
## 本章目录

前言
△ § 15.1 电介质对电场的影响
§ 15.2 电介质的极化
§ 15.3 有介质时静电场的规律
△ § 15.4 电容器及其电容
△ § 15.5 电容器的能量、有介质时的电场能量
*△ § 15.6铁电体 、压电效应



## 前 言

电介质就是电的绝缘体。

在概念上电介质与导体构成一对矛盾体。

它们又对立、又依存； 在实际应用中，

它们的作用正相反，但又常常并用。

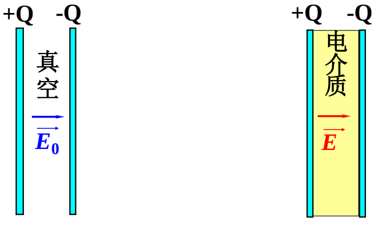
正如导体一样，研究电介质对电场的影响，

也是电学中的一个十分重要的问题。



## △ § 15.1 电介质对电场的影响

极板电量不变时，在极板间充满各向同性均匀电介质前后的场强关系



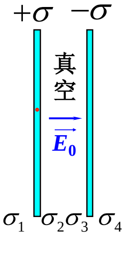



Questions

1、电场强度的分布如何？

2、电荷分布如何？

对称性分析可确定电场强度的分布



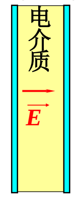

电荷守恒定律：
$$\sigma_1+\sigma_2=+\sigma$$
$$\sigma_3+\sigma_4=-\sigma$$

高斯定理： $\sigma_2+\sigma_3=0$

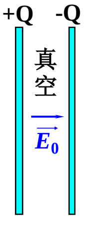
导体静电平衡条件：
$$\frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0}=\frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0}+\frac{\sigma_3}{2\varepsilon_0}+\frac{\sigma_4}{2\varepsilon_0}$$
$$\Rightarrow \sigma_1=\sigma_2+\sigma_3+\sigma_4$$
$$\Rightarrow \sigma_1=\sigma_4=0 \qquad \sigma_2=\sigma=-\sigma_3$$



极板电量不变时，在极间充满各向同性均匀电介质时电场强度 $\vec{E}$ 的分布与真空时一样




$$\boxed{\vec{E}=\vec{E}_0/\varepsilon_r}$$




$\varepsilon_r$ —介质的相对介电常数

（相对电容率）

（ **relative permitivity**）

$$\boxed{\vec{E}=\vec{E}_0/\varepsilon_r}$$

$\varepsilon_r$与介质种类和状态有关。 $\varepsilon_r \ge 1$

书中表15.1列出了某些电介质的$\varepsilon_r$，

其中：空气$\varepsilon_r$=1，

水（20°C， 1atm） $\varepsilon_r$=80，

钛酸钡$\varepsilon_r=10^3$—$10^4$。

演示 极间电介质对电场的影响

7

## § 15.2 电介质的极化

分子的构成

单原子分子 He， Ne等

双原子分子 $H_2$，$Cl_2$， HCl

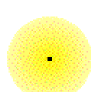
多原子分子 $H_2O$，$CO_2$

8

## 一.电介质分子可分为有极和无极两类

### 1.无极分子（nonpolar molecule）：$\pm$

分子电荷的正、负“重心”重合,无固有电偶极矩。如：He，Ne， $CH_4$ …

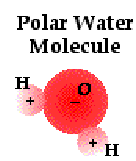


Uniform distribution of electron cloud about the nucleus.

9

### 2.有极分子（polar molecule）：$- \; +$

分子电荷的正、负“重心”分开，具有固有电偶极矩，$p \sim 10^{-30}$ C·m 。 如:水， HCl，$NH_3$ …




10

## 二. 极化机制

### 1.位移极化（displacement polarization）

对无极分子 $\vec{E}=0$ $\vec{E}\neq 0$

$\pm$ $- \; +$ $\vec{E}$

$\vec{p}=0$ $\vec{p} \,/\!/\, \vec{E}$， $\vec{E}\uparrow \rightarrow \vec{p}\uparrow$

Electron Cloud Distribution

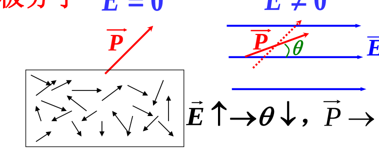

Uniform distribution of electron cloud about the nucleus.

Non-uniform distribution of electron cloud - separation of + and - charge within atom.

11

### 2.取向极化（orientation polarization）

对有极分子 $\vec{E}=0$ $\vec{E}\neq 0$ $W=-\vec{P}\cdot\vec{E}$




$\vec{E}\uparrow \rightarrow \theta\downarrow$，$\vec{P}\rightarrow$ 平行$\vec{E}$

TV 电介质的极化 电介质的极化.mpg

12

**说明：**

①由于热运动，$\vec{p}$不是都平行于$\vec{E}$；

②有极分子也有位移极化，不过在静电场中主要是取向极化，但在高频场中，位移极化反倒是主要的了。

## 三. 极化强度（electric polarization）

定义**极化强度矢量**：$\boxed{\vec{P} = \lim\limits_{\Delta V \to 0} \dfrac{\sum\limits_i \vec{p}_i}{\Delta V}}$

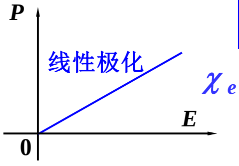
这里ΔV→0是指宏观上够小，但微观上够大。



$$\boxed{\vec{P} = \lim \frac{\sum\limits_i \vec{p}_i}{\Delta V}}$$

极化强度的单位 $\dfrac{C \cdot m}{m^3} = \dfrac{C}{m^2}$

$E$不太强时，在各向同性介质内有：




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

$\chi_e$—电极化率（polarizability）

$\boxed{\chi_e = \varepsilon_r - 1}$ $\quad \chi_e \geq 0$

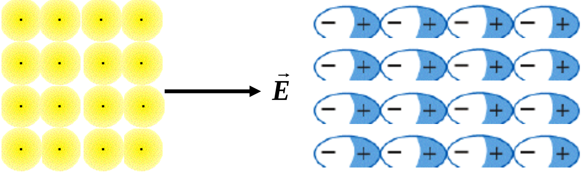
在各向异性介质内，一般地说 $\vec{p} \not\parallel \vec{E}$。



## 四.极化电荷（polarization charge）

### 1.极化面电荷

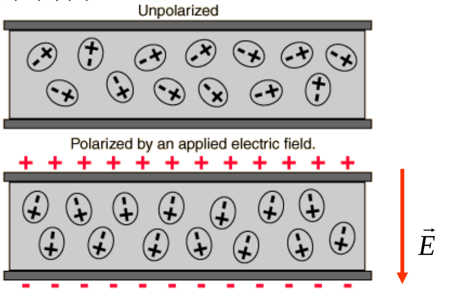
以位移极化为例




介质在电场中出现附加电荷称极化（polarization）



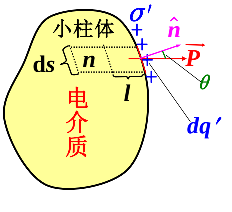
以转向极化为例




介质在电场中出现附加电荷称极化（polarization）



设 $\vec{p}_{分子} = q\vec{l}$，单位体积分子数为 $n$，则 $\vec{P} = n\vec{p}_{分子}$



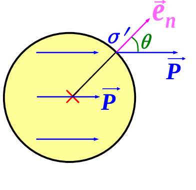

$$
\begin{aligned}
dq' &= n \cdot (ds \cdot l \cdot \cos\theta) q \\
&= nql\cos\theta \cdot ds \\
&= np_{分子} \cdot \cos\theta \cdot ds \\
&= P \cdot \cos\theta \cdot ds \\
&= P_n ds = \vec{P} \cdot d\vec{s}
\end{aligned}
$$

$$\sigma' = dq'/ds = P\cos\theta = P_n$$



[例]已知：介质球均匀极化，极化强度为$\vec{P}$。

求：$\sigma'$

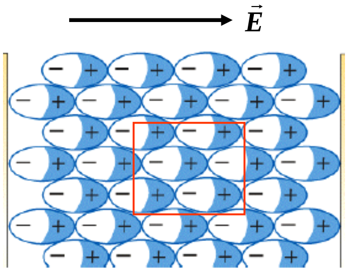



解：

$$\sigma' = \vec{P} \cdot \vec{e}_n = P_n = P \cdot \cos\theta$$

**2.极化体电荷：**

各向同性均匀极化介质：$\rho' = 0$



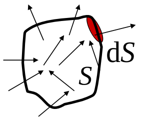

19

**非均匀极化：**

在已极化的介质内任意作一闭合面$S$
$S$ 将把位于$S$ 附近的电介质分子分为两部分

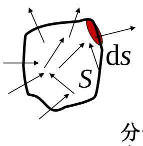
一部分在 $S$ 内　一部分在 $S$ 外

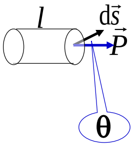
假定负电荷不动，正电荷移动电偶极矩穿过$S$ 的分子对$S$内的极化电荷有贡献




20

**A. 小面元ds对面S内极化电荷的贡献**



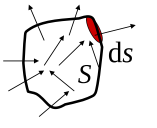

分子数密度 $n$

在ds附近薄层内认为介质均匀极化

$$\mathrm{d}q' = -qnl\,\mathrm{d}s\cos\theta = -P\mathrm{d}s\cos\theta = -P_n\mathrm{d}s$$

$$= -\vec{P}\cdot\mathrm{d}\vec{s}$$

21




$$\boxed{\mathrm{d}q' = -P_n\mathrm{d}s = -\vec{P}\cdot\mathrm{d}\vec{s}}$$

**B.在S所围的体积内的极化电荷$q'$与$\vec{P}$的关系**

$$q' = -\oint_S \vec{P}\cdot\mathrm{d}\vec{s}$$

$$\iiint_V \rho'\mathrm{d}V = -\iiint_V \nabla\cdot\vec{P}\mathrm{d}V$$

$$\rho' = -\nabla\cdot\vec{P}$$

在直角坐标中 $\rho' \equiv -\nabla\cdot\vec{P} = -\left(\frac{\partial P_x}{\partial x} + \frac{\partial P_y}{\partial y} + \frac{\partial P_z}{\partial z}\right)$

22

$$\rho' \equiv -\nabla\cdot\vec{P} = -\left(\frac{\partial P_x}{\partial x} + \frac{\partial P_y}{\partial y} + \frac{\partial P_z}{\partial z}\right)$$

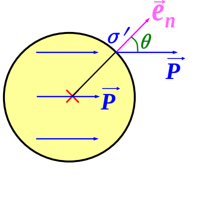
$$\vec{R} = x^2\vec{i} + 2xy\vec{j} + z^2\vec{k} = (x^2, 2xy, z^2)$$

$$\nabla\cdot\vec{R} = 2x + 2x + 2z = 4x + 2z$$

23

[例]已知：介质球均匀极化，极化强度为$\vec{P}$。

求：体电荷密度$\rho'$

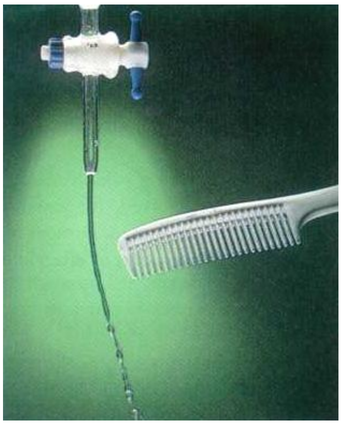



解：

$$\rho' = -\nabla\cdot\vec{P} = 0$$

24

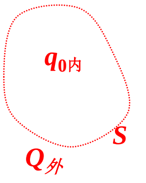
带静电的梳子为什么能吸引水柱？



25

## § 15.3 有介质时静电场的规律

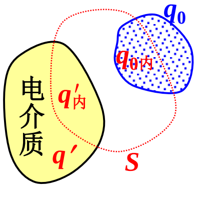
### 一. $\vec{D}$的高斯定理




真空中电场强度的高斯定理和环路定理

$$\begin{cases} \oint_S \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{s} = \dfrac{\sum q_{0内}}{\varepsilon_0} \\ \oint_L \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = 0 \end{cases}$$

26




$$\left.\begin{array}{l} q_0 \rightarrow \vec{E}_0 \\ q' \rightarrow \vec{E}' \end{array}\right\} \vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

$$\begin{cases} \oint_S \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{s} = \dfrac{1}{\varepsilon_0}\left(\sum q_{0内} + \sum q'_内\right) \\ \oint_L \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = 0 \end{cases}$$

又 $\quad \sum q'_内 = -\oint_S \vec{P}\cdot \mathrm{d}\vec{s}$

有： $\oint_S \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{s} = \dfrac{\sum q_{0内}}{\varepsilon_0} - \dfrac{1}{\varepsilon_0}\cdot \oint_S \vec{P}\cdot \mathrm{d}\vec{s}$

27

$$\oint_S \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{s} = \frac{\sum q_{0内}}{\varepsilon_0} - \frac{1}{\varepsilon_0}\cdot \oint_S \vec{P}\cdot \mathrm{d}\vec{s}$$

$\therefore \quad \oint_s (\varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P})\cdot \mathrm{d}\vec{s} = \sum q_{0内}$

令 $\quad \boxed{\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}}$

$\vec{D}$ 电位移矢量（**electric displacement vector**）

于是有 $\quad \boxed{\oint_S \vec{D}\cdot \mathrm{d}\vec{s} = \sum q_{0内}}$

$\boxed{\oint_S \vec{D}\cdot \mathrm{d}\vec{s}}$ 电位移通量

28

$\boxed{\oint_S \vec{D}\cdot \mathrm{d}\vec{s} = \sum q_{0内}}$ — $\vec{D}$的高斯定理

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

对各向同性介质 $\quad \vec{P} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\vec{E}$

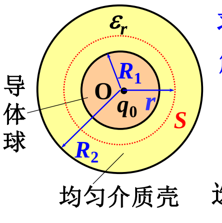
$\therefore \quad \boxed{\vec{D} = \varepsilon_0\varepsilon_r \vec{E} = \varepsilon\, \vec{E}}$

$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ 称介质的介电常数（电容率）

（**permittivity**）

29

[例1] 已知：导体球$R_1$、$q_0$和均匀介质球壳$R_2$、$\varepsilon_r$




求：$\vec{E}$，$q'$的分布。

解： 导体球内：$\vec{E}_内 = 0$

导体球外：介质和电场球对称，

$\vec{D} = D（r）\vec{e}_r$

选高斯面 S，令其半径$r > R_1$，

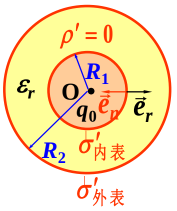
$$\oint_S \vec{D}\cdot \mathrm{d}\vec{s} = D\cdot 4\pi r^2 \overset{(高)}{=} q_0 \rightarrow \vec{D} = q_0\vec{e}_r \big/ 4\pi r^2$$

介质外：$\vec{E}_外 = \vec{D}\big/\varepsilon_0 = q_0\vec{e}_r \big/ 4\pi\varepsilon_0 r^2 = \vec{E}_0$

介质内：$\vec{E}_介 = \vec{D}\big/\varepsilon_0\varepsilon_r = q_0\vec{e}_r \big/ 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r r^2 = \vec{E}_0\big/\varepsilon_r$

30

## 下面求极化电荷$q'$的分布：




介质内部：$\left.\begin{aligned}\varepsilon_r &= 常数\\ \rho_0 &= 0\end{aligned}\right\} \Rightarrow \rho'=0$

$$\vec{E}_{介}=\vec{D}/\varepsilon_0\varepsilon_r = q_0\vec{e}_r/4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r r^2$$

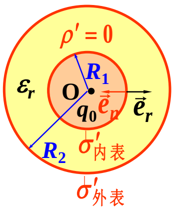
$$\vec{P}=\varepsilon_0(\varepsilon_r-1)q_0\vec{e}_r/4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r r^2=\frac{q_0(\varepsilon_r-1)}{4\pi\varepsilon_r r^2}\vec{e}_r$$

$$\nabla\cdot\vec{V}=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2V_r\right)+\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}(\sin\theta V_\theta)+\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial V_\phi}{\partial\phi}$$

$$\nabla\cdot\vec{P}=0$$



## 极化电荷$q'$的分布




介质内表面：

$$\sigma'_{内表}=P_n\big|_{r=R_1}=\vec{P}\cdot\vec{e}_n\big|_{r=R_1}$$

$$=(1-\frac{1}{\varepsilon_r})\vec{D}\cdot(-\vec{e}_r)\big|_{r=R_1}$$

$$=-(1-\frac{1}{\varepsilon_r})\frac{q_0}{4\pi R_1^2}=-(1-\frac{1}{\varepsilon_r})\sigma_0$$

$$q'_{内表}=4\pi R_1^2\cdot\sigma'_{内表}=-(1-\frac{1}{\varepsilon_r})q_0$$



介质外表面：

$$\sigma'_{外表}=P_n\big|_{r=R_2}=\vec{P}\cdot\vec{e}_r\big|_{r=R_2}=(1-\frac{1}{\varepsilon_r})\frac{q_0}{4\pi R_2^2}$$

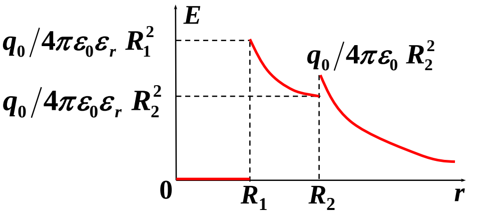
$$q_{外表}=4\pi\ R_2^2\cdot\sigma'_{外表}=(1-\frac{1}{\varepsilon_r})\cdot q_o=-q'_{内表}$$



导体球内：$\vec{E}_{内}=0$

介质外：$\vec{E}_{外}=\vec{D}/\varepsilon_0=q_0\vec{e}_r/4\pi\varepsilon_0 r^2=\vec{E}_0$

介质内：$\vec{E}_{介}=\vec{D}/\varepsilon_0\varepsilon_r=q_0\vec{e}_r/4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r r^2=\vec{E}_0/\varepsilon_r$




思考 为什么曲线不连续？

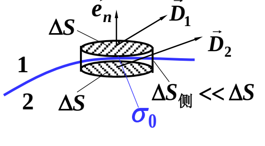


## 二. 静电场的界面关系

### 1.界面的法向：

$$\oint_{扁柱体面}\vec{D}\cdot\mathrm{d}\vec{s}=\vec{D}_1\cdot(\Delta S\ \vec{e}_n)+\vec{D}_2\cdot[(\Delta S(-\vec{e}_n)]$$

$$=(D_{1n}-D_{2n})\Delta S\underset{(高)}{=}\sigma_0\Delta S$$




$\boxed{D_{1n}-D_{2n}=\sigma_0}$ $\vec{n}$: $2\rightarrow1$

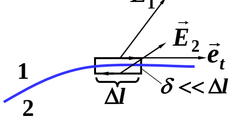
$$\vec{D}=\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E}\Rightarrow D_{1n}=\varepsilon_0\varepsilon_{r1}E_{1n}\qquad D_{2n}=\varepsilon_0\varepsilon_{r2}E_{2n}$$

$$\boxed{\varepsilon_0\varepsilon_{r1}E_{1n}-\varepsilon_0\varepsilon_{r2}E_{2n}=\sigma_0}$$



### 2.界面的切向：

$$\oint_{扁矩形边}\vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l}=\vec{E}_1\cdot(\Delta l\cdot\vec{e}_t)+\vec{E}_2\cdot(-\Delta l\cdot\vec{e}_t)$$

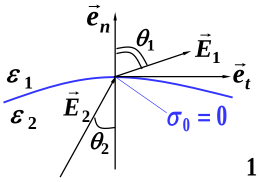



$$=(E_{1t}-E_{2t})\Delta l\underset{(环)}{=}0$$

$$\boxed{E_{1t}=E_{2t}}$$

## 3. 对各向同性介质交界面

若 $\sigma_0=0$，则 $D_{1n}=D_{2n}\rightarrow\varepsilon_1E_{1n}=\varepsilon_2E_{2n}$ ①




$E_{1t}=E_{2t}$ ②

$$\frac{②}{①}:\frac{1}{\varepsilon_1}\cdot\frac{E_{1t}}{E_{1n}}=\frac{1}{\varepsilon_2}\cdot\frac{E_{2t}}{E_{2n}}$$

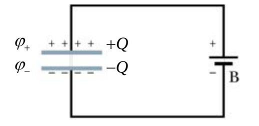
E线的“折射”

$$\frac{1}{\varepsilon_1}\mathrm{tg}\theta_1=\frac{1}{\varepsilon_2}\mathrm{tg}\theta_2\rightarrow\frac{1}{\varepsilon_{r1}}\mathrm{tg}\theta_1=\frac{1}{\varepsilon_{r2}}\mathrm{tg}\theta_2$$

若 $\varepsilon_{r1}>\varepsilon_{r2}$，则 $\theta_1>\theta_2$。

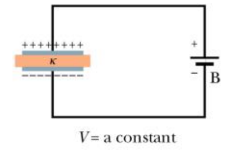
37

## △ § 15.4电容器及其电容 (capacitor and capacity)




$U=\varphi_+-\varphi_-$

$C=\dfrac{Q}{U}$

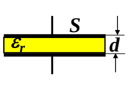



$C=\dfrac{\varepsilon_0\varepsilon_rS}{d}$

38

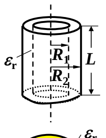
本节全部自学，要搞清以下几种电容器：

平板电容器：



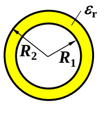

$\boxed{C=\dfrac{\varepsilon_0\varepsilon_rS}{d}}$

圆柱形电容器：




$\boxed{C=\dfrac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_rL}{\ln(R_2/R_1)}}$

球形电容器：




$\boxed{C=\dfrac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_rR_1R_2}{R_2-R_1}}$

39

## Dielectric Strength

The maximum value of the electric field that a dielectric material can tolerate before breaking down.

**Limits voltage on capacitor *(breakdown potential)***

**Air 3kV/mm**
**Paper 16kV/mm**
**Pyrex 14kV/mm**
**Strontium titanate 8kV/mm**

*(kV/mm = million volts/m)*

- *Dielectric breakdown of air is temporary but that of solid dielectric normally leaves permanent damage*
- *Most solid dielectric has higher dielectric strength than air, which raises the maximum operating voltage of the capacitor*
- *Solid dielectric may provide mechanical support*

40

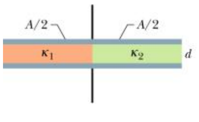
## Non-uniform Parallel-plate Capacitor 1

***Equivalent to 2 capacitors in parallel***

$$C=C_1+C_2=\frac{\kappa_1\varepsilon_0A/2}{d}+\frac{\kappa_2\varepsilon_0A/2}{d}$$

$$=\frac{\varepsilon_0A}{d}\left(\frac{\kappa_1+\kappa_2}{2}\right)$$

$$V=\frac{Q}{C}=\frac{2d\cdot Q}{\varepsilon_0A(\kappa_1+\kappa_2)}$$

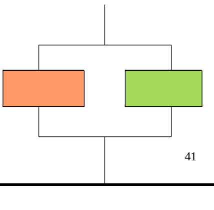



***Potential drop in each V is the same.***

$$Q_1=C_1V=\frac{\kappa_1}{\kappa_1+\kappa_2}Q,\quad Q_2=C_2V=\frac{\kappa_2}{\kappa_1+\kappa_2}Q$$

***Note*** $Q_1\neq Q_2$ ***if*** $\kappa_1\neq\kappa_2$

***even though*** $V_1=V_2,\ E_1=E_2$



41

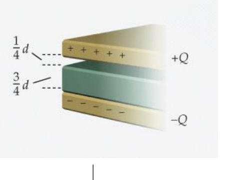
## Non-uniform Parallel-plate Capacitor 2

***Equivalent to 2 capacitors in series***

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}=\frac{d/4}{\varepsilon_0A}+\frac{3d/4}{\kappa\varepsilon_0A}$$

$$=\frac{d}{\varepsilon_0A}\left(\frac{1}{4}+\frac{3}{4}\frac{1}{\kappa}\right)$$

$$V=\frac{Q}{C}=\frac{d\cdot Q}{\varepsilon_0A}\left(\frac{1}{4}+\frac{3}{4\kappa}\right)$$

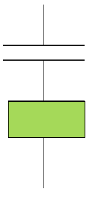



***(Free) charge in each Q is the same.***

$$V_1=Q/C_1=\frac{Q}{(\varepsilon_0A/d)}\frac{(\varepsilon_0A/d)}{C_1}=\frac{1}{4}V_0,$$

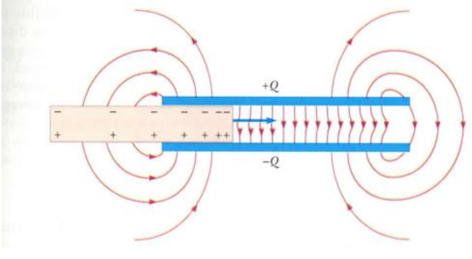
$$V_2=Q/C_2=\frac{Q}{(\varepsilon_0A/d)}\frac{(\varepsilon_0A/d)}{C_2}=\frac{3}{4\kappa}V_0,$$

***Note*** $V_1/V_2\neq1/3$ ***if*** $\kappa\neq1$



42

电容器的边缘效应。






下面提出几个可供深入思考和调研的问题：
（可将其作为读书报告的内容）

1.什么是分布电容（杂散电容、寄生电容）？
它在实际问题中有何影响？如何减少影响？

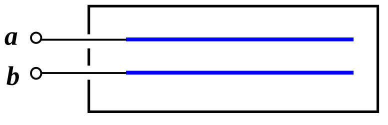
2.当电容器两极板带电量不是等量异号时，
如何由定义$C=Q/U$来计算电容量？($Q$取何值？

3.举出电容器的应用二、三例，说明应用原理。

4.电容器的边缘效应。

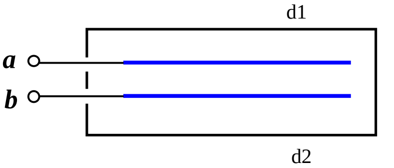


5.如图示的平板电容器，被一金属盒子包围，
电容器与金属盒之间是绝缘的。

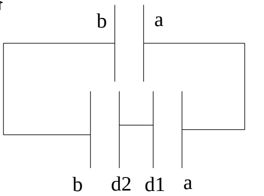



问：从$a$、$b$端看进去，该系统的电容量
是否等于平板电容器的电容量？
要求说明理由。(参看习题15.14）






等效电路






## △ § 15.5电容器的能量、有介质时的电场能量

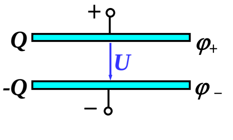
### 一. 电容器的能量 （电容器中无介质时）

总电能 $W=\frac{1}{2}(q_+\varphi_+ + q_-\varphi_-)$

$$=\frac{1}{2}Q(\varphi_+ - \varphi_-)$$

$$=\frac{1}{2}QU$$

$$=\frac{1}{2}CU^2$$




$U=\varphi_+ - \varphi_-$ — 极间电压



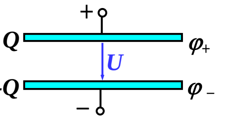
$$W=\int_q \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 \mathrm{d}V$$

总电能 $=\frac{1}{2}\varepsilon_0(\frac{U}{d})^2\int_q \mathrm{d}V$

$$=\frac{1}{2}\varepsilon_0(\frac{U}{d})^2 Sd$$

$$=\frac{1}{2}U^2\frac{\varepsilon_0 S}{d}$$

$$=\frac{1}{2}CU^2$$

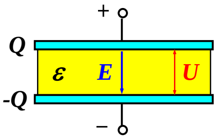



$U=\varphi_+ - \varphi_-$ — 极间电压

演示 电容器储能点亮闪光灯。

## 二. 有介质时静电场的能量密度

以平板电容器为例来分析：




$$W=\frac{1}{2}CU^2=\frac{1}{2}\frac{\varepsilon S}{d}\cdot(Ed)^2$$
$$=\frac{1}{2}\varepsilon E^2\cdot(S\cdot d)$$

电场能量密度：$w_e=\dfrac{W}{Sd}$

$$\boxed{w_e=\frac{1}{2}\varepsilon E^2=\frac{1}{2}\vec{E}\cdot\vec{D}}$$



可以证明，$w_e=\dfrac{1}{2}\vec{E}\cdot\vec{D}$ 对所有线性极化介质（包括各向异性的线性极化介质）都成立。

在空间任意体积V内的电场能：

$$W=\int_V w_e\,\mathrm{d}V=\int_V\frac{1}{2}\vec{E}\cdot\vec{D}\,\mathrm{d}V$$

对各向同性介质：$W=\displaystyle\int_V\frac{1}{2}\varepsilon E^2\cdot\mathrm{d}V$

在真空中：$W=\displaystyle\int_V\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2\cdot\mathrm{d}V$（同第十三章结果）



## *△ § 15.6 铁电体（ferroelectrics）和压电效应（piezoelectric effect）

（自学）

演示　压电效应（拾音法）



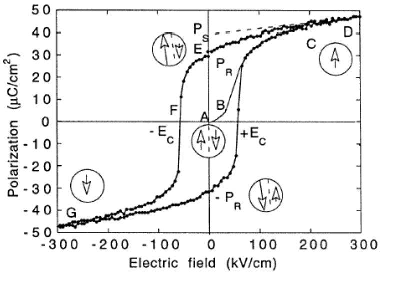


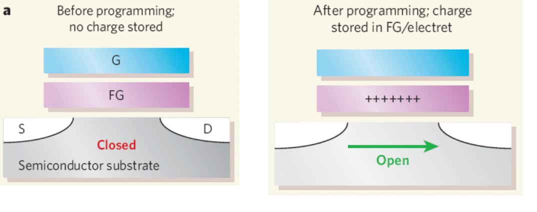

**Figure 8.** Ferroelectric ($P$–$E$) hysteresis loop. Circles with arrows represent the polarization state of the material at the indicated fields. The symbols are explained in the text. The actual loop is measured on a (111)-oriented 1.3 $\mu$m thick sol-gel $Pb(Zr_{0.45}Ti_{0.55})O_3$ film. (Experimental data courtesy of D V Taylor.)



第十五章结束

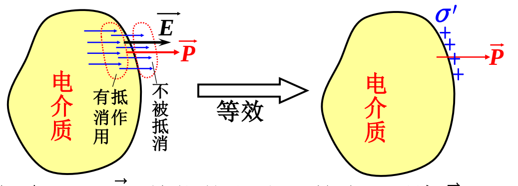


静电的应用实例—Transistor and Flash memory

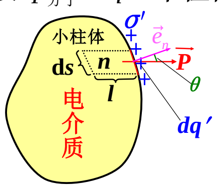



G-gate FG-floating gate electret-organic polymer

NATURE|Vol 445|18 January 2007



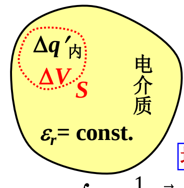

设 $\vec{p}_{分子}=q\vec{l}$，单位体积分子数为 $n$，则 $\vec{P}=n\vec{p}_{分子}$




$$\mathrm{d}q' = n\cdot(\mathrm{d}s\cdot l\cdot\cos\theta)q$$
$$= nql\cos\theta\cdot\mathrm{d}s$$
$$= np_{分子}\cdot\cos\theta\cdot\mathrm{d}s$$
$$= P\cdot\cos\theta\cdot\mathrm{d}s$$
$$\sigma' = \mathrm{d}q'/\mathrm{d}s = P\cos\theta = P_n$$



[例] 证明各向同性均匀介质内$\rho_0=0$处必$\rho'=0$。




证： $\Delta q'_{内} = -\oint_S \vec{P}\cdot\mathrm{d}\vec{s}$

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

$$=\varepsilon_0(\varepsilon_r-1)\frac{\vec{D}}{\varepsilon_0\varepsilon_r} = (1-\frac{1}{\varepsilon_r})\vec{D}$$

$$\therefore \Delta q'_{内} = -\oint_S(1-\frac{1}{\varepsilon_r})\vec{D}\cdot\mathrm{d}\vec{s} \overset{\text{均匀}}{=} (\frac{1}{\varepsilon_r}-1)\oint_S\vec{D}\cdot\mathrm{d}\vec{s} = (\frac{1}{\varepsilon_r}-1)\cdot\Delta q_{0内}$$

$$\rho' = \lim_{\Delta V\to 0}\frac{\Delta q'_{内}}{\Delta V} = (\frac{1}{\varepsilon_r}-1)\cdot\lim_{\Delta V\to 0}\frac{\Delta q_{0内}}{\Delta V} = (\frac{1}{\varepsilon_r}-1)\rho_0$$

$$\therefore \quad \rho_0 = 0 \to \rho' = 0\text{。}$$