الباب الخامس عشر

نظرية العوازل Theory of Dielectries :

سبق أن بينا أن التوصيل الكهربائى فى الفلزات وأشباه الموصلات ينشأ عن الحركة شبه الحرة لحاملات الشحنة ، وهناك مواد أخرى تكون فيها الإلكترونات وحتى إلكترونات التكافؤ مقيده بنويات ذراتها مما يجعل التوصيل الإلكتروني لها منعدما .

وتصف نظرية المناطق مثل هذه المواد بأن لها طاقة ثغرة Energy gap كبيرة بين منطقتى التكافؤ والتوصيل قد تصل إلى بضعة الكترون فولت . وتسمى هذه المواد بالعوازل.

فذرات المواد العازلة تتكون من نويات موجبة التكهرب يحيط بها شحنات سالبة حيث تنطبق مراكز الشحنة الموجبة والسالبة فى كل جزء منها . وعندما يؤثر على مثل هذه المواد مجال كهربائى يحدث استقطاب كهربائى ينشأ عنه ثنائيات قطب محليه فى أجزاء المادة المختلفة local dipoles . وفى بعض المواد العازلة تشكل مجاميع الأيونات أو الجزيئات ثنائيات قطب دائمة تظهر حتى فى حالة انعدام المجال الكهربائى الخارجى ، ويدهى أنه عند التأثير بمجال خارجى تترتب هذه الثنائيات قطب فى اتجاهات توازى اتجاه المجال ، وتتأثر عملية الاستقطاب هذه بعامل التهييج الحرارى وهى لذلك تعتمد على درجة الحرارة .

تعريفات وعلاقات فى الكهرواستاتيكا

١ - تعرف شدة المجال الكهراستاتيكى ، E ، بالقوة التى تؤثر على وحدة الشحنة الموجبة الموضوعة عند هذه النقطة .

$$F = q. E$$

٢ - القوة بين شحنتين نقطيتين q_1 ، q_2 تفصلهما مسافة r هى :

$$F = \frac{q_1 \ q_2}{4 \pi \varepsilon_0 r^2}$$

حيث ε_0 هى نفاذية الفراغ وقيمتها ٨,٨٥ × ١٠$^{-١٢}$ فاراد / متر

٣ – شدة المجال فى الفراغ على مسافة r من شحنة q هى :

$$E = \frac{q}{4 \pi \varepsilon_0 r^2}$$

٤ – عند التأثير بمجال كهربائى على مادة عازلة ينتج عن ذلك استقطابا يعرف بعزم ثنائى القطب الكهربائى لوحدة الحجوم وتكون إزاحة العزل الكهربائى dielectrie displacement D هى :

$$D = \varepsilon . E$$

حيث ε هى نفاذية المادة .

٥ – مقدار الشحنة Q على لوحى المكثف ذو اللوحين المتوازيين هى :

$$Q = C V$$

حيث C هى سعة المكثف ، V هى : فرق الجهد بين لوحيه وتكون سعة المكثف C هى:

$$C = \frac{A}{\varepsilon d}$$

حيث A هى : مساحة لوح المكثف ،

d هى : المسافة بين اللوحين ،

ε هى : نفاذية الوسط بين اللوحين .

ويلاحظ أن إدخال وسط عازل بين لوحى المكثف يسبب زيادة فى سعته ، وتقاس هذه الزيادة بثابت العازل للمادة K ويساوى النسبة بين نفاذية المادة إلى نفاذية الفراغ أى أن ثابت العازل هو :

$$K = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

قياس ثابت العازل :

يقاس ثابت العازل لمادة بمقارنة سعة مكثف ما C_d عندما تكون المادة بين لوحيه إلى سعة نفس المكثف C_0 وبين لوحيه فراغ .

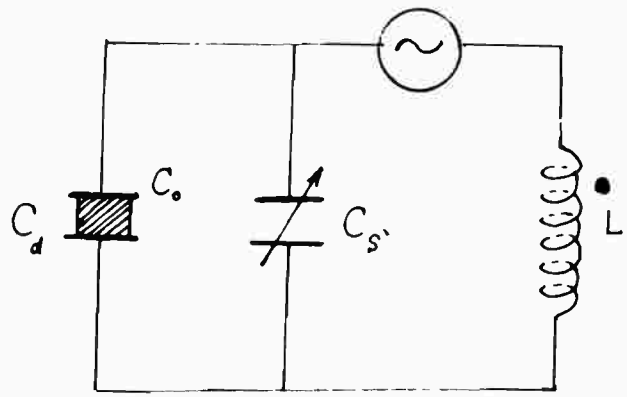
أى أن

$$K = C_d / C_0$$

ويمكن قياس السعة بدائرة رنين كهربائية تحتوى ملف حث L ومكثف متغير السعة C_s ومصدر كهربائى متردد كما مبين بشكل (١٥ - ١) C_0 , C_d هما سعتى المكثف وبه العازل مرة والهواء مرة أخرى .

C_s مكثف عيارى .

عند الحصول على رنين فى الدائرة والمكثف C_0 خال من المادة العازلة تؤخذ قراءة المكثف C_s ثم يوضع العازل فى المكثف فتصبح سعته C_d ويعاد ضبط حالة الرنين وتؤخذ مرة ثانية قراءة المكثف C_s ومن القراءتين تحسب السعة C_0 , C_d ومنهما نوجد ثابت العزل K .



شكل (١٥ - ١)

الاستقطابية الاستاتيكة للجزيئات الحرة :

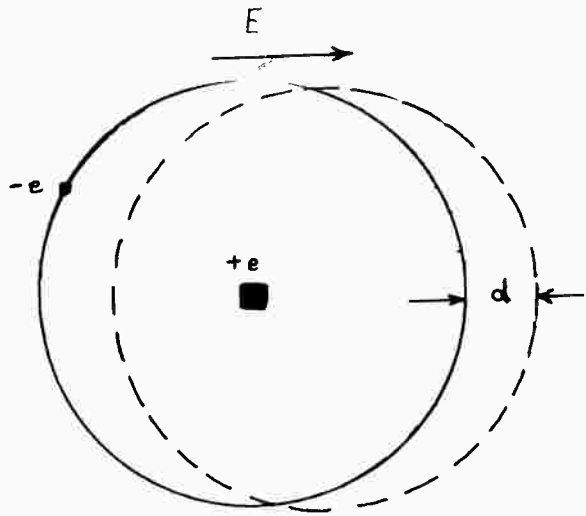
عند التأثير بمجال كهربائى على ذرات أو جزيئات حرة تنشأ فيها حالة من الاستقطاب الكهربائى تعود إلى أحد العوامل التالية :

(١) استقطابية الكترونية Electronic polarizability :

يحدث بتأثير المجال الكهربائى إزاحة نسبية r بين مركز الشحنات الموجبة

والسالبة على الذرة ويتكون عن ذلك ثنائى قطب كهربائى (انظر شكل ١٥ - ٢) عزمة يساوى حاصل ضرب الشحنة فى المسافة ويكون متجها من الشحنة السالبة إلى الشحنة الموجبة ، ففى حالة ذرة الأيدروجين يكون عزم ثنائى القطب فيها هو $p = e \cdot d$ حيث e هى شحنة الإلكترون .

أما إذا اعتبرنا نظاما أو جزيئا متعادلا يحتوى عدد من الشحنات q_i التى تبعد مسافة r_i عن مركز مشترك فإن عزم ثنائى القطب حينئذ يكون $p = \Sigma_i \; q_i \; r_i$



استقطاب ذرة الأيدروجين فى مجال كهربائى

شكل (١٥ - ٢)

وبدهى أن هذا العزم يتلاشى فى حالة عدم وجود المجال الكهربائى حيث يكون $\Sigma_i \; q_i = 0$ للنظام المتعادل .

(٢) استقطابية أيونية ionic polarizability :

عندما يتركب الجزىء من أيونات فإن مواضعها تتأثر بالمجال الكهربائى ويحدث لها إزاحات نسبية ، وينشأ نتيجة لذلك تغير فى أبعاد الروابط بين ذرات الجزىء ،

وكذلك فى اتجاهاتها فى الفراغ مما يتسبب عنه إزاحة مركز الشحنات السالبة عن مركز الشحنات الموجبة فى الجزىء ، فيحدث الاستقطاب الأيونى .

(٣) الاستقطابية المتجهة orientation polarizability :

تتميز بعض المواد بوجود ثنائيات قطب دائمة فيها حتى فى حالة انعدام المجال الكهربائى ، وعند التأثير بالمجال تدور محاور ثنائيات القطب هذه لتترتب فى اتجاه المجال الكهربائى .

وينشأ عن ذلك استقطابية تسمى بالاستقطابية المتجهة .

القابلية الكهربائية والاستقطابية :

Electric susceptibility and polarizability

تعرف كثافة الاستقطاب P فى مادة بأنها العزم الكلى لثنائى القطب فى وحدة الحجوم الناشىء عن مجال كهربائى E وتعطى مقياسا للشحنات داخل العازل فى المجال ، حيث :

$$P = (C_d - C_0)\ V = \varepsilon E - \varepsilon_0 E$$

$$K = \varepsilon / \varepsilon_0$$

$$\therefore\ P = (K - 1)\ \varepsilon_0\ E$$

$$\therefore\ K = 1 + P/\ \varepsilon_0\ E$$

أى أن :

$$(K - 1) = P/\ \varepsilon_0\ E$$

$$= \chi_e$$

حيث χ_e هى : القابلية الكهربائية للمادة . وإذا اعتبرنا وحدة الحجوم منها حيث يوجد عدد N ذرات فان كثافة الاستقطاب تكون :

$$P = N p = \varepsilon_0\ \chi_e\ E$$

حيث p هو عزم ثنائى القطب الأولى .

$$\therefore P = \varepsilon_0 \frac{\chi_e}{N} E$$

$$= a \cdot E$$

حيث $a = \frac{\varepsilon_0 \chi_e}{N}$ تسمى بالاستقطابية polarizability. وهى كما ذكرنا على ثلاثة أنواع نبينها تفصيليا فيما يلى :

(١) الاستقطابية الإلكترونية a_e :

نفرض ذرة متعادلة على نواتها شحنة موجبة $+Ze$ يحيث بها سحابة الكترونية كرية ومنتظمة شحنتها $-Ze$ نصف قطرها R . عند التأثير بمجال كهربائى تحدث إزاحة للسحابة الإلكترونية بالنسبة للنواة بمقدار d وتستمر كذلك تحت تأثير قوى متوازنة .

القوة المؤثرة على السحابة الإلكترونية هى :

$$F_E = Ze \cdot E$$

وتتزن هذه القوة مع قوة تجاذب الشحنات السالبة والموجبة وهى :

$$F_c = \frac{(Ze)^2}{4 \pi \varepsilon_0 R^2} \cdot \left(\frac{d}{R}\right)$$

ويمكن للطالب إثبات ذلك بسهولة .

وبمساواة F_E مع F_c نحصل على :

$$d = 4 \pi \varepsilon_0 E R^3 / Ze$$

ولكن عزم ثنائى القطب الأولى هو :

$$p = Ze\, d$$

$$\therefore p = 4 \pi \varepsilon_0 E R^3$$

وتصبح الاستقطابية الإلكترونية a_e مساوية إلى

$$a_e = \frac{p}{E} = 4 \pi \varepsilon_0 R^3$$

ويلاحظ أن قيمة a_e تعتمد فقط على الحجم الذرى .

تغير a_e بتردد المجال :

إذا أثرنا بمجال كهربائى متردد $E \sin \omega t$ على مادة عازلة يتغير اتجاه متجه الاستقطاب تغيرا توافقيا بسيطا وتكون معادلة الحركة فى المجال هى :

$$\ddot{x} + \omega_0 x = -(eE/m) \sin \omega t$$

حيث ω_0 هو التردد الطبيعى لذبذبة ثنائى القطب ، ω هو تردد المجال المؤثر .

ويبدهى أنه عندما نؤثر على المادة بمجال استاتيكى غير متردد فإن $\omega = 0$

وإذا أهملنا القوى المقاومة لحركة ثنائى القطب وباعتبار أن الإزاحة x تخضع لمعادلة تغير توافقى بسيط .

$$x = x_0 \sin \omega t$$

حيث x_0 سعة الحركة ، فإننا نجد عن طريق حل المعادلة التفاضلية :

$$-e x_0 = e^2 E / m \left(\omega_0^2 - \omega^2\right)$$

وتكون بذلك الاستقطابية الإلكترونية :

$$a_e = e^2 / m \left(\omega_0^2 - \omega^2\right)$$

ونظرا لأن قيمة الاستقطابية تساوى $١٠^{-٤٠}$ تقريبا لذلك فإن قيمة ω تكون فى حدود $١٠^{١٥}$ ذبذبة فى الثانية وهى أكبر كثيرا من قيم التردد لموجات الطيف المنظور ، ويمكن لذلك اعتبار أن الاستقطابية الإلكترونية مهملة القيمة لمعظم المواد العازلة فى المنطقة المنظورة للمجالات الكهرومغناطيسية .

(٢) الاستقطابية الأيونية a_i :

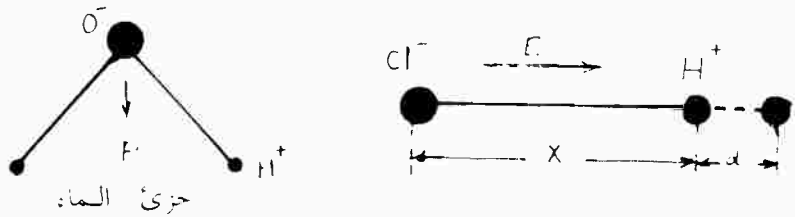
تحتوى جزيئات المواد الأيونية على شحنات موجبة وأخرى سالبة تتوزع بشكل خاص فى الفراغ يتوقف على التركيب الجزيئى للمادة ، ويتوقف على هندسة التوزيع لهذه الشحنات فى الجزىء عزم ثنائى القطب . فمثلا جزىء ثانى أكسيد الكربون $C O_2$ جزىء متماثل تركيبه هو :

$$\overline{O} = {}^{+}C^{+} = \overline{O}$$

ونتيجة لهذا التماثل يتلاشى عزم ثنائى القطب فيه .

أما جزىء المادة H_2O فإن له عزم ثنائى قطب يساوى تقريبا ١,٩ × ١٠$^{-١٨}$ وحدة سم جم ث وذلك نسبة لتركيبه الهندسى وعدم تطابق مركزى الشحنات الموجبة والسالبة فيه ، شكل (١٥ - ٣)

وعند التأثير على مثل هذا الجزىء بمجال كهربائى يسبب إزاحة المركزين نسبيا عن بعضهما بمسافة d وإذا كانت الشحنة هى q فإن عزم ثنائى القطب يكون $p = q \cdot d$ وتستخدم الطرق الطيفية عادة لتعيين تمدد الرابطه بين الأيونات فى وجود المجال وذلك عند تعين p .



شكل (١٥ - ٣)

وعند تطبيق ذلك على بلورات أيونية مثل كلوريد الصوديوم نوجد الإزاحة d بين مركزى الشحنات الموجبة والسالبة فى الشبيكة بتأثير مجال كهربائى ، وذلك باعتبار شبيكة طولية ثنائية التركيب تتكون من تعاقب أيونات موجبة وسالبة ، وبتشعيع هذه الشبيكة بأمواج كهرمغناطيسية : $E = E \cdot e^{-i\omega t}$ يمكن إيجاد سعة الإزاحة لكل أيون فيها (أنظر باب ديناميكا الشبيكه) على الشكل الآتى :

$$\eta = \frac{e\,E/M}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad ; \quad \zeta = \frac{-e\,E/m}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

حيث M , m هما كتلتى الأيونين المكونين للشبيكة ، ω هو التردد المستعرض للشبيكة (الفونونات الضوئية) .

ولكى نحسب الاستقطابية الأيونية : a_i نوجد أولا الإزاحة النسبية للأيونين .

$$d = (\eta - \zeta)$$

ومن ثم تكون :

$$a_i = e\,d / E$$

فإذا اعتبرنا مجالا كهربائيا استاتيكيا يمكننا التعويض فى المعادلات السابقة بقيمة صفرية لتردد المجال ω وبذلك يكون :

$$d = (\eta - \zeta) = e\,E \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right) / \omega_0^2$$

ويصبح عزم ثنائى القطب :

$$p = e.\,d = e^2\,E \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right) / \omega_0^2$$

أى أن الاستقطابية الأيونية هى :

$$a_i = \frac{p}{E} = e^2 \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right) / \omega_0^2$$

$$= e^2 / m^* \omega_0^2$$

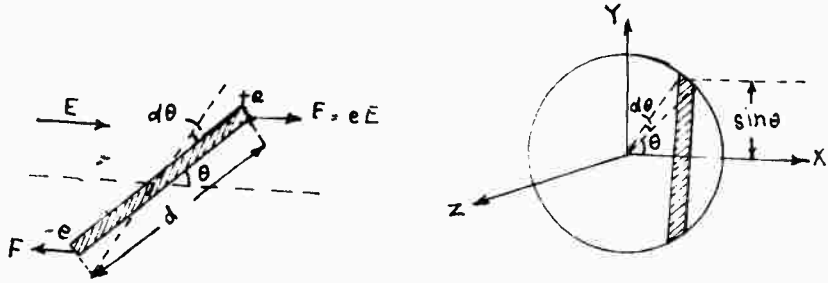
حيث $m^* = \frac{m\,M}{m + M}$ هى الكتلة الفعالة (reduced mass) لزوج الأيونات المكون لثنائى القطب .

(٣) الاستقطابية المتجهة a_0 :

اعتبر الآن مادة عازلة تتكون من جزيئات قطبية لها عزم ثنائى قطب دائم p تكون القوة F التى تؤثر على كل قطب نتيجة لمجال كهربائى E هى $F = e\,E$ وتعمل فى اتجاه المجال بالنسبة للشحنة الموجبة ، وفى عكس اتجاه المجال بالنسبة للشحنة السالبة ، ينتج عن ذلك ازدواجا عزمه C يعمل على دوران ثنائى القطب فى اتجاه المجال أى لإنقاص الزاوية θ التى يعملها ثنائى القطب مع اتجاه المجال المؤثر ، شكل (١٥ - ٤) .

$$\therefore\ C = e\,E\,d\,\sin\theta$$

$$= p\,E\,\sin\theta$$



شكل (١٥ - ٤)

نفرض أن ثنائى القطب قد دار بزاوية صغيرة $d\theta$ الزيادة فى طاقة الموضع يساوى $C\,d\theta$ بواسطة التكامل نحصل على طاقة الموضع الكلية U لثنائى القطب فى المجال E.

$$U = \int C\,d\theta$$

$$= \int p E \sin\theta \; d\theta$$

$$= - P E \cos\theta$$

عند انعدام المجال الكهربائى يكون توزيع اتجاهات ثنائيات الأقطاب فى الفراغ توزيعا عشوائيا عند أى درجة حرارة T ولكن عند وجود المجال يكون احتمال وجود ثنائى القطب فى اتجاه يعمل زاوية تقع بين θ ، $\theta + d\theta$ مع اتجاه المجال هو :

$$2\pi \sin\theta \; d\theta \; \exp(-U/kT)$$

وذلك كما يمليه إحصاء ماكسويل وبولتزمان .

وتكون الزيادة فى الاستقطاب الناشئة عن أى ثنائى قطب هى مركبة عزمة في اتجاه المجال أى $p\cos\theta$ وتكون الزيادة المتوسطة لعزم ثنائى القطب هى p ونحصل عليها بالتكامل من زاوية $\theta = 0$ إلى $\theta = \pi$

$$P = \frac{\int_0^{\pi} p \cos\theta . 2p \sin\theta \, d\theta \, . \exp(-U/kT)}{\int_0^{\pi} 2\pi \sin\theta \, d\theta \exp(-U/kT)}$$

ولحل التكامل نستخدم التعويضات التالية :

$$B = \cos\theta \; ; \; y = pE/kT$$

وبذلك نحصل على :

$$\bar{p} = \frac{p \int_{-1}^{+1} e^{By} . B \, dB}{\int_{+1}^{-1} e^{By} \, dB}$$

$$= p \frac{d}{dy} \left[\log \int_{-1}^{+1} e^{By} \, dB \right]$$

$$= p \left[\frac{d}{dy} \log (e^{y} - e^{-y}) - \frac{d}{dy} \log y \right]$$

$$= p \left(\coth y - \frac{1}{y} \right)$$

$$= p L(y)$$

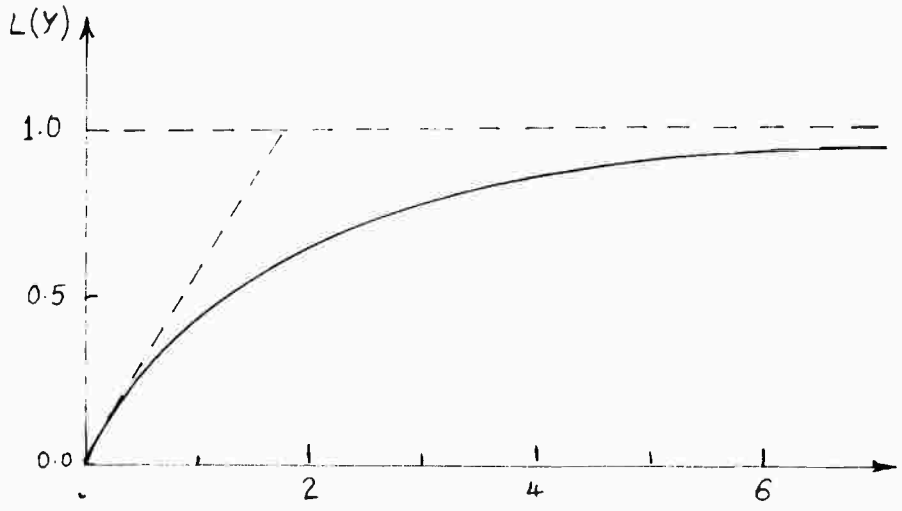
وإذا كان هناك عدد N ثنائيات قطب فى وحدة الحجوم من المادة فإن الزيادة الكلية للعزم فى وحدة الحجوم هى :

$$p_0 = N \bar{p} = N p L(y)$$

وتعرف $L(y)$ بدالة لانجفين وتقترب قيمتها من الصفر عندما تؤول قيمة y إلى الصفر بينما تأخذ قيمتها الوحدة للقيم الكبيرة من y كما فى شكل (١٥ - ٥) .

ويلاحظ أن ميل المماس للمنحنى بين $L(y)$ مع y بالقرب من $y = 0$ يساوى $\frac{1}{3}$

ويمكن إثبات ذلك رياضيا كما يلى بفك الدالة $L(y)$



شكل (١٥ – ٥) $y = PE/KT$

$$\text{cothy} = \frac{1}{y} + \frac{y}{3} - \frac{y^2}{45} + \ldots$$

$$\therefore\ L\ (y) = \left(\text{cothy} - \frac{1}{y}\right) = \frac{y}{3}$$

وذلك بإهمال الحدود التالية :

وعلى ذلك فعند درجات الحرار المرتفعة والمجالات الصغيرة يمكن تقريب الاستقطاب المتجه فى وحدة الحجوم إلى :

$$p_0 = N\ p^2\ E\ /\ 3\,k\,T$$

وتكون الاستقطابية المتجهة هى :

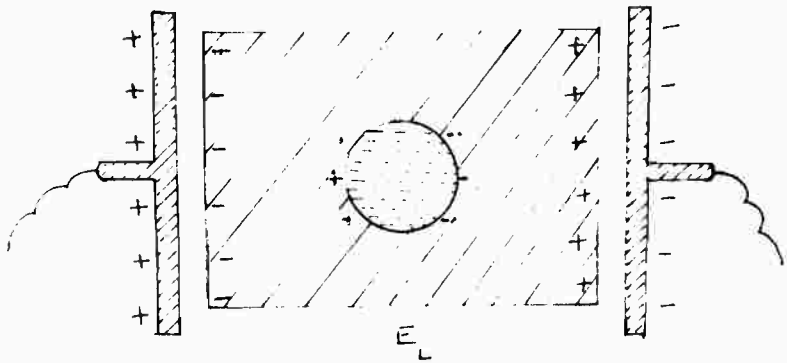
$$a_0 = \frac{p_0}{N\,E} = p^2\,/\,3\,k\,T$$

ويلاحظ أنه فى حالة وجود أكثر من نوع واحد للاستقطاب تجمع كل أصنافه وتكون الاستقطابية الكلية هى :

$$a = \left(a_e + a_i + p^2\ /\,3\,k\,T\right)$$

المجال المحلى فى العوازل الجامدة

فى العوازل الجامدة لا تتأثر ذراتها وجزيئاتها بالمجال الكهربائى الخارجى فحسب ، وإنما أيضا تتأثر بثنائيات القطب المحيطة ، والتى نتجت بفعل المجال المؤثر شكل (١٥ -٦). وعلى ذلك يمكن تقسيم المجال المؤثر على ذرة أو جزىء ما فى العازل إلى الأجزاء التالية :



شكل (١٥ - ٦)

١ - المجال الخارجى الناشىء عن الشحنات كالموضوعة على لوحى المكثف المحتوى على المادة العازلة .

٢ - مجال معاكس للاستقطاب de polarizing field وتنشأ عن الشحنات التأثيريه المعاكسة والتى تكون على سطحى العازل المقابلين للوحى المكثف (أنظر شكل ١٤- ٦) .

ويكون مجموع المجالين السابقين هو المجال الماكروسكوبى المؤثر على العازل ، E .

٣ - مجال لورنتز E_L وينشأ عن استقطاب الشحنات داخل سطح افتراضى داخل العازل يحيط بالذرة أو الجزىء المعنى على أن يكون نصف قطر هذا السطح كبيراً بالنسبة لأبعاد الذرة وصغيرة بالنسبة لأبعاد العازل نفسه .

٤ - المجال الناشىء عن ثنائيات الأقطاب الموجودة داخل السطح الافتراضى نفسه ويؤخذ فى الاعتبار تأثير ثنائيات القطب المجاورة وما بعد المجاورة للذرة .

ويمكن إهمال ذلك الجزء من المجال إذا كان التركيب البلورى للمادة تكعيبيا متماثلا .

وعلى ذلك فإن المجال المحلى المؤثر على أى ذرة فى العازل يساوى :

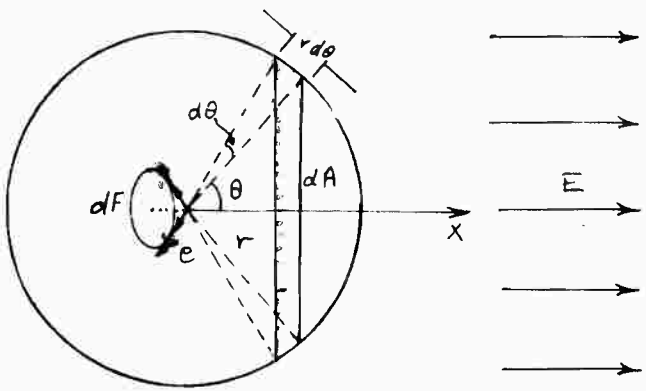
$$E_{Local} = E + E_L$$

حساب مجال لورنتز E_L :

لإيجاد مجال لورنتز نعتبر السطح الافتراضى المبين بشكل (١٥ – ٧) ونأخذ عنصراً مساحته d A على شكل حلقه . من هندسة الشكل :

$$d A = 2 \pi r^2 \sin \theta \, d \theta$$

الشحنة الكهربائية على هذه المساحة d A تساوى :



شكل (١٥ – ٧)

$$Q = p \cos \theta \; 2 \pi r^2 \sin \theta \, d \theta$$

وبتطبيق قانون كولوم تكون القوة d F المؤثرة من هذه الشحنة Q على شحنة e موجودة عند مركز السطح هى :

$$d F = e \, Q / 4 \pi \varepsilon_o r^2$$

حيث r نصف قطر السطح الافتراضى .

مركبة هذه القوة فى الاتجاه السينى وهو فى نفس الوقت اتجاه المجال المؤثر هى :

$$dF_x = e\ Q \cos\theta / 4\pi\varepsilon_o r^2$$

$$= \frac{e\,p \cos\theta \,.\, 2\pi r^2 \sin\theta\, d\theta \,.\, \cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

وبإجراء التكامل نحصل على مركبة القوة الكلية في اتجاه المجال :

$$F_x = \int_0^{\pi} dF_x$$

$$= e\,p / 3\ \varepsilon_0$$

ويكون مجال لورنتز هو :

$$E_L = \frac{F_x}{e} = \frac{p}{3\varepsilon_0}$$

ويكون المجال المحلى عند نقطة فى شبيكة تكعيبية هو :

$$E_{Loc.} = E + \frac{P}{3\varepsilon_0}$$

علاقة كلوزيوس - موزوتى :

تحدد هذه العلاقة الاستقطابية الكهربائية لذرات مادة عازلة إذا عرف لها ثابت العازل . k

عزم ثنائى القطب لذرة مفردة هو :

$$p = a\ .\ E_{Loc.}$$

ويكون الاستقطاب معرفا بعزم ثنائيات القطب لوحدة الحجوم من العازل هو :

$$P = \Sigma\ N_i\ a_i\ E_{Loc.} \qquad (i)$$

حيث N_i هو عدد الذرات فى وحدة الحجوم ، والجمع Σ يؤدى على جميع الذرات من نوع i الذى له استقطابيه a_i ويوجد فى مجال محلى E_{Loc} (i)

من معادلة لورنتز

$$E_{Loc.} = E + P/3\ \varepsilon_0$$

$$\therefore \left(P / \Sigma_i N_i a_i\right) - \left(P/3\varepsilon_0\right) = E$$

$$\therefore E/P = \frac{1 - \left(1/3\varepsilon_0\right) \Sigma N_i a_i}{\Sigma N_i a_i}$$

وباستخدام معادلة القابلية الكهربائية

$$\chi_e = (K - 1) = P/\varepsilon_0 E$$

نحصل على :

$$E/P = 1/\varepsilon_0 (K - 1)$$

وبحل المعادلتين لإيجاد $\Sigma N_i a_i$ نحصل على :

$$\frac{1}{3\varepsilon_0} \Sigma N_i a_i = \frac{K - 1}{K + 2}$$

وتعرف هذه المعادلة بمعادلة كلوزيوس – موزوتى ويلاحظ أن الاستقطابية هنا مضافة أى أن :

$$\Sigma N_i a_i = \left(N_e a_e + N_0 a_0 + N_i a_i\right)$$

فى منطقة المجالات الكهرمغناطيسية للترددات فى الطيف المنظور يرتبط ثابت العزل للمادة K بمعامل انكسارها الضوئى n بالعلاقة :

$$n^2 = K$$

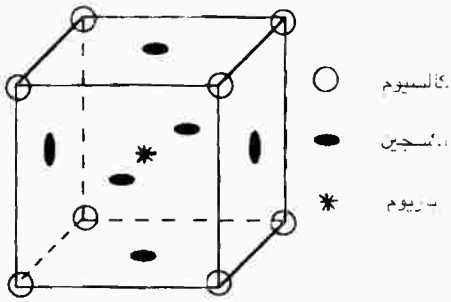
وتكون الإضافات إلى الاستقطابية الناشئة عن الاستقطاب الأيونى أو الاستقطابية المتجهة إضافات صغيرة تتوقف على كبر عزم القصور الذاتى للجزىء ، أو للأيون وتقتصر الزيادة فى الاستقطاب على الجزء الإلكترونى .

الفيروكهربية Ferro-electricity :

المادة الفيروكهربية هى مادة لها استقطاب ذاتى وبالتالى لها عزم ثنائى قطب كهربائى حتى فى غياب المجال الكهربائى الخارجى ، ولا توجد ظاهرة الفيروكهربية فى المواد التى ينطبق فيها مركزى تماثل الشحنات السالبة والموجبة على بعض كما هو الحال فى البلورات

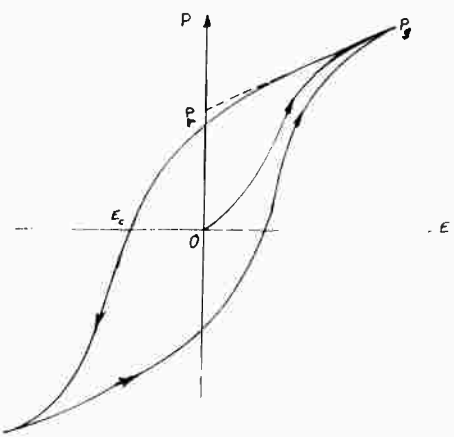
الأيونية ، أى أن وجود عدم تماثل فى التركيب البلورى شرط ضرورى للحصول على الحالة الفيروكهربية فى البلورة .

وأمثلة على هذه المواد هى بلورات أملاح روشيل وتيتانات الباريوم وأمثالها مما له تركيب بلورى من نوع بيروفسكيت perovskite المبين بشكل (١٥ – ٨).



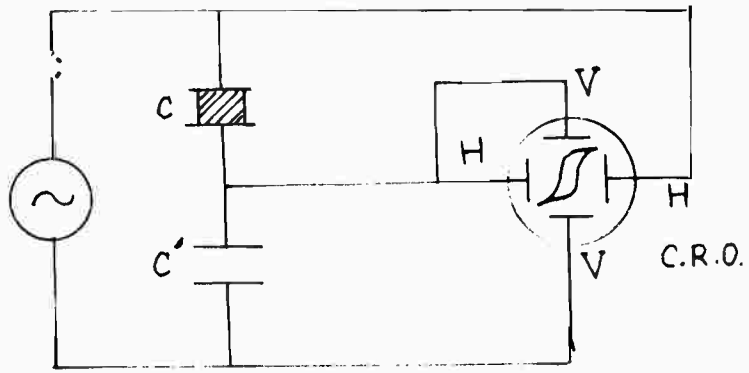
شكل (١٥ – ٨)

عند التأثير بمجال كهربائى متردد على بلورة فيروكهربية نجد تخلفا للاستقطاب P عن المجال المؤثر E ، وينشأ عن رسم العلاقة بين E & P دائرة تخلف كهربائى كما مبين بشكل (١٥ – ٩) ويصل الاستقطاب إلى مرحلة التشبع p_s بعد التأثير بمجال معين كما أنه بإزالة المجال يتبقى جزء من الاستقطاب p_r ويسمى بالاستقطاب المتبقى remenant polarization ونحتاج لإزالة هذا الاستقطاب المتبقى التأثير بمجال كهربائى معاكس قدرة E_c ويسمي بالمجال المزيل E_c. coercive field .



شكل (١٥ – ٩)

يبين شكل (١٥ - ١٠) دائرة كهربائية بسيطة لإظهار دائرة التخلف الكهربائى على شاشة راسم ذبذبات الكترونى ، توضع المادة الفيروكهربية داخل المكثف C الذى يتصل على التوالى بمكثف آخر C^1 وبمصدر جهد متردد .



شكل (١٥ - ١٠)

يسقط الجهد الكهربى على سطحى المادة الفيروكهربية على اللوحين الأفقيين لراسم الذبذبات بينما يسقط الجهد على سطحى المكثف C^1 على اللوحين الرأسيين ، عندئذ تظهر دائرة التخلف الكهربائى على شاشة راسم الذبذبات .

الفيروكهربية ودرجة الحرارة :

تختفى ظاهرة الفيروكهربية عند الارتفاع بدرجة الحرارة إلى درجة T_c تسمى بنقطة كورى للفيروكهربية ، وعند هذه الدرجة تحدث زيادة مفاجئة فى ثابت العزل للمادة ، وتتحول المادة بعد هذه الدرجة من حالة الفيروكهربية إلى حالة الباراكهربية (أسوة بما يحدث للمواد المغناطيسية) ويتغير ثابت العازل مع درجة الحرارة T في هذه المنطقة وفقا لقانون كورى - فايس Curie - Weiss

$$K = A (T - T_c) + K_f$$

حيث A هو ثابت كورى ، K_f هو ثابت العازل للترددات المرتفعة ويمثل الإضافة الناشئة عن الاستقطابية الإلكترونية وقيمته صغيرة ويمكن أهمالها بالقرب من درجة حرارة

كورى .

ويمكن إثبات أن ثابت كورى A هو نفسه مقلوب معامل التمدد الطولى للبلورة كما يأتى:

نفرض أن علاقة كلوزيوس وموزوتى تظل سارية المفعول فى المنطقة الباراكهربية

$$\therefore \quad \frac{K-1}{K+2} = \frac{N \cdot a}{3\varepsilon} = B\ N$$

حيث N هنا تساوى عدد وحدات الخلية فى وحدة الحجوم ، a تساوى الاستقطابية الكلية لوحدة الخلية ، ونفرض هنا أنها لا تتأثر بدرجة الحرارة .

$$B \frac{dN}{dT} = \left[\frac{1}{K+2} - \frac{K-1}{(K+2)^2} \right] \frac{dK}{dT}$$

$$= \frac{3}{(K+2)^2} \cdot \frac{dK}{dT}$$

وبقسمة طرفى المعادلة على B N نحصل على :

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dT} = \frac{3}{(K+2)^2} \frac{K+2}{(K-1)} \frac{dK}{dT}$$

$$= \frac{3}{(K+2)(K-1)} \cdot \frac{dK}{dT}$$

ولكن بما أن حجم وحدة الخلية هو مقلوب عدد الخلايا فى وحدة الحجوم

$$\therefore \quad V = \frac{1}{N}$$

$$\therefore \quad \frac{dN}{N} = - \frac{dV}{V}$$

$$\therefore \quad \frac{1}{N} \left(\frac{dN}{dT} \right) = - \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right) = - 3 \alpha$$

حيث α هو معامل التمدد الطولى للمادة

وإذا اعتبرنا أن لثابت العازل قيما كبيرة أكبر كثيرا من الوحدة $K >> 1$ يمكن تقريب المقدار

$$(K+2)(K-1) \cong K^2$$

$$\frac{1}{N}\frac{dN}{dT} = -3\alpha = \frac{3}{K^2}\frac{dK}{dT}$$

$$\therefore -\frac{1}{K^2}\,dK = \alpha\,dT$$

$$\therefore d\left(\frac{1}{K}\right) = \alpha\,dT$$

وبالتكامل نحصل على :

$$\frac{1}{K} = \alpha\,(T - T_c)$$

أى أن :

$$K = A / (T - T_c)$$

حيث

$$A = \frac{1}{\alpha}$$

ثابت العازل ودرجة حرارة كورى :

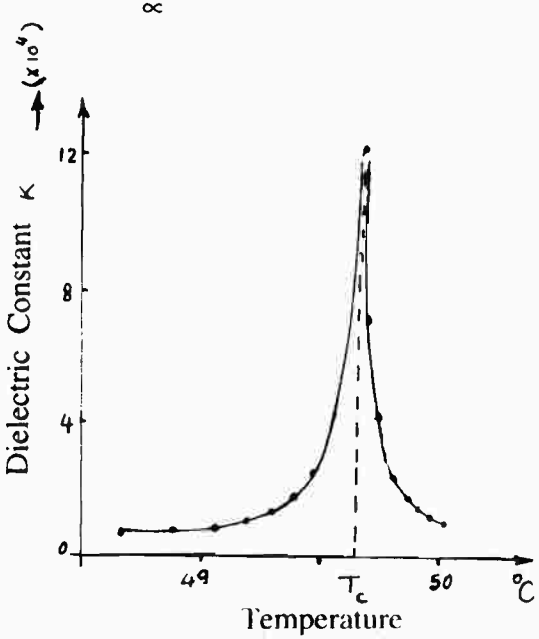
يصاحب التحول من حالة الفيروكهربية إلى الباراكهربية زيادة شاذة فى ثابت العازل للمادة .

نفرض أن المادة العازلة ليست لها خواص اتجاهية من ناحية العزل .

يكون مقدار ثابت العزل K مستنتجا من معادلة كلوزيوس – موزوتى هو :

$$K = \frac{1 + \frac{2}{3\varepsilon_0}\Sigma N_i a_i}{1 - \frac{1}{3\varepsilon_0}\Sigma N_i a_i}$$

حيث N_i هو عدد الذرات من نوع i فى



شكل (١٥ – ١١) تغير ثابت العازل لمادة كبريتات ثلاثى الجليسين

وحدة الحجوم والتى لها استقطابية a_i .

عندما تقترب $\Sigma N_i a_i = 3 \varepsilon_0$ نجد أن قيمة ثابت العازل K تؤول إلى مالا نهاية بينما يظل الاستقطاب P قيمة محدودة عندما يكون المجال صفريا وتسمى هذه الحالة بكارثة الاستقطاب . حيث تقترب قيمة ثابت العازل من قيمة لا نهائية كما يظهر ذلك بوضوح لمادة كبريتات ثلاثى الجليسين Triglycene sulphate بالقرب من نقطة كورى . (انظر شكل ١٥-١١) .

وعند الاقتراب من درجة حرارة كورى يمكن كتابة المعادلة :

$$\frac{1}{3\varepsilon_0} \Sigma N_i a_i = 1 - \delta$$

حيث : $\delta << 1$

وبالتعويض فى المعادلة السابقة نحصل على :

$$K = 3 / \delta$$

وباعتبار أن قيمة δ تعتمد على درجة الحرارة وفقا للمعادلة :

$$\delta = \frac{C}{3} (T - T_c)$$

فإننا نحصل مباشرة على معادلة كورى فايس لتغير ثابت العازل مع درجة الحرارة على الصورة :

$$K = \frac{C}{T - T_c}$$

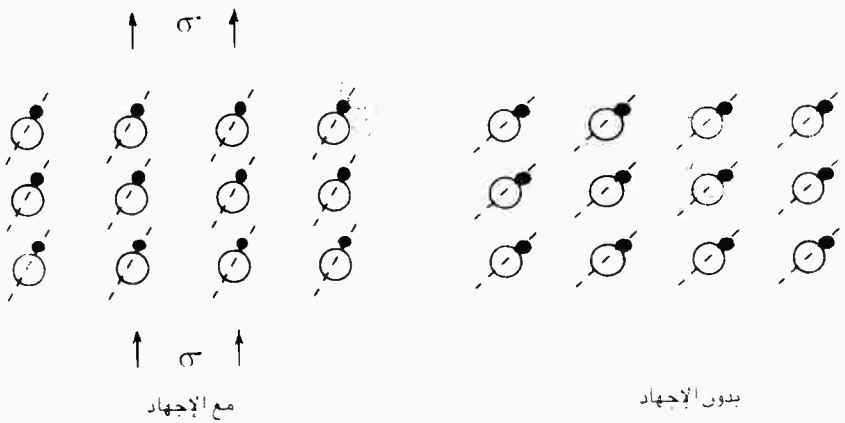
الظاهرة الكهرضغطية Piezo-electric effect :

عندما نؤثر على بلورة ما باجهاد ميكانيكى تزاح الذرات من أماكنها . فإذا كان للبلورة مركز تماثل شبيكى centro symmetric تكون الإزاحات متماثلة حول مراكز التماثل ، وبالتالى فإن توزيع الشحنات فى البلورة يظل دون تغيير يذكر ويظل عزم ثنائى القطب الكهربائى دون تغير .

هذا النوع من البلورات لا تظهر فيه الكهرضغطية .

أما إذا اعتبرنا بلورة ذات تركيب غير متماثل كما فى شكل (١٥ - ١٢)

تترتب الأيونات على شكل أزواج تكون ثنائيات قطب .



شكل (١٥ - ١٢)

عندما نؤثر على هذه البلورة بإجهاد ميكانيكى يحدث تشويه يسبب الإزاحة النسبيه للأيونات بشكل غير متماثل ، وبذلك تتغير القيمة الكلية لعزم ثنائى القطب الكهربائى فى البلورة .

تسمى هذه الظاهرة بالكهرضغطية نسبة إلى حدوث استقطاب كهربائى ناشىء عن الإجهاد الميكانيكى ، ويلاحظ أن هذه الظاهرة انعكاسية أى أن تغيير استقطاب المادة . كهربائيا يحدث أيضا بداخلها انفعال ميكانيكى ، وتستخدم لذلك هذا المواد كمحولات للطاقة الكهربائية إلى ميكانيكية والعكس بالعكس .

ثابت الكهرضغطية η :

عندما نؤثر على مادة كهرضغطية بمجال كهربائى متردد E تحدث إزاحة كهربائية دورية ، وعادة تتخلف الإزاحة خلف المجال نتيجه لإختلاف فى الطور وتتوقف زاوية الطور

على تردد المجال المؤثر .

. وتحدث حالة رنين عندما تكون الإزاحة والمجال متحدتان فى الطور تماما .

اعتبر مادة كهرضغطية موضوعة بين لوحى مكثف كهربائى ويمكن إحداث ضغوط طولية على المادة بإجهاد σ ينشأ عن ذلك انفعال e حيث :

$$e = \frac{\sigma}{Y}$$

حيث Y هو معامل المرونة ليونج

يحدث الإجهاد المؤثر استقطابا كثافته P يتناسب مع مقدار الإجهاد أى أن :

$$\therefore P = \eta \sigma$$

حيث η ثابت يسمى الثابت الكهرضغطى .

إذا أثرنا على سطحى المادة بمجال كهربائى E دون إحداث ضغوط ميكانيكية يكون الانفعال الحادث متناسبا مع شدة المجال

$$\therefore E = \eta E$$

أما إذا أثرنا فى وقت واحد بالإجهاد الميكانيكى والمجال الكهربائى تكون الإزاحة الكهربائيةD هى :

$$D = \varepsilon E + \eta \sigma$$

ويلاحظ هنا إن الإزاحة الكهربائية عن المجال الكهربائى فقط هى :

$$D = \varepsilon E$$

يكون بذلك الانفعال الداخلى فى المادة هو :

$$e = \eta . E + \frac{\sigma}{Y}$$

وتعطى هذه العلاقة تغير المعاملات المكيانيكية بالمعاملات الكهربية فى ظاهرة الكهرضغطية electrostriction .

مسائل علي الباب الخامس عشر

١ – مكثف ذو لوحين متوازيين وضع نترات الصوديوم بينهما ثابت العازل K = 5.2.
إذا كانت مساحة لوحى المكثف هى : $0.25\ m^2 \times 0.10$ ووصل لجهد ثابت 250 V .
أوجد :

أ – سعة المكثف إذا كان البعد بين اللوحين 0.05 m .

ب – الشحنة على اللوحين .

جـ – عزم ثنائى القطب لوحدة الحجوم من العازل بين اللوحين .

د – شدة المجال الكهربى داخل العازل ؟

٢ – مكثف يتركب من كرتين متحدتى المركز نصفى قطريهما 3 & 4 cm . ملىء الفراغ بينهما بمادة الكبريت (K = 4.0) أوجد سعة المكثف ؟

٣ – أوجد عزم ثنائى القطب الكهربائى لجزىء من كلوريد الصوديوم ، اعتبر أن الجزىء يتركب من أيونى صوديوم وكلور يبعدان عن بعضهما مسافة 2.5 °A .

٤ – وضع غاز مثالى ثنائى القطبية فى مجال شدته $3 \times 10^5\ V\ m^{-1}$. إذا كان عزم ثنائى القطب لجزىء الغاز $10^{-19}\ C\ .\ m$.

احسب طاقة الموضع لثنائى القطب فى هذا المجال ، واثبت أن طاقة التهييج الحرارى kT عند درجة حرارة الغرفة تبلغ أكثر من ألف مرة قيمة هذه الطاقة .

٥ – احسب عزم ثنائى القطب لكل من مجاميع الشحنات التالية :

أ – شحنة 1 µC + عند النقط (0,0) ، (1,0) ، (2,0) .

وشحنة 1 μC - عند النقط (4,0) ، (5,0) ، (6,0) . والإعداد بالمتر .

ب – شحنات 3 μC + عند (0,0) .

6 μC + عند (1,1) .

3 μC - عند (1,0) .

6 μC - عند (0,1) .

٦ – اذا كانت قيمة النفاذية النسبية للأرجون Permittivity عند درجة 0 °C وضغط جوى واحد هى 1.000435 أوجد استقطابية ذرة الأرجون .

٧ – قضيب رفيع اسطوانى يتركب من ذرات استقطابيتها 10^{-40} f . m^2 . إذا كان بمادته عدد 5×10^{28} ذرة فى كل متر مكعب واثرنا عليه فى اتجاه طوله بمجال كهربائى. أوجد النسبة بين المجال المحلى إلى المجال الخارجى المؤثر .

٨ – أوجد سمك بلورة من الكوارتز لكى يكون لها تردد رنينى يساوى :

10 K c/s ; 1 M c/s ; 10 M c/s علما بأن تردد الرنين للكوارتز

$$f_0 = \frac{1}{2b} \sqrt{E/\rho}$$

حيث b ثابت يحدد الاهتزاز الكهرضغطى فى الكوارتز ،

E معامل يونج للمرونة للكوارتز ويساوى 10^{10} n m^{-2}

ρ كثافة الكوارتز وتساوى 2500 kg m^{-3} .