

6°. Si el dieléctrico se encuentra en un campo eléctrico homogéneo, la neutralidad eléctrica de un volumen suyo cualquiera ΔV que contenga un número de moléculas suficientemente grande, se asegura por la compensación mutua de las cargas de signos contrarios de los dipolos adyacentes (fig. III.5.3). En las capas delgadas próximas a la superficie S_1 y S_2 del dieléctrico, que limitan su volumen como resultado de la polarización dieléctrica aparecen *cargas de polarización superficiales*.

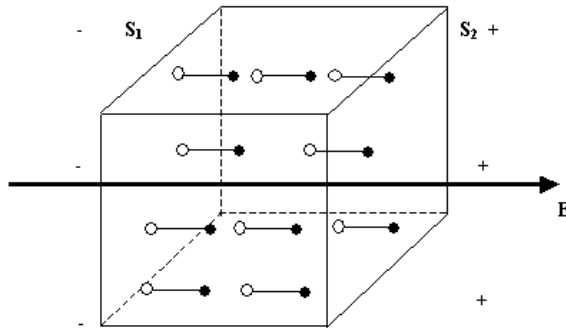


FIGURA III.5.3

Junto a la superficie por la cual entran las líneas de fuerza (III.2.1.4°) del campo externo, aparecen las cargas negativas de los extremos de las moléculas de dipolos, y en la superficie opuesta surgen las cargas positivas. La densidad superficial (III.2.2.3°) σ_p de las cargas de polarización se calcula por la fórmula

$$\sigma_p = P_n$$

en la que P_n es la proyección del vector P_ϵ sobre la normal externa a la superficie del dieléctrico.

En un campo eléctrico heterogéneo, la polarización del dieléctrico tampoco es homogénea y el vector de polarización P_ϵ depende de las coordenadas. Por esto, además de las cargas de polarización superficiales, surgen cargas de polarización volumétricas distribuidas con la densidad volumétrica (III.2.2.3°) ρ_p :

$$\rho_p = -\text{div } P_\epsilon$$

donde $\text{div } P_\epsilon = \frac{\partial P_{\epsilon x}}{\partial x} + \frac{\partial P_{\epsilon y}}{\partial y} + \frac{\partial P_{\epsilon z}}{\partial z}$ es la divergencia del vector de polarización.

§ III.5.3 Relación entre los vectores de desplazamiento, intensidad y polarización

1°. En las sustancias se distinguen dos tipos de cargas eléctricas: libres y ligadas.

Se llaman *cargas ligadas* las que entran en la composición de los átomos y las moléculas, y también las cargas de los iones en los sólidos cristalinos con red iónica (VII.1.1.3°). Las cargas no ligadas con las partículas de las sustancias, antes mencionadas reciben el nombre de *cargas libres*. Son cargas libres: a) las cargas de los portadores de corriente en los medios conductores (los electrones de conducción de los metales y semiconductores (III.3.4.1°), los huecos de los semiconductores (VII.2.10.3°), los iones de los electrolitos y los gases, etc.); b) las cargas excedentes comunicadas al cuerpo por diversos procedimientos que alteran su neutralidad eléctrica. Por ejemplo, las cargas aportadas desde fuera sobre la superficie de un dieléctrico.

2°. En un dieléctrico, en un caso general, el campo eléctrico es creado tanto por las cargas libres como por las ligadas. El vector intensidad E caracteriza el campo resultante en el dieléctrico, creado por ambos tipos de cargas, y depende de las propiedades eléctricas de éste, es decir, de su permitividad relativa ϵ (III.1.2.4°). Pero la fuente primaria del campo eléctrico en el dieléctrico son las cargas libres. El hecho es que el campo de cargas ligadas surge en el dieléctrico como resultado de la polarización de este último, que se encuentra en el campo eléctrico externo creado por el sistema de cargas eléctricas libres.

3°. Los conocimientos expuestos en los pp. 1° y 2° requieren precisar el teorema de Ostrogradski – Gauss (III.2.3.3°). La suma algebraica de las cargas $\sum_{i=1}^h q_i$, que figura en el segundo miembro del teorema, debe entenderse como la suma algebraica de las cargas eléctricas libres abarcadas por la superficie cerrada S , es decir, $\sum_{i=1}^h q_i = q_{\text{libres}}$, de manera que el teorema tiene la forma

$$\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = \oint_S D_n dS = q_{\text{libres}} \quad (\text{en el SI})$$

$$\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = \oint_S D_n dS = 4\pi q_{\text{libres}} \quad (\text{en el sistema CGSE})$$

En esta forma el teorema de Ostrogradski – Gauss es correcto para el campo eléctrico tanto en un medio homogéneo e isótropo como en un medio heterogéneo y anisótropo (compárese con III.2.3.3°).

4°. Para un campo eléctrico en el vacío.

dipolar total de las moléculas distinto de cero. El dieléctrico que se encuentra en este estado se dice que está *polarizado* (*dieléctrico polarizado*). En dependencia de la estructura de las moléculas (átomos) del dieléctrico se distinguen tres tipos de polarización:

a) La *polarización dipolar* (*por orientación*) en los dieléctricos polares (III.5.1.4°). El campo eléctrico externo tiende a orientar los momentos dipolares de los dipolos permanentes a lo largo de la dirección del campo eléctrico (III.5.1.5°). Esto se ve dificultado por el movimiento térmico caótico de las moléculas, que tiende a dispensar arbitrariamente los dipolos. Como resultado de la acción conjunta del campo y del movimiento térmico aparece una orientación predominante de los momentos eléctricos dipolares a lo largo del campo, que crece al aumentar la intensidad de éste y al disminuir la temperatura;

b) La *polarización electrónica* (*por deformación*) en los dieléctricos neutros (III.5.1.3°). Bajo la acción del campo eléctrico externo, en las moléculas de los dieléctricos de este tipo surgen momentos dipolares inducidos (III.5.1.3°) dirigidos a lo largo del campo. El movimiento térmico de las moléculas no ejerce influencia sobre la polarización electrónica. En los dieléctricos gaseosos y líquidos, prácticamente al mismo tiempo que la polarización dipolar se produce la polarización electrónica;

c) La *polarización iónica* en los dieléctricos sólidos que tienen redes cristalinas iónicas (VIII.1.1.3°). Por ejemplo, NaCl, CaCl y otros. El campo eléctrico externo provoca el desplazamiento de todos los iones positivos en dirección de la intensidad \mathbf{E} , y de todos los iones negativos en sentido opuesto;

3°. La medida cuantitativa de la polarización de un dieléctrico es su vector de polarización \mathbf{P}_e . Se llama *vector de polarización* (*polarización*) la razón del momento dipolar eléctrico de un volumen pequeño ΔV del dieléctrico, a la magnitud de este volumen:

$$P_e = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n p_{ei}$$

donde p_{ei} es el momento dipolar eléctrico de la i -ésima molécula; y n , el número total de moléculas que hay en el volumen ΔV .

Este volumen debe ser tan pequeño que, dentro de él, el campo eléctrico pueda considerarse homogéneo (III.2.1.2°). Al mismo tiempo el número n de moléculas que haya en el volumen ΔV debe ser suficientemente grande, para que se puedan utilizar los métodos estadísticos de investigación (II.1.2.2°).

4°. Para un dieléctrico neutro homogéneo (III.5.1.3°) que se encuentre en un campo eléctrico también homogéneo,

$$\mathbf{P}_e = n_0 \mathbf{P}_e$$

Estas formulas son la generalización de las del (III.2.3.1°). Para un medio homogéneo e isotrópico, utilizando los resultados de III.5.2.3°, tenemos:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \varepsilon_0 x \mathbf{E} = \varepsilon_0 (1 + x) \mathbf{E} \quad (\text{en el SI}),$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi x \mathbf{E} = (1 + 4\pi x) \mathbf{E} \quad (\text{en el sistema CGSE})$$

Por consiguiente,

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}, \text{ donde } \varepsilon = 1 + x \quad (\text{en el SI})$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \text{ donde } \varepsilon = 1 + 4\pi x \quad (\text{en el sistema CGSE})$$

La magnitud ε es la permitividad relativa (compárese con III.1.2.4°).

Para el vacío, $\varepsilon = 1$ y $x = 0$.

El concepto de ε introducido en III.1.2.4° sólo tiene sentido para los medios homogéneos isotrópicos.

§ III.5.4 Ferroeléctricos

1°. Por *eléctricos de Seignette, de Rochelle o ferroeléctricos* se entiende el grupo de dieléctricos cristalinos cuyo nombre inicial se debió a la primera substancia estudiada de este tipo, la sal de Seignette $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. También puede servir de ejemplo de ferroeléctrico el titanio de bario BaTiO_3 . Los ferroeléctricos se caracterizan por el hecho de que su permitividad relativa (III.1.2.4°) aumenta bruscamente en un intervalo de temperaturas determinado (fig. III.5.4).

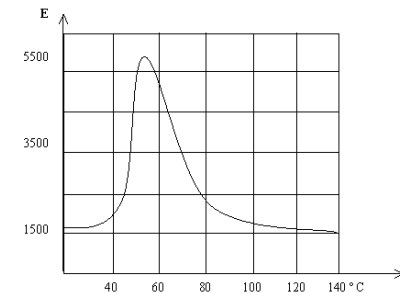


FIGURA III.5.4

dieléctricos polares se asemejan por sus propiedades eléctricas a los *dipolos permanentes* o *rígidos*, los cuales tienen *momento dipolar constante*:

$$\mathbf{p}_\epsilon = \text{const.}$$

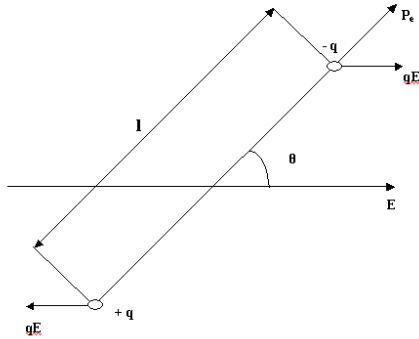


FIGURA III.5.1

5°. Un dipolo permanente, situado en un campo electrostático exterior homogéneo, experimenta la acción de un par de fuerzas (1.4.1.6°) cuyo momento **M** es

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_\epsilon \mathbf{E}]$$

El momento **M** del par está dirigido perpendicularmente al plano que pasa por los vectores **P_ε** y **E**, y desde el extremo de **M** la rotación desde **P_ε** hacia **E**, por el camino más corto, se realiza en sentido contrario al de las agujas del reloj. En la fig. III.5.1 el momento **M** está dirigido desde nosotros hacia detrás del dibujo y tiende a hacer girar el dipolo de modo que los vectores **P_ε** y **E** sean paralelos entre sí. En las moléculas reales de los dieléctricos polares, además del giro de los ejes de los dipolos a lo largo del campo, se produce la deformación de las moléculas y en ellas se crea cierto momento dipolar inducido (p. 3°).

6°. Si un dipolo permanente se encuentra en un campo eléctrico heterogéneo en el cual la intensidad **E** varía en la longitud del dipolo *l*, sobre el dipolo, además del momento de rotación **M** (p. 5°), actúa la fuerza

$$\mathbf{F} = p_\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial l}$$

o, en una forma más general,

polarizado. Cuando $T > T_{\text{sup}}$ existe una fase ordenada cuyo indicio es la polarización espontánea en los dominios *).

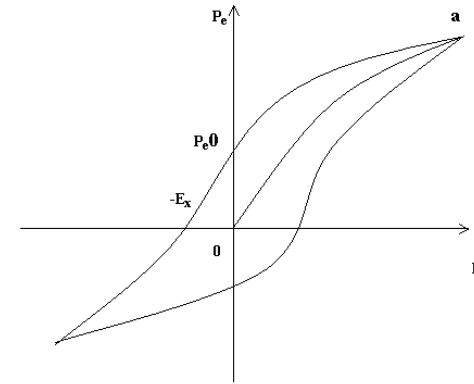


FIGURA III.5.7

5°. En los ferroeléctricos se produce el fenómeno de *histéresis dieléctrica (retraso)*. En la fig. III.5.7 se ve que con el aumento de la intensidad del campo eléctrico externo, el módulo del vector **P_ε** crece y alcanza la saturación en el punto a. Al disminuir **E** hasta cero, en el ferroeléctrico se conserva una *polarización remanente* caracterizada por el valor **P_{ε0}** del vector de polarización. Esta polarización solo desaparece totalmente si el ferroeléctrico se somete a la acción de un campo eléctrico de sentido contrario, cuya intensidad (**-E_k**) se llama *fuerza coercitiva*. La variación periódica de la polarización del ferroeléctrico se debe a la energía eléctrica que se invierte en calentar la sustancia. El área del bucle de histéresis es proporcional a la energía eléctrica que se transforma en energía interna de la unidad de volumen del ferroeléctrico por ciclo.

* En este manual no se estudian los fenómenos que ocurren en los ferroeléctricos cuando $T = T_{\text{inf}}$ y que conducen a la desintegración de los dominios.