质的极化
7-3 有电介质时的高斯定理

7-1 静电场中的导体

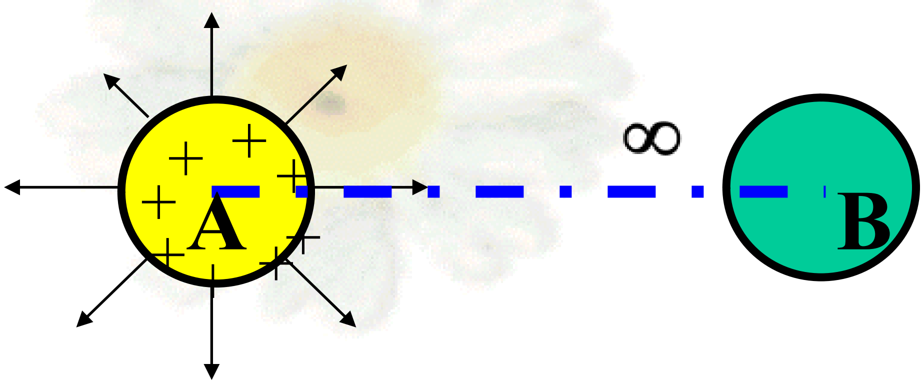
一、导体的静电平衡条件

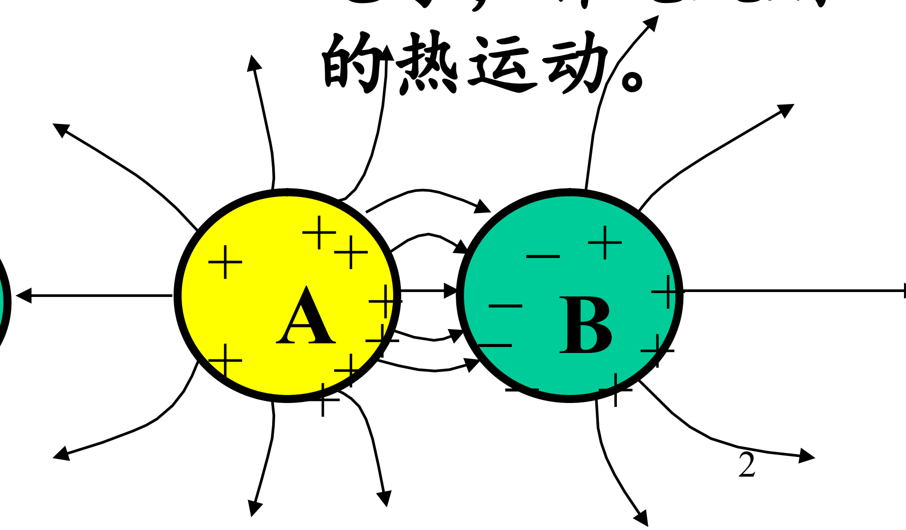
1、静电感应



导体中的自由电子在电场力的作用下作宏观定向运动，引起导体中电荷重新分布而呈现出带电的现象，叫作静电感应。

金属导体有自由电子，作无规则的热运动。

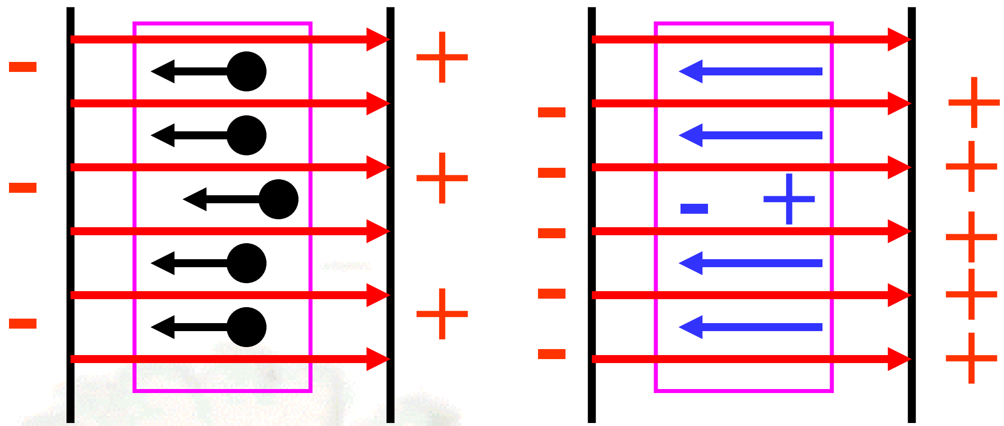




2 静电平衡状态

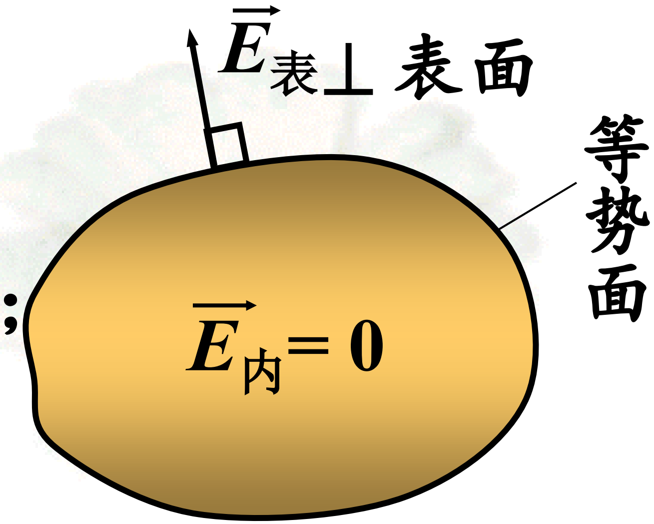
导体的两个侧面出现了等量异号的电荷。在导体的内部建立一个附加电场。

导体内部的场强E就是E'和E_0的叠加。



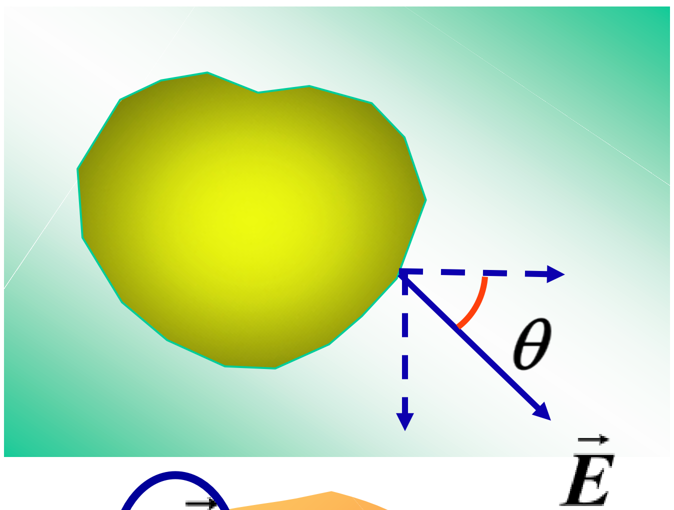
开始，$E' < E_0$，导体内部场强不为零，自由电子继续运动，E'增大。到$E' = E_0$即导体内部的场强为零，此时导体内没有电荷作定向运动，导体处于静电平衡状态。

3 静电平衡条件



a）用电场表示

- 导体内部任一点的电场强度为零；
- 导体表面处的电场强度，与导体的表面垂直。



b）用电势表示：

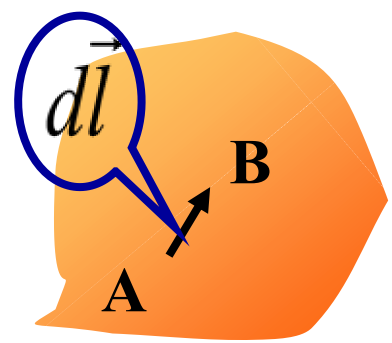
- 导体是个等势体；
- 导体表面是等势面。

对于导体内部的任何两点A和B

$$U_{AB}=\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{l}=0$$

对于导体表面上的两点A和B

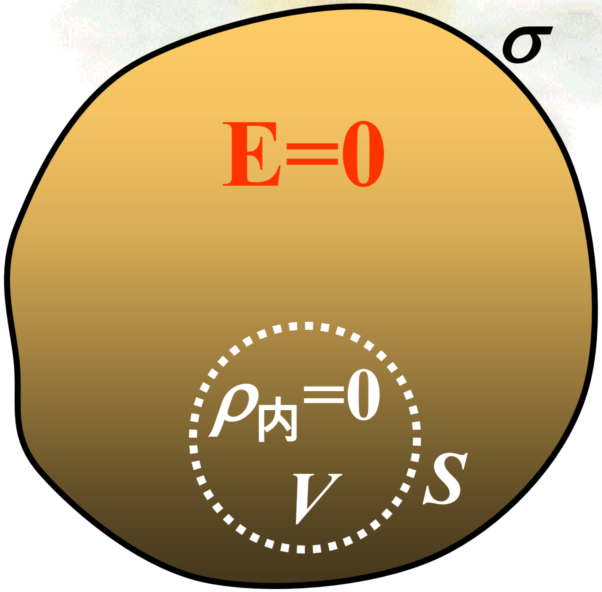
$$U_{AB}=\int_A^B \vec{E}_t\cdot d\vec{l}=0$$



二、静电平衡时导体上电荷的分布

1 实心导体

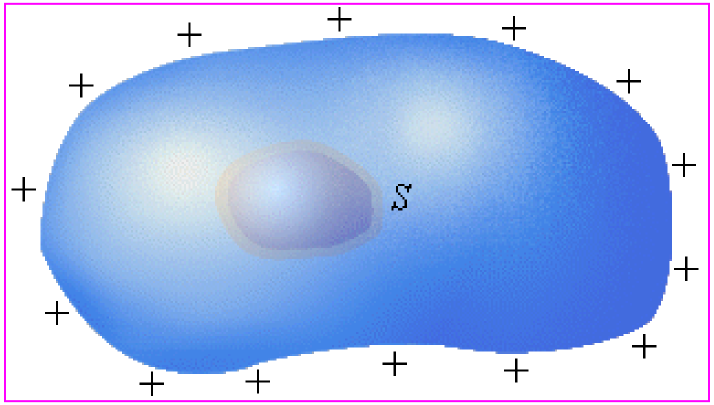
在静电平衡时，导体内部的电场强度为零，所以通过导体内部任一高斯面的电场强度通量必为零



$$\oint\!\!\!\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{S}=0$$

结论：

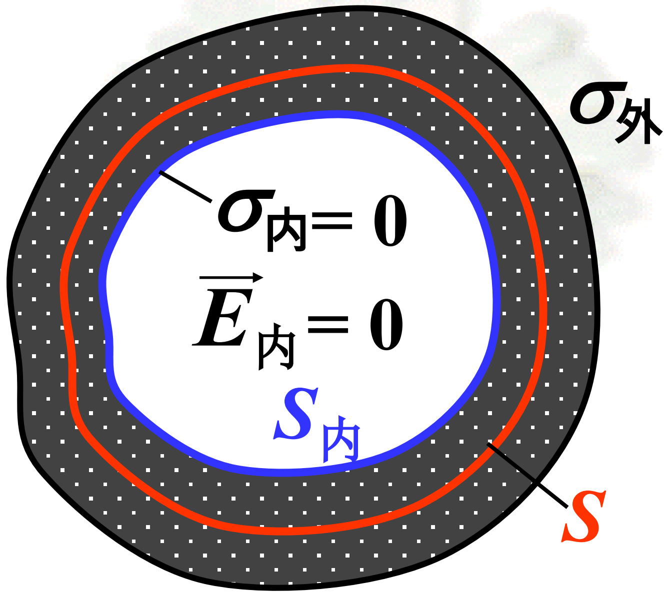
在静电平衡时，导体所带的电荷只能分布在导体的表面上，导体内部没有净电荷。



2、空腔导体

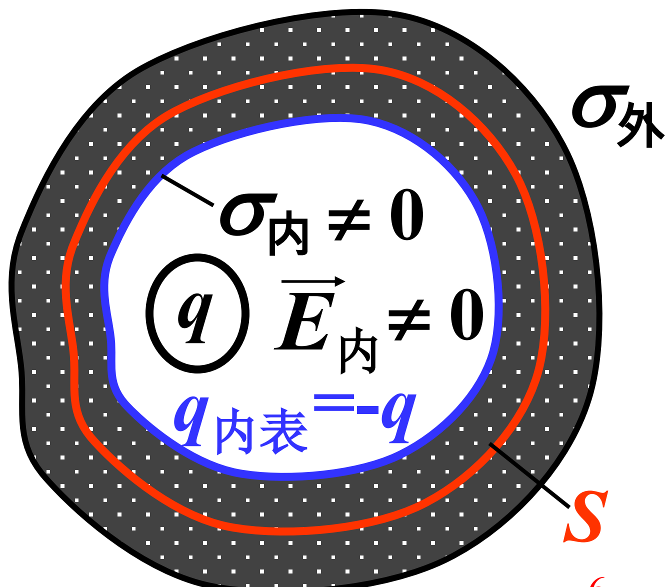
情况1、空腔内无电荷

空腔的内表面没有电荷，电荷只能分布在空腔的外表面。



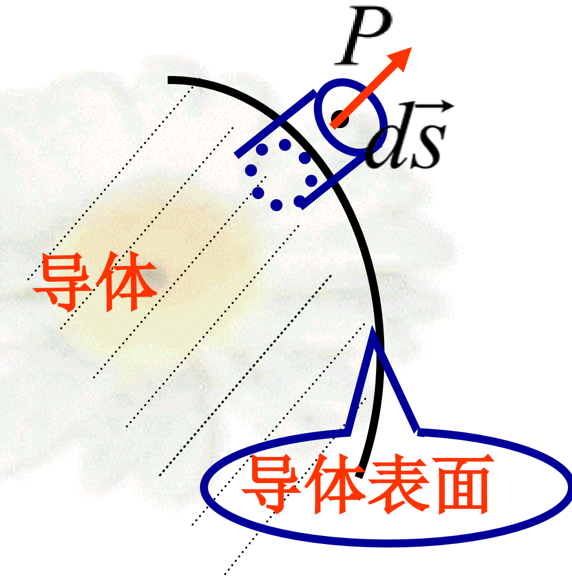
情况2、空腔内有电荷$+q$

空腔的内表面有感应电荷$-q$，
空腔的外表面有感应电荷$+q$



3、导体表面附近的电场

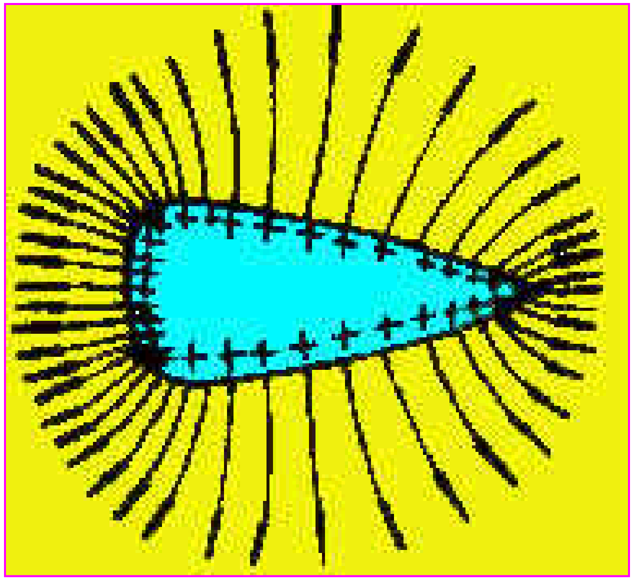
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$



$$\oiint \vec{E}\cdot d\vec{S} = E\Delta S = \frac{\Delta q}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma \Delta S}{\varepsilon_0}$$

导体表面之外邻近表面处的场强，与该处电荷面密度成正比，方向与导体表面垂直。

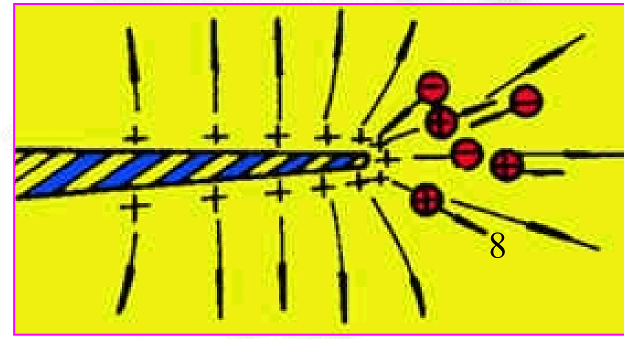
4、孤立导体



孤立导体处于静电平衡时，表面各处的面电荷密度与表面的曲率有关，**曲率越大的地方，面电荷密度越大**。

尖端放电现象

带电体尖端附近的场强较大，大到一定的程度，可以使空气电离，产生尖端放电现象。



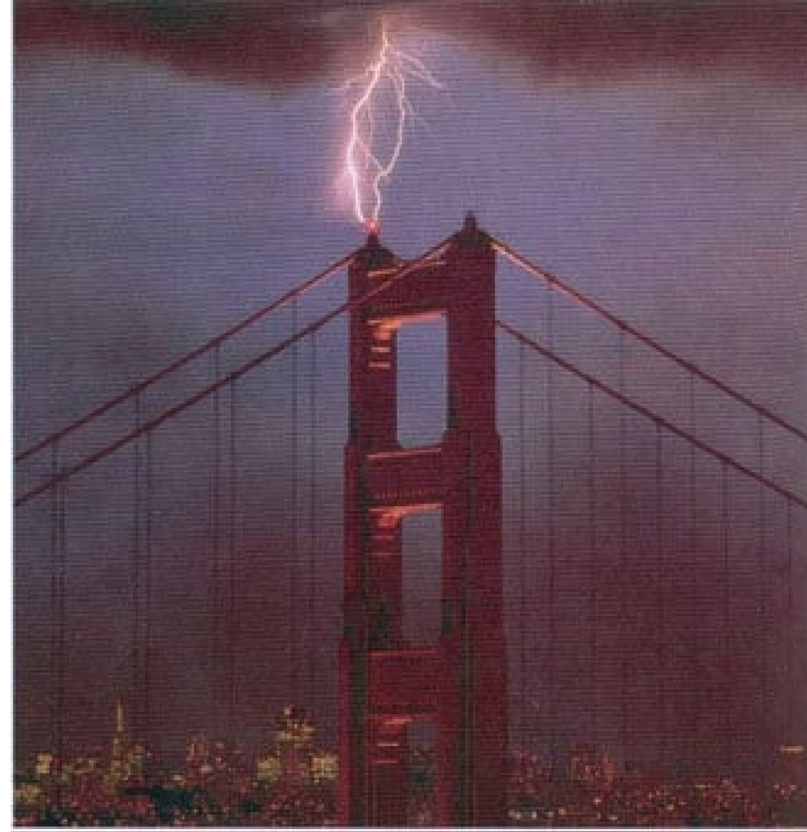
应用：

- 高压设备的电极
- 高压输电线
- 避雷针

不利的一面：浪费电能

避免方法：

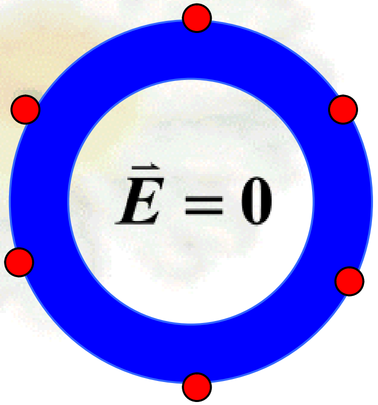
金属元件尽量做成球形，并使导体表面尽可能的光滑




俘获闪电，令其改道

三、导体空腔与静电屏蔽

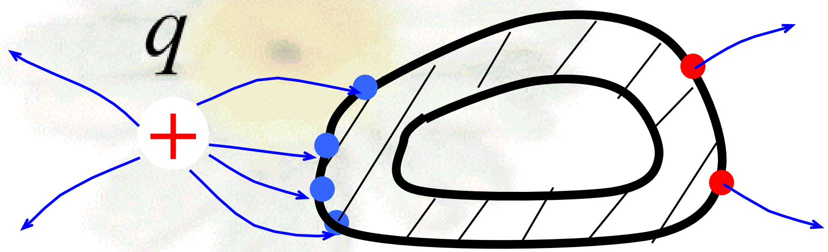
1、静电屏蔽现象

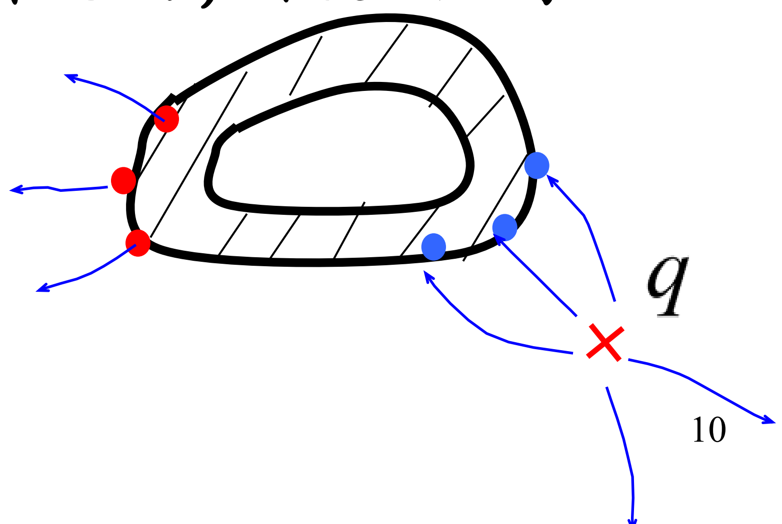


第一类空腔(空腔导体内部无电荷)

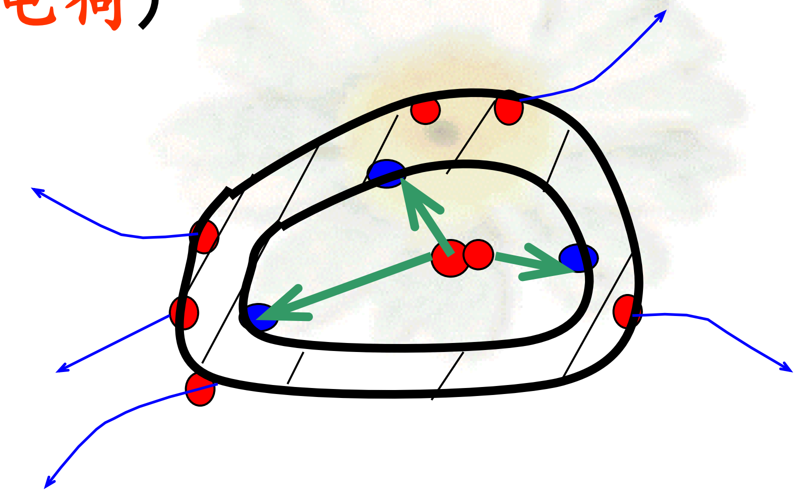
- 空腔内表面不带任何电荷;
- 空腔内部及导体内部电场强度处处为零。

可以利用空腔导体来屏蔽外电场，使空腔内的物体不受外电场的影响。



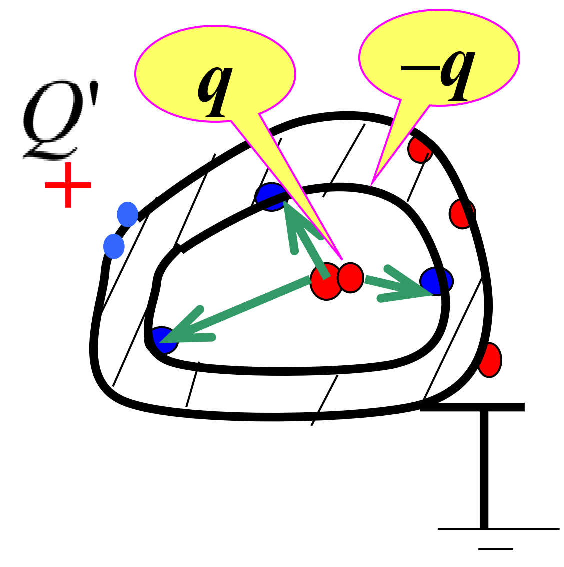


第二类空腔(空腔导体内部有电荷)



内部面将感应异号电荷，
外表面将感应同号电荷。

若把空腔外表面接地，则空腔外表面的电荷将中和，空腔外面的电场消失。



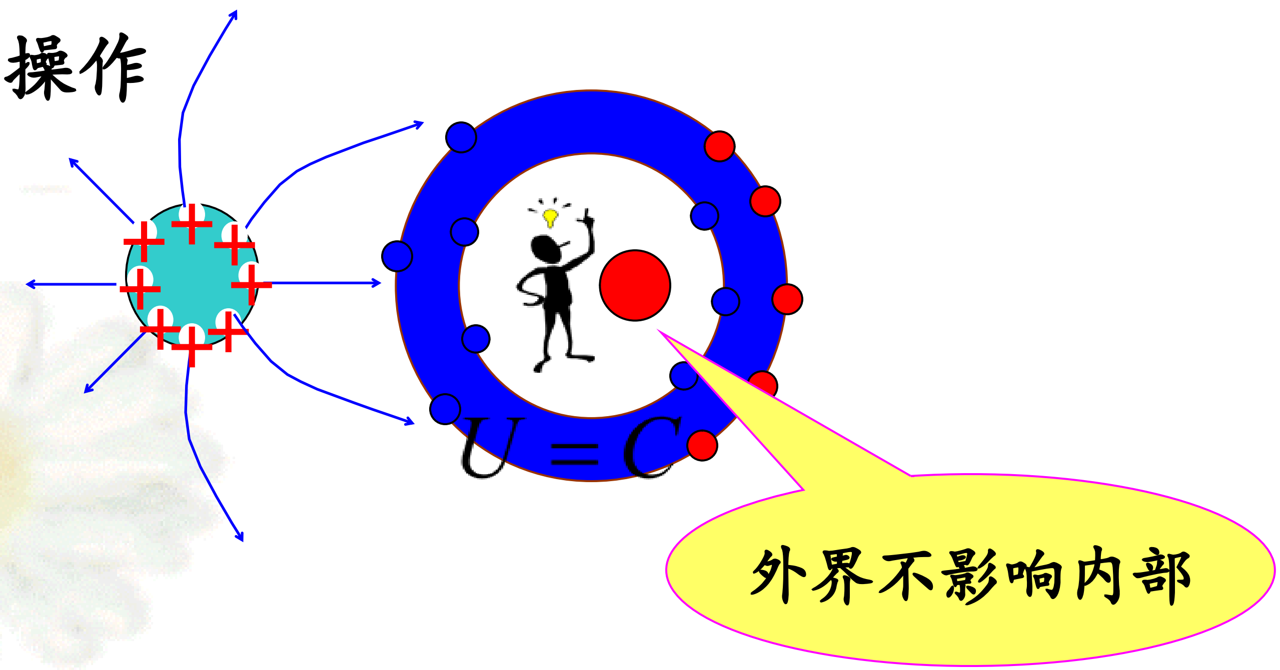
空腔内的带电体对空腔外就不会产生任何影响。

2、应用

•高压设备都用金属导体壳接地做保护

•在电子仪器、或传输微弱信号的导线中都常用金属壳或金属网作静电屏蔽。

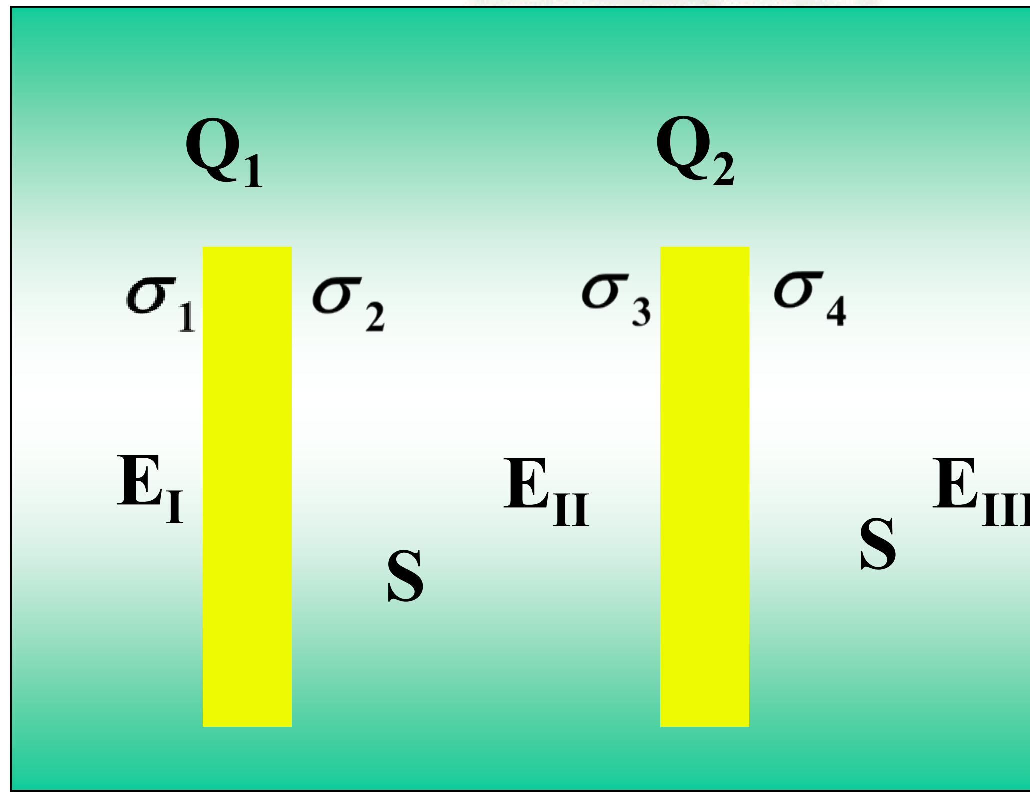
•高压带电操作



例1：两块平行放置的面积为S 的金属板，各带电量Q_1、 Q_2 ，板距与板的线度相比很小。求：

①静电平衡时，金属板电荷的分布和周围电场的分布。

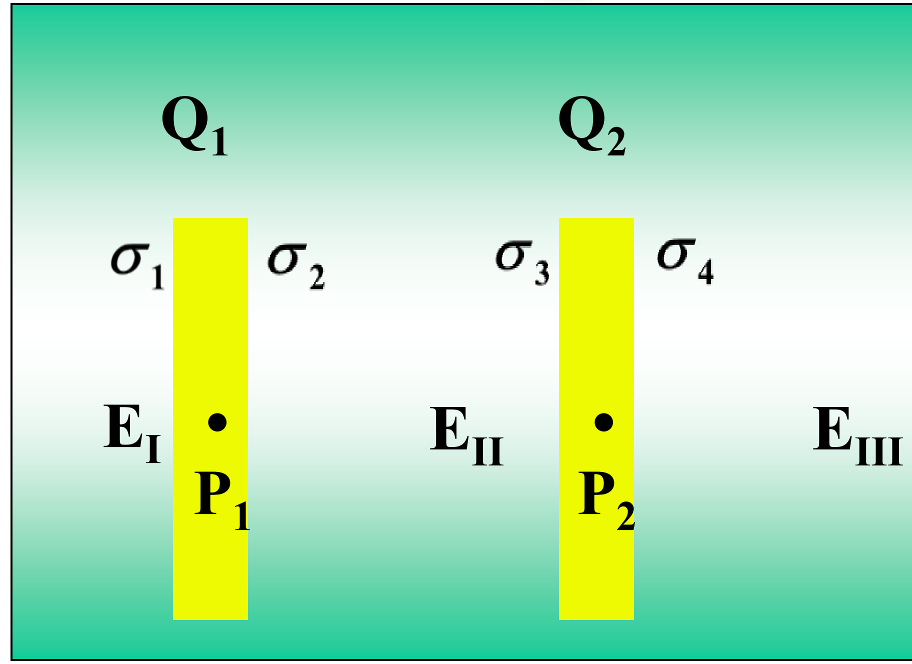
②若把第二块金属板接地，以上结果如何？



解：　电荷守恒

$$(\sigma_1+\sigma_2)s=Q_1$$

$$(\sigma_3+\sigma_4)s=Q_2$$



高斯定理 $\mathrm{E}_i=\dfrac{\sigma_i}{2\varepsilon_o}$

静电平衡条件

导体内部的场强为零

$$P_1:\frac{\sigma_1}{2\varepsilon_o}-\frac{\sigma_2}{2\varepsilon_o}-\frac{\sigma_3}{2\varepsilon_o}-\frac{\sigma_4}{2\varepsilon_o}=0$$

$$\sigma_1-\sigma_2-\sigma_3-\sigma_4=0$$

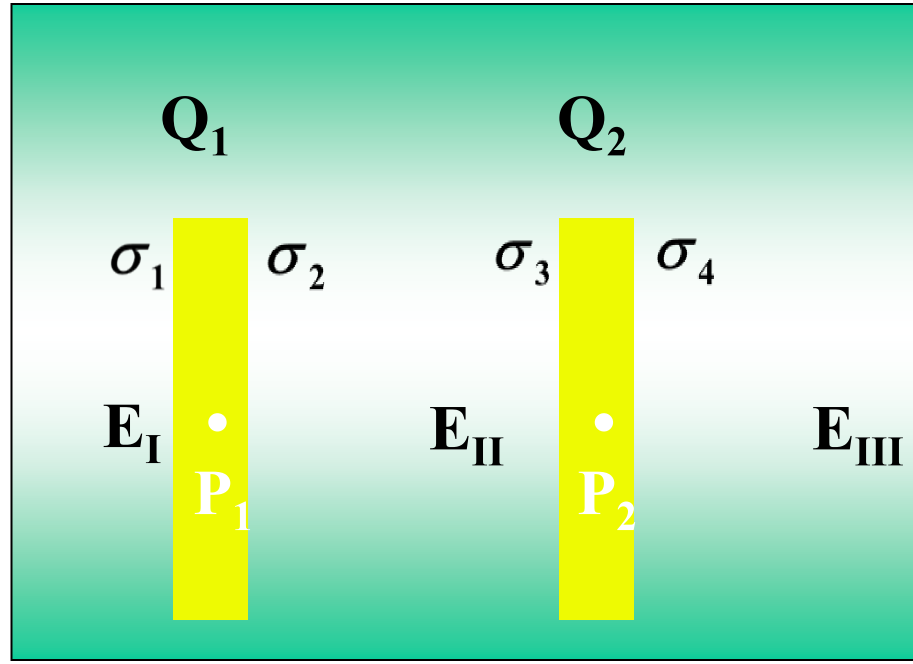
$$P_2:\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3-\sigma_4=0$$

解得：

$$\sigma_1=\sigma_4=\frac{Q_1+Q_2}{2s}$$

$$\sigma_2=-\sigma_3=\frac{Q_1-Q_2}{2s}$$

电场分布：



$$E_I = -\frac{1}{2\varepsilon_o}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3+\sigma_4)$$

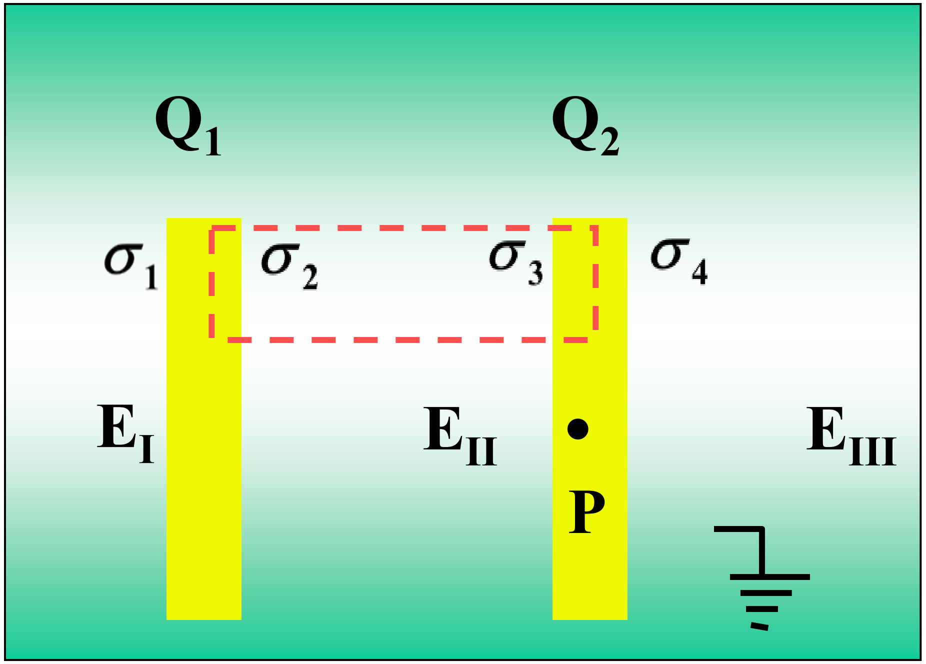
$$= -\frac{\sigma_1}{\varepsilon_o} = -\frac{Q_1+Q_2}{2\varepsilon_o s}$$

$$E_{II} = \frac{1}{2\varepsilon_o}(\sigma_1+\sigma_2-\sigma_3-\sigma_4) = -\frac{\sigma_2}{\varepsilon_o} = -\frac{Q_1-Q_2}{2\varepsilon_o s}$$

$$E_{III} = \frac{1}{2\varepsilon_o}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3+\sigma_4) = \frac{\sigma_4}{\varepsilon_o} = \frac{Q_1+Q_2}{2\varepsilon_o s}$$

(2) 如果第二块坂接地，则

$\sigma_4 = 0$



电荷守恒 $\sigma_1 + \sigma_2 = Q_1 / s$

高斯定理 $\sigma_2 + \sigma_3 = 0$

静电平衡条件

$$E_p = 0$$

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$$

解得：

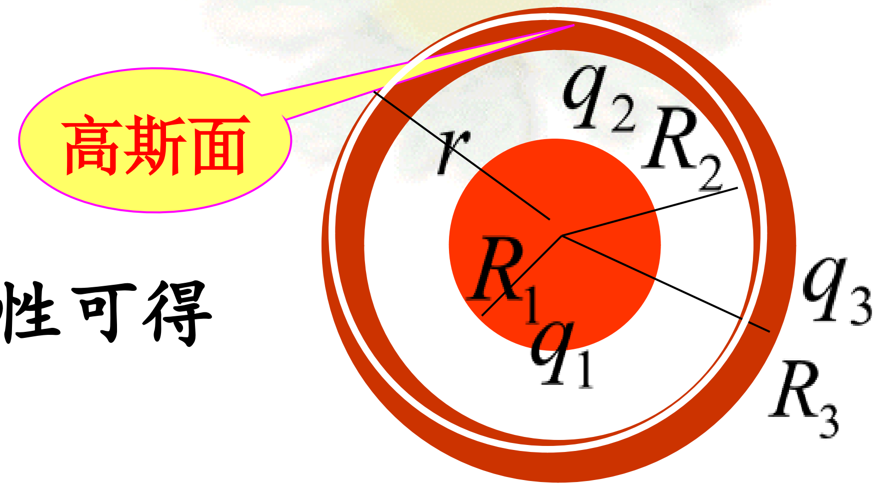
$$\sigma_1 = \sigma_4 = 0$$

$$\sigma_2 = -\sigma_3 = \frac{Q_1}{s}$$

$$E_I = 0, E_{II} = \frac{Q_1}{\varepsilon_0 S}, E_{III} = 0$$

例2、一个带电金属球半径R_1，带电量q_1，放在另一个带电球壳内，其内外半径分别为R_2、R_3，球壳带电量为 q 。试求此系统的电荷、电场分布以及球与球壳间的电势差。

解：设球壳内外表面电量：q_2,q_3



由高斯定律可得 $q_1 + q_2 = 0$

由电荷守恒可得 $q_3 = q - q_2$

由电荷分布和高斯定律及对称性可得

$$E = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_o r^2} \qquad R_1 < r < R_2$$

$$E = \frac{q_1 + q}{4\pi\varepsilon_o r^2} \qquad r > R_3$$

所以金属球A与金属壳B之间的电势差为：

$$U_{AB} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_o r^2} dr = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_o}\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right)$$

7-2 电介质的极化

•所谓电介质，是指不导电的物质，即绝缘体，内部没有可以移动的电荷。

•若把电介质放入静电场中，电介质原子中的电子和原子核在电场力的作用下，在原子范围内作微观的相对位移。

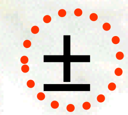
•达到静电平衡时，电介质内部的场强也不为零。

在外电场中电介质要受到电场的影响，同时也影响外电场。

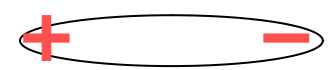
一、极化的微观机制

1、电介质的分类

无极分子：分子的正负电荷中心在无电场时是重合的，没有固定的电偶极矩，如H_2、CCl_4，CO_2，N_2, O_2等

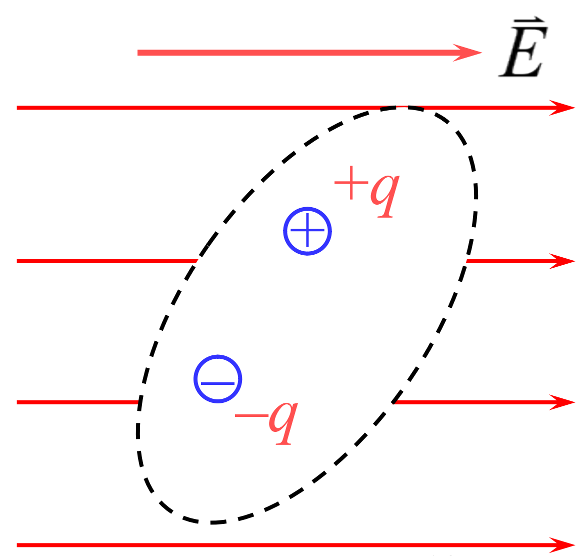


有极分子：分子的正负电荷中心在无电场时不重合的，有固定的电偶极矩，如H_2O、HCl等。



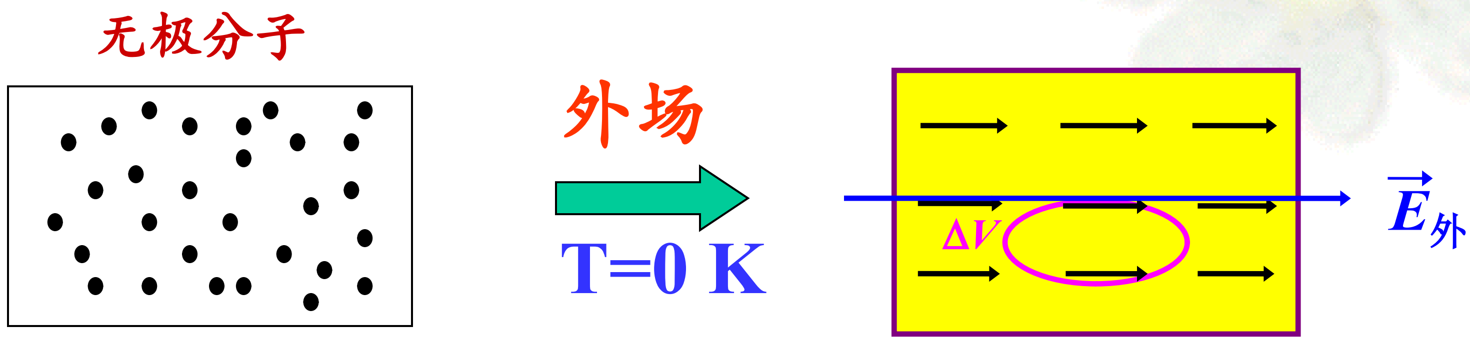
每一个分子的正电荷q集中于一点，称为正电荷的“重心”，负电荷-q集中于一点，称为负电荷的“重心”；

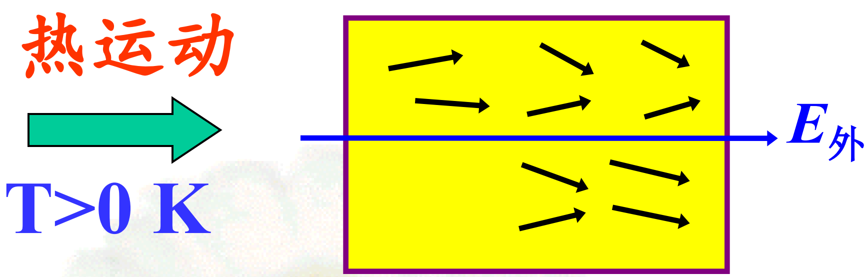
分子构成电偶极子 $p=ql$



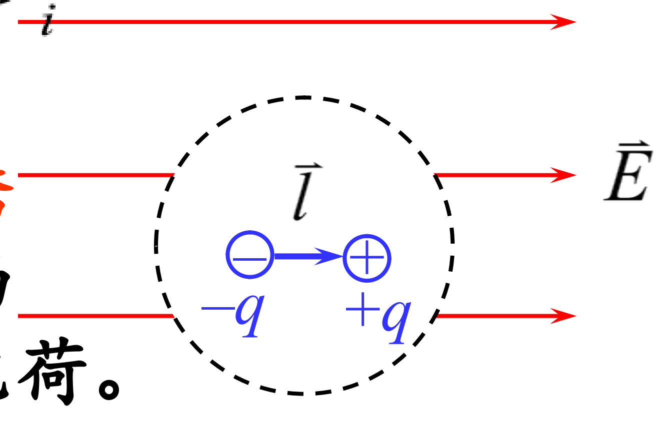
2、无极分子的极化机理——位移极化

无外电场时，分子的正负电荷中心重合；有外电场时，正、负电荷将被电场力拉开，偏离原来的位置，形成一个电偶极子，叫作**诱导电偶极矩**。





$$\sum_i \vec{p}_i \neq 0$$

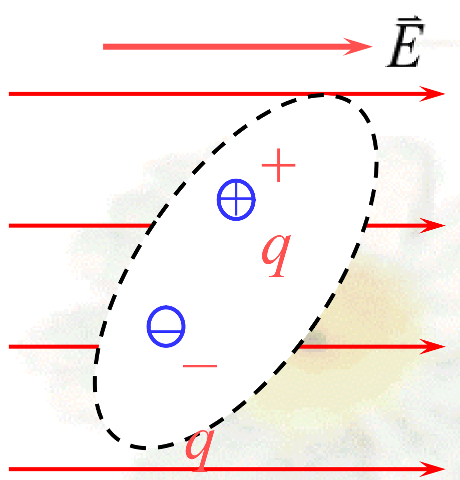


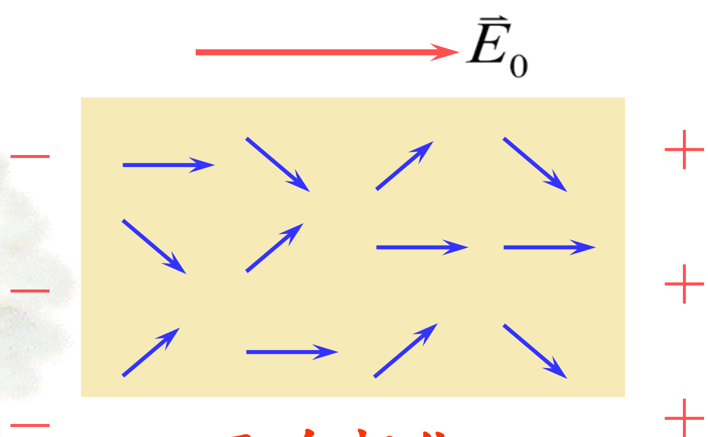
处于外电场，每个分子都有一定的**诱导电偶极矩**，以致在电介质与外电场垂直的两个表面上出现正电荷和负电荷。——**极化电荷**或**束缚电荷**。

3、有极分子的极化机理——取向极化

- 当没有外电场时，电偶极子的排列是杂乱无章的，因而对外不显电性。 $\sum_i \vec{p}_i = 0$

- 当有外电场时，每个电偶极子都将受到一个力矩的作用。在此力矩的作用下，电介质中的电偶极子将转向外电场的方向。 $\sum_i \vec{p}_i \neq 0$



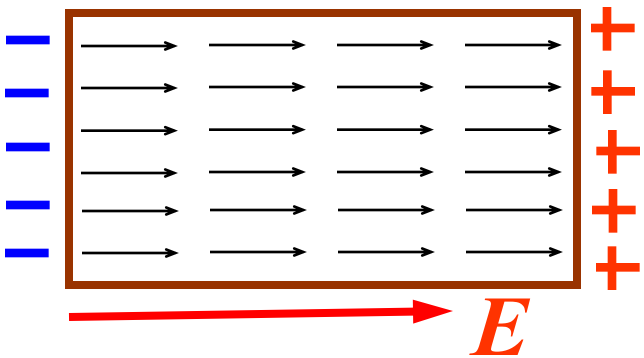


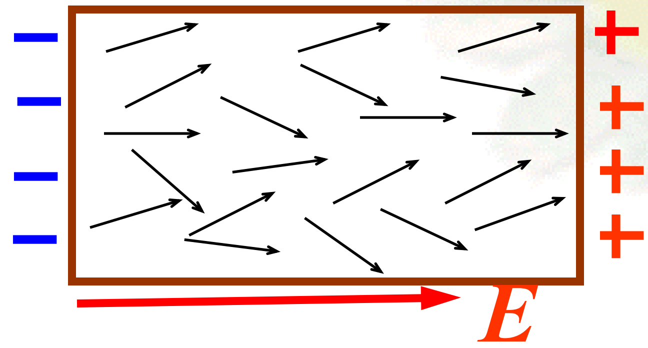
取向极化

- 在垂直于电场方向的两个表面上，将产生极化电荷。

4、极化电荷

在外电场中，出现束缚电荷的现象叫做电介质的极化。





二、极化状态的描述--电极化强度矢量

1、引入

在没有外电场时，电介质未被极化，内部宏观小体积元中各分子的电偶极矩的矢量和为零；当有外电场时，电介质被极化，此小体积元中的电偶极矩的矢量和将不为零。外电场越强，分子的电偶极矩的矢量和越大。用单位体积中分子的电偶极矩的矢量和来表示电介质的极化程度

2、电极化强度的定义

单位体积中分子的电偶极矩的矢量和叫作电介质的电极化强度。

$$\vec{P}=\frac{\sum \vec{p}}{\Delta V}$$

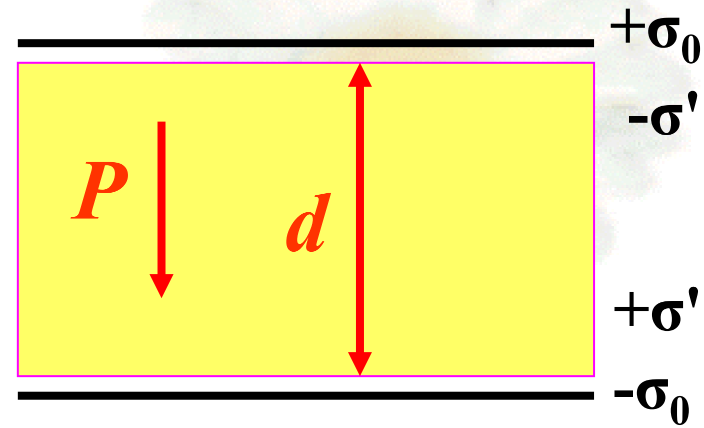
3、说明

•电极化强度用来表征电介质极化程度的物理量；

•单位：C.m^{-2}，与电荷面密度的单位相同；

•若电介质的电极化强度大小和方向相同，称为均匀极化；否则，称为非均匀极化。

4、电极化强度和极化电荷面密度的关系



在电介质中取一长为d、面积为ΔS的柱体，柱体两底面的极化电荷面密度分别为-σ'和+σ'，这样柱体内所有分子的电偶极矩的矢量和的大小为

$$\sum \vec{p}_i = \sum q_i \vec{l}_i = (\sigma' \Delta S)\vec{d}$$

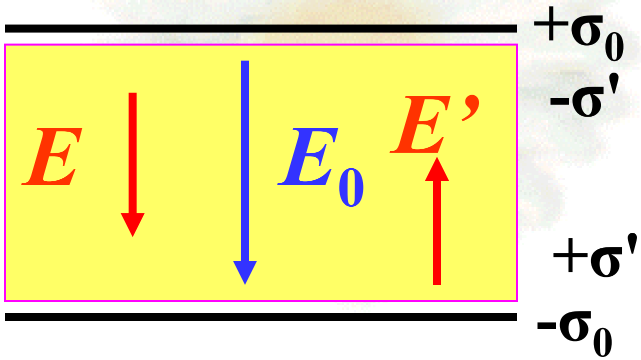
电极化强度的大小为

$$P = \frac{\sum p_i}{\Delta V} = \frac{\sigma' \Delta S d}{\Delta S d} = \sigma' \qquad \sigma' = \vec{P} \cdot \vec{n}$$

平板电容器中的均匀电介质，其电极化强度的大小对于极化产生的极化电荷面密度。

三、电介质中的电场强度

1、电介质中的电场强度



$$E_0=\sigma_0/\varepsilon_0$$

$$E'=\sigma'/\varepsilon_0$$

$$\vec{E}=\vec{E}_0+\vec{E}' \qquad E=E_0-E'$$

2、极化电荷与自由电荷的关系

$$E=\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}-\frac{\sigma'}{\varepsilon_0}=\frac{1}{\varepsilon_0}(\sigma_0-\sigma') \qquad E=\frac{E_0}{\varepsilon_r}$$

$$\sigma'=\sigma_0\left(1-\frac{1}{\varepsilon_r}\right) \qquad Q'=Q_0\left(1-\frac{1}{\varepsilon_r}\right)$$

3、电介质的极化规律

$$\left.\begin{aligned} &E_0=\sigma_0/\varepsilon_0 \\ &E=E_0/\varepsilon_r \\ &P=\sigma' \\ &\sigma'=\sigma_0\left(1-\frac{1}{\varepsilon_r}\right) \end{aligned}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{aligned} &P=(\varepsilon_r-1)\varepsilon_0 E \\ &\vec{P}=(\varepsilon_r-1)\varepsilon_0\vec{E} \\ &\chi=\varepsilon_r-1 \\ &\vec{P}=\chi\varepsilon_0\vec{E} \end{aligned}\right.$$

χ称为电介质的电极化率, 在各向同性线性电介质中它是一个纯数。

在高频条件下，电介质的相对电容率和外电场的频率有关。

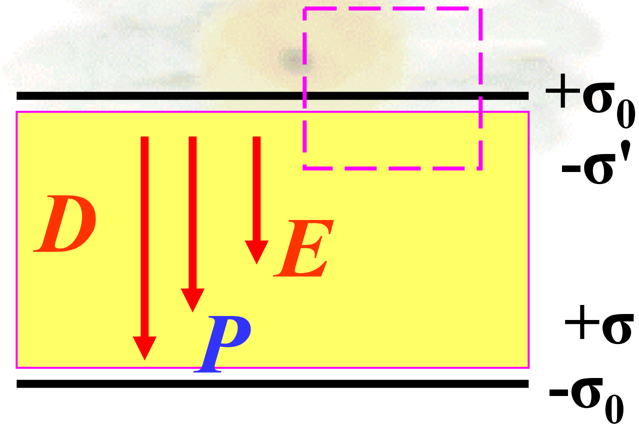
7-3 有电介质时的高斯定理

一、有电介质时的高斯定理

•设极板上的自由电荷的面密度为σ_0

•电介质表面上极化电荷面密度为σ'

•端面的面积为S



$$\oiint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\left(Q_0 - Q'\right)$$

$$Q_0 = \sigma_0 S \qquad Q' = \sigma' S$$

$$\oiint_S \vec{P}\cdot d\vec{S} = -\sigma' S = -Q'$$

$$Q' = Q_0\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_r}\right) \qquad Q_0 - Q' = Q_0 / \varepsilon_r$$

电位移矢量

$$\oiint_S (\varepsilon_0\vec{E} + \vec{P})\cdot d\vec{S} = Q_0 \qquad \vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}$$

令 $\vec{D}=\varepsilon_0\vec{E}+\vec{P}=\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E}=\varepsilon\vec{E}$

电位移通量

$$\oint\!\!\!\oint_S \vec{D}\cdot d\vec{S}=\sum_{(S内)} q_i = Q_0$$

只与自由电荷有关

在静电场中，通过任意一个闭合曲面的电位移矢量通量等于该面所包围的自由电荷的代数和，这就是**有介质时的高斯定理**。

二、电位移矢量和电场强度的关系

$$\vec{D}=\varepsilon_0\vec{E}+\vec{P}$$

$$\vec{D}=\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E}$$

$$\vec{P}=(\varepsilon_r-1)\varepsilon_0\vec{E}$$

关于电位移矢量的说明

- 电位移矢量是辅助量，电场强度才是基本量；
- 描述电场性质的物理量是电场强度和电势；
- 在电介质中，环路定理仍然成立，静电场是保守场。

三、有电介质时的高斯定理的应用

利用电介质的高斯定理可以使计算简化，原因是只需要考虑自由电荷，一般的步骤为，首先由高斯定理求出电位移矢量的分布，再由电位移矢量的分布求出电场强度的分布，这样可以避免求极化电荷引起的麻烦。

小　　结

静电场中的导体

- 静电感应 静电平衡条件
- 静电平衡时的电荷分布
- 静电屏蔽

•静电场中的电介质 $\vec{E}=\dfrac{\vec{E}_0}{\varepsilon_r}$

•电位移 $\vec{D}=\varepsilon_0\vec{E}+\vec{P}=\varepsilon\vec{E}$

•电介质中的高斯定理 $\oint\!\!\oint_S \vec{D}\cdot d\vec{S}=Q_0$