

المواد العازله

المرحله الرابعه
فرع علم المواد
قسم العلوم التطبيقيه

مدرس ماده
د. مفيد عبد اللطيف جليل

الفصل الاول

العوازل الكهربائيه Electrical Insulators

المقدمة: تختلف المواد العازله عن المواد الموصله في كونها لاتمتلك الكترونات حرة الحركه تنساب داخل الماده تحت تاثير المجال الخارجي ومن الامثله على هذه المواد الزجاج و السيراميك و البوايمرات والورق والشمع

المجال الكهربائي يؤثر في ايونات او ذرات المواد العازله التي هي عباره عن شحنات سالبه و شحنات موجبه حيث يحدث اختلالا في حالة توازن الشحنات وتبتعد الشحنات الموجبه باتجاه المجال الكهربائي بينما تزاح الشحنات السالبه بالاتجاه المعاكس مكونه ثنائي قطب كهربائي وهذه الازاحه هي صغيره جدا قياسا الى الابعاد الذريه للماده حيث انها لاتزيد عن (10^{-5} \AA) ويقال للماده العازله في هذه الحاله انها استقطبت، وهناك مواد عازله تحتوي على ثنائي قطب دائمي بوضعها الاعتيادي ويكون اتجاهها عشوائي بحيث ان محصلة عزوم ثنائي القطب تكون فيها مساويه للصفر. وفي حالة تعرض هذه المواد الى المجال الكهربائي فان المجال الكهربائي يؤثر بعزم معين على ثنائيلت القطب هذه ويحاول تدويرها باتجاه المجال، وفي كلا الحالتين فان عملية الاستقطاب تؤدي الى ظهور مجال كهربائي يكون اتجاهه معاكس الى اتجاه المجال الخارجي ولقد وجد ان استقطاب الماده العازله يعتمد على محصلة المجال الكهربائي التي تعتمد على المجال الكهربائي لثنائي القطب التي تعتمد بدورها على طبيعة الماده.

المجال الخارجي بعد وضع الماده العازله

$$\vec{E} = \vec{E}_o - \vec{E}_b \quad \dots\dots(1)$$

\vec{E}_o : المجال بدون ماده عازله

\vec{E}_b : المجال داخل الماده العازله

اهم خواص المواد العازله:

1- المقاومة الاوميه للعازل: عند تسليط فرق جهد معين بين طرفي العازل فان تيار مقداره I_{in} سيمر جلال ذلك العازل و يسمى تيار التسرب (Leakage current) و هو على نوعين مختلفين بالاعتماد على نوع المقاومة فب العازل:

أ- المقاومة الحجميه: وهي مقاومة العازل لتيارات التسرب التي تسري عبر حجم العازل.

ب- المقاومة السطحيه: وهي مقاومة العازل لتارات التسرب التي تسري عبر سطح العازل والتي تختلف قيمها عن التيارات التي تسري داخل الحجم وتاتي هذه التيارات بسبب الرطوبه والسوائب على سطح ماده العازله.

اذا كانت فولتية V المصدر فان التيار السطحي هو I_S والتيار الحجمي I لذلك فان مقاومة العزل R_{in} هي:

$$R_{in} = \frac{V}{I_{in}}$$

$$G_{in} = \frac{1}{R_{in}} = \frac{I_{in}}{V}$$

حيث ان هو التوصيليه للعازل

$$\therefore I = VG = \frac{V}{R} \quad \text{and} \quad I_S = VG_S = \frac{V}{R_S}$$

$$\therefore I_{in} = I + I_S \Rightarrow G_{in} = G + G_S \Rightarrow \frac{1}{R_{in}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_S}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{R_{in}} = \frac{R_S + R}{R \cdot R_S} \Rightarrow \frac{I_{in}}{V} = \frac{R_S + R}{R \cdot R_S}$$

$$\therefore \frac{V}{I_{in}} = \frac{R_S + R}{R \cdot R_S} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ويمكن بواسطة المعادله (2) ايجاد مقدار التيار المار خلال العازل (على فرض ان المقاومتين للعازل مربوطتين على التوازي تكثلان المقاومه الحجميه و السطحيه).

ترتبط المقاومه الحجميه للعازل R مع ابعاد العازل بالعلاقه:

$$R = R_o \frac{h}{S}$$

حيث ان هي R_o المقاومه النوعيه للعازل ($\Omega \cdot m$)
 h سمك العازل
 S المساحه السطحيه لمقطع العازل

ويعبر عن المقاومه النوعيه بدلاله التوصيليه γ بالعلاقه:

$$\gamma = \frac{1}{R_o} \quad (\Omega \cdot m)^{-1}$$

والمعامل الذي يصف الشكل الهندسي للعازل من خلال ابعاده يسمى الطول الفعال (Effective length) ورمزه Λ اي ان:

$$\Lambda = \frac{S}{h}$$

2- السماحيه Permittivity: من خلال العلاقه ما بين الازاحه الكهربائيه \vec{D} Electrical Displacement و المجال الكهربائي Electrical Field \vec{E} يمكن التعبير عن السماحيه (ϵ) حيث:

$$\epsilon = \frac{\vec{D}}{\vec{E}} \Rightarrow \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\sigma_c = D = \frac{Q}{S} \quad \dots\dots\dots(4)$$

حيث σ_c : كثافة الشحنة السطحيه
 Q : كمية الشحنة الكهربائيه

$$\therefore Q = S \cdot D \quad \text{and} \quad V = E \cdot h \quad \text{and} \quad C = \frac{Q}{V}$$

$$\therefore C = \frac{S \cdot D}{E \cdot h} = \frac{D}{E} \cdot \frac{S}{h}$$

$$\therefore C = \epsilon \frac{S}{h} \quad \dots\dots\dots(5) \quad \text{وتمثل علاقه المتسعه بدلاله الابعاد}$$

حيث ϵ سماحية المادة العازله، وان ثابت العزل الكهربائي ϵ_r هو نسبة (سماحية المادة \ سماحية الفراغ) ($\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi = 8.85 * 10^{-12} (F/m)$)

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \Rightarrow \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

وبما ان السعة تمثل النسبه بين الشحنتين على اللوحين الى فرق الجهد المسلط، واذا كانت σ_c تمثل كثافة الشحنة السطحيه على احد اللوحين فان:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\sigma \cdot S}{E \cdot h}$$

$$\text{but } C = \epsilon \frac{S}{h} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{h}$$

$$\epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{h} = \frac{\sigma \cdot S}{E \cdot h} \quad \text{وبمساواة المعادلتين}$$

$$\sigma_c = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad \dots\dots\dots(6)$$

ومن اعلاه نلاحظ ان السعه الكهربائيه تتزايد عند وضع العازل بسبب زيادة استيعاب الشحنات بنسبة ϵ_r . اما اذا كانت الشحنة ثابتة فان سبب الزيادة قد يعزى الى ان E_0 تهبط الى قيمه (E_0/ϵ_r) ، فاذا كان المجال المسلط بين اللوحين بوجود الفراغ والمجال المعاكس الناشء داخل العازل E_b فان المجال الخارجي بعد وضع العازل يكون:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}_b$$

ان هذا الهبوط في المجال الخارجي ينشاء بسبب المجال الكهربائي داخل العازل نتيجة الشحنات المستقطبه.

يمكن استنتاج علاقه تربط الخاصيتين التي يتصرف بهما العازل (المقاومه والسعه) حيث اذا تساوت مساحة مقطع العازل مع مساحة لוחي المتسعه اي ان العازل يملئ جميع المتسعه فانه في الحالات الكهروستاتيكيه نحصل على:

$$\therefore R = R_0 \frac{h}{S} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{h}{S} \Rightarrow \frac{h}{S} = \gamma R \Rightarrow \frac{S}{h} = \frac{1}{\gamma R}$$

$$\therefore C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{h} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{1}{\gamma R}$$

$$\therefore RC = \frac{1}{\gamma} \epsilon_0 \epsilon_r \quad \dots\dots\dots(7)$$

3- الاستقطاب Electric polarization

تسمى العوازل التي لا تمتلك شحنات طليقة بالعوازل المثالية (Identical dielectric) ولكن جميع الاوساط المادية تتركب من جزيئات وهذه تتألف من جسيمات مشحونه (نوى الذرات او الالكترونات) و الجسيمات تتأثر بالمجال الكهربائي لانه يسلط قوة على هذه الجسيمات المشحونه مما يؤدي الى ازاحة كل الشحنات الموجبه والسالبه عن موضع الاتزان، من وجهة النظر العينية (Microscopic) يقال عن العازل انه مستقطب. ان هذا الفصل مابين الشحنات يولد ما يسمى بالدايبول (او ثنائي القطب) وبالتالي يتولد عزم دايبول الذي يمثل حاصل ضرب الشحنة الكلية المتولده على سطح العازل في المسافه بين سطحي العازل. ويمكن تصنيف جزيئات العازل الى جزيئات قطبيه (Polar molecules) وجزيئات لاقطبيه (Non polar molecules). ففي الجزيئات اللاقطبيه ينطبق مركز ثقل البروتونات والالكترونات عند انعدام المجال الخارجي، اما في الجزيئات القطبيه فان مركز ثقل البروتونات والالكترونات لاينطبقان حتى بغياب المجال الخارجي. فعند تسليط مجال كهربائي على الجزيئات اللاقطبيه يظهر دايبول محتث (Induced dipole) الذي يمثل عزم حاصل ضرب احد الشحنتين في المسافه بينهما، اما تسليط مجال كهربائي على الجزيئات القطبيه فانها تتأثر بعزم ازدواج يعمل على تدوير الدايبول باتجاه شدة المجال الكهربائي وهذا المجال يزيد من قيمة عزم الدايبول وتدعى الجزيئه القطبيه بالدايبول الدائم (Permanent dipole).

هناك قوى تحاول اعاده الشحنات المزاحه نتيجة تاثير المجال الكهربائي وهي قوى الربط الداخلي لاجزاء الجزيئه مع بعضها، على الرغم من منشئها الكهربائي يمكن تصورها قوى معيده مرنه تسحب الشحنات المزاحه الى بعضها وكانها مربوطه مع بعضها بنابض واذا كانت لدينا مجموعه من الجزيئات في الماده فان القوى الرابطه تختلف بالقيمه من جزيئه الى اخرى لذلك يصحبها اختلاف في عزوم الدايبولات المتولده نتيجة لوجود مجال كهربائي وبالتالي سيتكون فيض من الشحنات في الطبقتين السطحيتين الرقيقتين وهي تمثل الشحنات السطحيه المحتثه السالبه التي تتضمنها الطبقة الاخرى. وهذه الشحنات غير حره، ولكن كل منها مرتبط بذره تقع داخل او قرب السطح.

فاذا فرضنا ان كثافة الشحنات السطحيه المقيدة σ_b (Bound charge) تاتي حصيلة لاستقطاب العازل وتقع هذه الشحنات في نهايات العازل وبتماس مع الاقطاب، اما الشحنات داخل العازل فهي متعادل. حيث العزم الكهربائي لكامل حجم العازل هو:

$$\vec{p} = \sigma_b \cdot S \cdot h \quad (c \cdot m) \dots \dots \dots (8)$$

وبقسمة حجم العازل على طرفي المعادله نحصل على الجزيئات المستقطبه:

$$\vec{P} = \frac{\vec{p}}{S \cdot h} = \sigma_b \Rightarrow \vec{P} = \sigma_b \quad (c/m^2) \dots \dots (9)$$

اي ان الاستقطاب الكهربائي يساوي كثافة الشحنة السطحية للشحنات المقيدة على العازل.

فاذا كان الوسط يحتوي على جزيئات متعددة فان عزم الدايبول لجزيئه واحده هو:

$$\vec{p} = \int_{molecule} \vec{r} dq \quad \dots \dots \dots (10)$$

حيث \vec{r} يمثل بعد الجزيئه عن نقطة الاصل.

يمكن التعبير عن عزم الدايبول ليغطي جميع جزيئات المادة داخل عنصر من الحجم ΔV بالعلاقة:

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_m \vec{p}_m \quad \dots \dots \dots (11)$$

حيث تعتمد درجة استقطاب الوسط على المجال الكهربائي وعلى خواص جزيئات ذلك الوسط. ويمكن كتابة داله بين \vec{P} و \vec{E} حيث:

$$\vec{P} = \vec{P}(\vec{E})$$

وهذه علاقه نقطية، تتغير \vec{P} اذا تغيرت \vec{E} داخل العازل. فالمواد التي يتلاشى فيها \vec{P} عند تلاشي \vec{E} تسمه العوازل غير القطبيه، اما للعوازل ذات الاتجاه الواحد فان العلاقه بين \vec{P} و \vec{E} هي:

$$\vec{P} = \chi \vec{E} \quad \dots \dots \dots (12)$$

حيث χ كميته غير اتجاهيه تدعى التاثيرييه الكهربائيه او قابلية التكهرب للماده (Dielectric susceptibility).

و يمكن تعريف الاستقطاب من خلال الحث الكهربائي (Electric induction) او الازاحه الكهربائيه \vec{D} حيث:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\sigma_t}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} (\sigma_f + \sigma_b) \quad \dots \dots \dots (13) \quad \text{باستخدام قانون كاوس}$$

حيث σ_t كثافة جميع الشحنات
 σ_f كثافة الشحنات الطليقه
 σ_b كثافة الشحنات المقيدة

$$\therefore \vec{E} = -\vec{\nabla} \Phi$$

$$\therefore \vec{\nabla} \cdot (-\vec{\nabla} \Phi) = \frac{\sigma_t}{\epsilon_0} \Rightarrow \nabla^2 \Phi = -\frac{\sigma_t}{\epsilon_0} \quad \text{(معادلة بواسون)}$$

$$\text{Also: } \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \sigma_f - \frac{1}{\epsilon_0} \vec{\nabla} \cdot \vec{P} \Rightarrow \epsilon_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \sigma_f - \vec{\nabla} \cdot \vec{P}$$

$$\Rightarrow \vec{\nabla} \cdot (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) = \sigma_f$$

$$\therefore \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad \dots\dots\dots(14)$$

يعرف عزم الدايبول الجزيئي لوحدة المجال المستقطب بقابلية الاستقطاب او الاستقطابية (Polarization) ورمزها α اي ان:

$$\vec{p} = \alpha \vec{E} \quad \dots\dots\dots(15)$$

فاذا كان لدينا N من الجزيئات في وحدة الحجم و المستقطبه نتيجة تايثير المجال الخارجي، يمكن حساب الاستقطابية الناشئه عنها من العلاقه:

$$\alpha = \frac{3\epsilon_0 (\epsilon_r - 1)}{N (\epsilon_r + 2)} \quad \dots\dots\dots(16)$$

تعرف المعادله اعلاه بمعادله كلوزيوس – موسوتي (Clausius-Mossotti) وهي مهمه جدا لانها تصف العلاقه بين الاستقطاب α وثابت العزل ϵ_r . ويمكن اعطاء

شكل اخر للمعادله اعلاه بضربها بالمقدار $\frac{M}{\sigma} \frac{\sigma}{M}$ للطرف الايمن فينتج:

$$\alpha = \frac{3\epsilon_0 (\epsilon_r - 1) M}{N_A (\epsilon_r + 2) \sigma}$$

حيث M الوزن الجزيئي للماده العازله، σ كثافة الماده، و ان $N_A = \frac{NM}{\sigma}$ عدد

افوكادرو

ان الدايبولات الناشئه او الدائمه في المواد العازله لا بد ان تتحرك او تتذبذب بتاثير الحراره التي تكسب الدايبولات طاقه حركيه نتيجة تايثير المجال الكهربائي فاذا تعرض هذا العازل لمجال كهربائي تردده في نطاق التردد البصري، يسمى هذا الاستقطاب بالاستقطاب الالكتروني (Electronic polarization) او الاستقطاب البصري (Optical polarization) حيث يحدث بسبب الفصل بين مركز الشحنات الموجبه في مركز النواة ومركز الشحنات السالبه للالكترونات الذي كان منطقيا قبل تسليط المجال.

اذن في الترددات العاليه يكون هناك تايثير الاستقطاب الالكتروني فقط لذلك فان المعادله اعلاه في الترددات العاليه تصبح:

$$\alpha_e = \frac{3\epsilon_0 (\epsilon_{r\infty} - 1)}{N (\epsilon_{r\infty} + 2)} \quad \dots\dots\dots(17)$$

حيث α_e الاستقطابية الالكترونيه

اذا كان المتر المكعب يحوي N من الدايبولات فان الاستقطاب الكلي يعطى بالعلاقه:

$$\vec{P} = N\alpha\vec{E}_i \quad \dots\dots\dots(18)$$

وباستخدام العلاقه (14) حيث:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \Rightarrow \vec{P} = \vec{D} - \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\therefore \vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$$

$$\therefore \vec{P} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} - \epsilon_0 \vec{E}$$

إذا المعادله (18) تصبح:

$$\epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \vec{E} = N \alpha \vec{E}_i$$

$$\Rightarrow N \alpha = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \frac{\vec{E}}{\vec{E}_i} \quad \dots\dots\dots(19)$$

و من المعادله (16) لدينا:

$$N \alpha = 3 \epsilon_0 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}$$

بمساواة المعادلتين نحصل على:

$$\epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \frac{\vec{E}}{\vec{E}_i} = 3 \epsilon_0 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}$$

$$\vec{E}_i = \frac{\epsilon_r + 2}{3} \vec{E} \quad \dots\dots\dots(20)$$

العلاقه (20) تحدد علاقته بين المجال الخارجي المسلط \vec{E} و المجال الداخلي \vec{E}_i الذي يسمى مجال لورنزر. وتصف هذه الخواص المجهرية والجاهريه للماده العازله.

من النموذج الكروي للذره، وعلى اعتبارها ماده عازله كرويه ذات نصف قطر a لها سماحيه ϵ يخترقها مجال كهربائي \vec{E} ، يمكن ايجاد تعبير للاستقطابيه كما في العلاقه الآتيه:

$$\alpha = 4 \pi \epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + 2 \epsilon_0} \quad \dots\dots\dots(21)$$

نتيجه لفصل الذي يحدث بين مركزي ثقل الشحنات السالبه والموجبه عند تكوين الجزيئه ينشأ عنها دايبولات دائميّه، مثال ذلك بلورات (NaCl) القطبيّه. والاستقطابيه التي تنشأ نتيجة هذا الفصل سواء كانت الدايبولات الناشئه دائميّه او مؤقتة تسمى بالاستقطابيه الذريه او الايونيّه (Atomic or Ionic polarizability) وهي تصف الاستقطاب في جميع الجزيئات وتسمى في بعض الاحيان الاستقطابيه الجزيئيّه (Molecular polarizability) وتبرز اهميتها في المجالات الكهربائيه عندما يكون ترددها تحت الحمراء، ويرافق الاستقطاب الايوني نوع اخر من الاستقطاب نتيجة دوران الدايبول حول محور التنافر حيث تترتب الدايبولات باتجاه المجال المسلط، يسمى هذا النوع بالاستقطاب الاتجاهي او الدوراني (Orientational polarization). ان هذه الحركه او التارجح للمواد التي تتميز بالدايبولات الدائميّه تكون مستمره ومنتقله من مكان الى اخر وتزداد هذه

$$\alpha_o$$

ان جميع انواع الاستقطابيه تعطى بالعلاقه:

$$\alpha = \alpha_o + \alpha_d + \alpha_i + \alpha_e \quad \dots\dots\dots(22)$$

حيث جميع المواد تحتوي على استقطابيه الكترونيه α_e ، و المواد القطبيه تحتوي على α_e اضافه الى الاستقطابيه الايونيه α_i (استقطابيه جزيئيه) وفي حالة وجود دايبولات في ماده يمكن دورانها حول محورها يضاف α_d الذي يمثل الاستقطابيه الدورانيه، وعندما تكون ماده مشوبه بالعيوب وغير متجانسه تضاف الاستقطابيه البينييه α_o ويظهر تاثير هذا النوع من الاستقطابيه في الترددات الدقيقه (Microwaves) وقد تمتد حتى الترددات الواطنه جدا دون الموجات السمعيه بالاعتماد على نوع العيوب وفقدان التجانس الذي يسبب الاستقطاب البيني.

تظهر في الترددات الواطنه الانواع الاولى من الاستقطاب ($\alpha_o + \alpha_i + \alpha_d$) حيث يقل تاثيرها عند الترددات العاليه ويبداء ظهور الاستقطابيه الالكترونيه.

ففي الترددات الواطنه تصبح معادله كلوزيوس- موستي كما يلي:

$$\alpha = \frac{3\epsilon_o (\epsilon_{rs} - 1)}{N (\epsilon_{rs} + 2)} \quad \dots\dots\dots(23)$$

α تحدد من مدى التردد الذي تظهر فيه.

اظهرت التحاليل النظرية والعلميه ان الاستقطابيه الالكترونيه والذريه التي تتميز بها المواد القطبيه الخاليه من الدايبولات الدائمه بانها لا تتاثر بدرجات الحراره، اما الاستقطابيه الدورانيه والتي تتميز بها المواد الدايبوليه فانها تتناسب عكسيا مع درجات الحراره وفق العلاقه:

$$\alpha_d = \frac{p^2}{3KT} \quad \dots\dots\dots(24)$$

حيث K ثابت بولتزمان

إذا الاستقطابيه الكليه للماده تعطى بالعلاقه:

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \frac{p^2}{3KT} \quad \dots\dots\dots(25)$$

هنا اهمل تاثير الاستقطابيه البينييه وذلك لصعوبة تحديد كيفية تغيرها مع درجة الحراره لانها تعتمد على مكونات الماده وصفاتها الذاتيه.

تصنيف المواد العازلة من العلاقة الوظيفية بين الاستقطاب والمجال الكهربائي ($\vec{P} = \vec{P}(\vec{E})$) يمكن تصنيف المواد العازلة الى:

أ- **مواد دائمة الاستقطاب** Permanent Polarization ، وهذه المواد تكون مستقطبة حتى بغياب المجال الكهربائي.

ب- **العوازل الخطية** Linear Dielectric وهي المواد التي لا تتغير فيها التأثير الكهربائي والسماحية مع الاستقطاب وشدة المجال الكهربائي وتكون χ و ϵ دوال للموقع وتقسم الى:-

1- **عوازل خطية متماثلة** Linear isotropic dielectrics على الرغم من ان χ و ϵ لا تعتمد على \vec{P} و \vec{E} فان هناك تماثلا في الاتجاهات المتناظرة اي ان χ و ϵ للاتجاهات المتناظرة تكون متساوية ولكن من الممكن ان تبقى معتمده على الموقع.

2- **العوازل الخطية المتماثلة الخواص متجانسه** Linear isotropic homogeneous dielectrics هذه المواد لها نفس صفات العوازل في الصنف (1) بالاضافة الى ان هذه المواد لاتعتمد على الموقع، اي ان التغير في χ و ϵ بالنسبة للموقع تساوي صفر.

ج- **العوازل اللاخطية** Non-linear Dielectric وتتضمن هذه العوازل خواص متعددة منها:

1- **الخاصية الفيروكهربائية** وتكون فيها العلاقة وثيقه وظاهره بين \vec{E} و ϵ ويمتاز بالصفات التاليه:

أ- **التخلف** Hysteresis تحدث هذه الصفة عند تأثير فولتيات مختلفه على العازل فنحصل على حلقة التخلف الكهربائي (loop of electric hysters) من رسم مخطط (\vec{D}, \vec{E}) او (\vec{P}, \vec{E}) او (Q, V) . ان العلاقة بين \vec{P} و \vec{E} في هذا الصنف من المواد يمكن توضيحها كم ياتي: تسليط مجال كهربائي \vec{E} على ماده فيروكهربائية يؤدي الى استقطاب الجزيئات باتجاه معاكس للمجال الكهربائي ويصل هذا المجال الى حالة الاشباع عند قيمه محددة للمجال الكهربائي حيث تصطف الشحنات المقيدة بصوره كامله، وعند خفض المجال الكهربائي الى الصفر نلاحظ بقاء الماده مستقطبه، وتتطلب جهدا اضافيا بالاتجاه المعاكس لكي تستطيع عكس اتجاه الاستقطاب فيكون متابعا لمتجه المجال الكهربائي وهذا يعني ان متجه الاستقطاب يتخلف ويتاخر عن متابعة المجال الكهربائي.

من اهم المواد التي تمتاز بهذه الصفة هي:

- Barium Titanate: $BaTiO_3$
- Rochelle salt: $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$
- Potassium dihydrogen Phosphate: KH_2PO_4
- Lead Zirconate-titanate: $Pb[ZrO_3, TiO_3]$

ب- تمتاز المواد الفيروكهربائية بسماحيه عاليه جدا (وجدت في السنوات الاخيريه مواد تمتاز بالخاصيه الفيروكهربائيه وذات سماحيه واطئه), تصل السماحيه الى اعظم قيمه لها عند درجات حراره محدده او شدة مجال معين.

ج- العلاقه الصريحه والواضحه بين متغيرات العازل ودرجة الحراره ووجود الخصائص الفيروكهربائيه فقط عند مدى حراري محدد، وجميع المواد الفيروكهربائيه تمتلك هذه الصفة، فالسماحيه وبعض الخواص الفيزيائويه تتغير مع درجة الحراره، وتوصف خصائص ماده من خلال تحديد نقاط الانتقال او مايسمى بنقاط كوري (Curie Point) حيث مقدار السماحيه عند اقصاها وفقدان الخصائص الفيروكهربائيه يحصل عندما تكون درجة حراره ماده اعلى من درجة حراره كوري، ونقاط كوري تشبه تلك النقاط التي تحدد الخواص الفيرومغناطيسيه للماده. المواد السيراميكيه التي تمتاز بالخاصيه الفيروكهربائيه تسمى الفيروسيراميكيه (Ferroceramic) وهي تمتلك نقطة كوري واحده في المدى الحراري العالي وفي بعض المواد فان درجة حراره كوري تمتد لمناطق حراريه عاليه اكثر من $(200^\circ C)$ واقل ما يمكن $(100^\circ C)$ وتعتمد درجة حراره كوري على مدى نقلوة ماده. وفي المدى الاكبر من درجة حراره كوري تمتاز ماده بالخصائص الباراكهربائيه ويكون التغير بين ϵ و T كما في العلاقه ادناه:

$$\epsilon = \frac{C}{T - \theta_1} \dots\dots\dots(26)$$

العلاقه اعلاه تسمى بقانون كوري- وايز (Curie-Weirss). حيث C ثابت كوري- وايز، θ_1 نقطة كوري العظمى (نقطه حرجه) وتظهر هذه الحاله عندما تكون الاستقطابيه الاتجاهيه هي الطاغيه على الاستقطابين الالكتروني و الايوني $(\alpha_d \gg (\alpha_e + \alpha_i))$

2- الخاصيه البروكهربائيه: تسمى هذه الظاهره ايضا بالاجهاديه الكهربائيه وتحدث نتيجة تسليط قوة ميكانيكيه على بعض البلورات،

الخواص البيزوكهربائية لاي ماده تحسب من ثابت البيزوكهربائية حيث يمثل النسبه بين مقدار الشحنة المتولده الى القوه الميكانيكيه المطلقه على طول المحور البلوري. ويمثل هذا الثابت بالنسبه للكوارتز (2.2 PC/N) وهذا يعني تولد شحنات اضافيه نتيجة تاثير الاجهادات الميكانيكيه ستضاف الى الشحنات المقيده المتولده نتيجة الاستقطاب من المجال الخارجي.

السماحيه لخليط من مواد متعددة الاطوار:

في احيان كثيره تستخدم مواد سراميكه عازله متعددة الاطوار (Multiphase) متكون من الطور الزجاجي مع حبيبات بلوريه من الكوارتز و المولايت (بورسلين تقني كهربائي)، فعلى اثر التغيرات في خواص الاطوار المنفرده تتكون سطوح بينيه منفصله بشده (شحنات فراغيه) تكون الاستقطاب في هذه المواد، ويلاحظ ذلك من خلال تزايد قيمة السماحيه العزليه عند الترددات المنخفضه للمجال الكهربائي، حيث ينشا استقطاب السطوح البينييه (استقطاب الشحنات الفراغيه) عند هذا المدى من الترددات، تبقى هذه الشحنات محافظه على الانتظام مع تغيرات المجال، ويكون هذا التأثير واضحا خصوصا في درجات الحراره العاليه بسبب اي تزايد في درجة الحراره يؤدي الى تحفيز وتنشيط حاملات الشحنة، فيظهر تاثير مركز السطوح البينييه المستقطبه بشكل كبير، عندها يحدث تزايد في فقدان الطاقه. كذلك في حالة المواد متعددة الاطوار يمكن قياس القيمه المحصله للسماحيه عند ثبات التردد ودرجة الحراره، على اساس قياس السماحيه العزليه لاطوار وتوزيعات تبادليه مختلفه. فعندما يحصل الطور في الطبقات الموازيه او العاموديه على اتجاه المجال الكهربائي المسلط فان حصيلة السماحيه الكهربائيه يمكن ايجادها من العلاقه الاتيه:

$$\frac{1}{\epsilon'_m} = \frac{V_1}{\epsilon'_1} + \frac{V_2}{\epsilon'_2} + \dots + \frac{V_q}{\epsilon'_q} \quad \text{للطبقات العاموديه}$$

$$\epsilon'_m = V_1\epsilon'_1 + V_2\epsilon'_2 + \dots + V_q\epsilon'_q \quad \text{للطبقات الموازيه}$$

في العلاقتين اعلاه يلاحظ ان ϵ'_m تشير الى الجزء الحقيقي من السماحية الكهربائيه في النظام. $\epsilon'_1, \epsilon'_2, \dots, \epsilon'_q$ تعني سماحية الاجزاء الحقيقيه المنفصله اما V_1, V_2, \dots, V_q تعني كسور الحجوم لهذه الاطوار.

ويمكن تعميم العلاقتين اعلاه فنحصل على:

$$\log \epsilon'_m = \sum_q V_q \log \epsilon'_q \quad \dots\dots\dots(27)$$

ويمكن استخدام العلاقه اعلاه في تقدير السماحية لانظمة متعددة الاطوار من معرفة سماحية كل نظام.

الفقدان العزلي

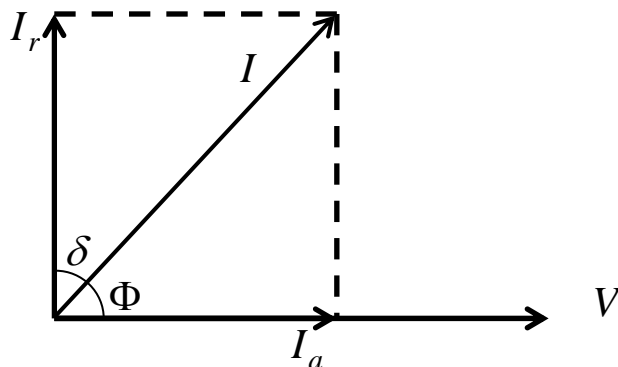
عند تسليط مجال كهربائي على اي ماده فان التبدد في الطاقه يكون على شكل حراره، فالموصلات والعوازل تشترك في هذا النوع من التبدد وبنفس العلاقه التي

تمثل مقدار الطاقه المفقوده لوحده الزمن (القدره $P_w = \frac{V^2}{R}$) ولكن العوازل تمتاز

بالخصوصيه الاتيه:

التبدد في القدره يكون متغير ومعتمد على تردد فولتية المصدر وعلى نوع وشكل ماده العازله. هذا الضياع في القدره يعرف كفقدان عزلي (Dielectric losses) ويصف الضياع تحت تاثير اي فولتية متغيره على العازل، لذلك فعند التكلم عن الفقدان نعني الضياع تحت تاثير الفولتية المتناوبه.

عند تسليط فولتية متناوبه V على متسعه، وعلى فرض انه لا توجد هناك فقدان (عازل مثالي) في هذه الحاله يمر طور التيار I خلال المتسعه ويتقدم على طور الفولتية V بزوايه 90° وهذا التيار يعد مثالي. في الحقيقه زاوية الطور Φ اقل بقليل من 90° والتيار الكلي I المار خلال المتسعه يتحلل الى مركبتين قطبيتين، التيار الفعال I_a باتجاه الفولتية، والآخر التيار المفاعل (السعوي) I_r عمودي على اتجاه الفولتية كما في الشكل ادناه:



زاوية الطور تكون في اقصاها عند 90° للمتسعات ذات نوعيه عاليه. الزاويه δ تمثل زاوية فقدان العزل، ومن المخطط الطوري يمكن حساب التيار الكلي من التيار الفعال (الذي يمر في مقاومة العازل)، والتيار I_r الذي يمثل حالة متسعه صرف اي ان:

$$I = I_a + jI_r \quad \dots\dots\dots(28)$$

حيث $j = \sqrt{-1}$ ، وظل زاوية الفقدان تعطى بالعلاقه:

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_r} \quad \dots\dots\dots(29)$$

في بعض الاحيان توصف العوازل بواسطة عامل النوعيه (Quality factor) Q الذي يمثل معكوس قيمة الظل اي ان:

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \cot \delta = \tan \Phi \quad \dots\dots\dots(30)$$

ومن السهوله ايجاد تعبير نحصل منه على قيمه القدره الضائعه في العزل P_w لمتسعه سعتها C من منحنى مخطط الطور اي ان:

$$P_w = VI_a = VI_r \tan \delta$$

$$\therefore I_r = VWC$$

$$\therefore P_w = V^2WC \tan \delta = V^2(2\pi f)(\Lambda \epsilon_o \epsilon_r) \tan \delta$$

$$\therefore P_w = 5.56 * 10^{-11} V^2 f \Lambda \epsilon_r \tan \delta \quad \dots\dots\dots(31)$$

حيث f تردد المصدر و W التردد الزاوي

اما في حالة العوازل غير المتجانسه فان $\tan \delta$ وباقي معاملات العزل تكون غير متشابهه لجميع النقاط، فعند قياس $\tan \delta$ يؤخذ على اساس المعدل او القيم المؤثره (Effective) لظل الفقدان لجميع نقاط العازل. في هذه الحالة من الضروري معرفة توزيع الفقدان عند نقاط مختلفه داخل العازل من معرفة شدة المجال لكل نقطه داخل العازل، واذا فرضنا العازل على شكل مكعب فان نقطة ما داخل العازل تعطي احداثي dx بعدا لاحد اضلاع جزء حجم المكعب. فعندما نريد معرفة الفقدان في الطاقه عند هذه النقطه نفرض ان المجال يخترق وجهين من المكعب بصوره عموديه، فالسعه يمكن ايجادها لهذا الجزء حيث:

$$dc = \epsilon_r \epsilon_o dx ; h = dx \Rightarrow S = (dx)^2$$

والفولتية المسلطه على هذا الجزء هي:

$$V = Edx$$

حيث الفولتية متغيره مع المسافه بسبب عدم التجانس. القدره المفقوده لوحده الحجم تصبح:

$$P_w = \frac{dP_w}{(dx)^3} = E^2 f \frac{\epsilon_r \tan \delta}{1.8 * 10^{10}} \quad (\text{watt} / \text{m}^3) \quad \dots\dots\dots(32)$$

هذه العلاقه تصح في حالة المجال الكهربائي المنتظم وهي حالة لاتعتمد على تجانس او عدم تجانس النماذج لانها تعطي حالة العازل بين صفيحتين عندما تكون شدة المجال الكهربائي هي \vec{E} .

ان حاصل الضرب $\epsilon_r \tan \delta$ يعطي معامل يدعى الفقدان العزلي (Dielectric loss index) و من العلاقتين (31) و(32) نحصل على

$$P_w = E^2 \gamma_a \quad \dots\dots\dots(33)$$

$$\text{where } \gamma_a = W \epsilon_o \epsilon_r \tan \delta = \frac{f \epsilon_r \tan \delta}{1.8 * 10^{10}} \quad \left(\frac{\text{siemens}}{\text{m}} \right)$$

تدعى γ_a بالتوصيليه النوعيه المؤثره (Active volume conductive).

وتحت تاثير الفولتية المستمره، الفقدان النوعي لوحده الحجم هو:

$$P_{w.dir} = \frac{E^2}{R_o} = E^2 \gamma_{dc} \quad \dots\dots\dots(34)$$

في كثير من الحالات فان $P_w \geq P_{w.dir}$ وان $\gamma_a \geq \gamma_{dc}$ حيث اقصى قيمه ل $P_{w.dir}$ هي عندما تتساوى مع P_w ويمكن تحقيق هذا الشرط عندما:

$$f \epsilon R_o \tan \delta = 1.8 * 10^{10} \quad \dots\dots\dots(35)$$

لنفس شدة المجال الكهربائي للحالتين.

تدرس حالات الفقد على اعتبار مقاومة العازل R مربوطه مع متسعه صرفه في الحالتين، توالي (series) او توازي (parallel)، ومن المخطط الطوري لحالة التوازي نحصل على:

(توازي)

$$I_r = VWC_p \quad ; \quad I_a = \frac{V}{R_p}$$

$$\text{and } \tan \delta = \frac{I_a}{I_r} = \frac{1}{WC_p R_p} \quad \dots\dots\dots(36)$$

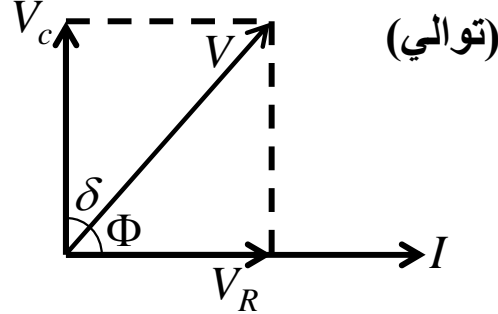
ومن حالة ربط التوالي:

$$\tan \delta = \frac{V_R}{V_c}; \sin \delta = \frac{V_R}{V}; \cos \delta = \frac{V_c}{V}$$

$$\Rightarrow I = V_c WC_s \Rightarrow V_c = \frac{I}{WC_s}$$

$$I = \frac{V_R}{R_s} \Rightarrow V_R = IR_s$$

$$\therefore \tan \delta = \frac{IR_s}{\frac{I}{WC_s}} = WC_s R_s \dots\dots\dots(37)$$



(توالي)

ومن ربط التوالي ايضا نحصل على:

$$P = IV_R = V_c WC_s V_R$$

$$P = V \cos \delta WC_s V \sin \delta = V^2 WC_s \sin \delta \cos \delta$$

$$P = \frac{1}{2} V^2 WC_s (2 \sin 2\delta) = V^2 WC_s \frac{\tan \delta}{1 + \tan^2 \delta}$$

$$or : P = \frac{V_R}{R_s} \cdot V_R = \frac{V^2 \sin^2 \delta}{R_s}$$

$$\therefore V^2 WC_p \tan \delta = V^2 WC_s \frac{\tan \delta}{1 + \tan^2 \delta}$$

$$\Rightarrow C_s = C_p (1 + \tan^2 \delta) \dots\dots\dots(38)$$

$$\frac{V^2}{R_p} = \frac{V^2 \sin^2 \delta}{R_s} \Rightarrow R_s = R_p \sin^2 \delta$$

ايضا

$$But : \sin^2 \delta = \frac{1}{1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}}$$

$$\therefore R_s = R_p \frac{1}{1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}} \dots\dots\dots(39)$$

و عندما تكون زاوية الفقد قليله فان $\tan^2 \delta$ تهمل حيث تصبح العلاقات اعلاه:
 $C_s \approx C_p ; R_s \approx R_p \tan^2 \delta \dots\dots\dots(40)$

اما اذا كان الفقد كبير فان السعه (وكذلك السماحيه اذا قيست من السعه) تصبح مقادير غير محددده حيث تعتمد على اختيار النموذج للفقدان العزلي.
 حيث ان $C_s > C_p$ وان $R_s < R_p$ وعند زاوية فقد كبيره فان المعادله (39) تصبح:

$$R_p \approx R_s \tan^2 \delta \dots\dots\dots(41)$$

السماحيه المركبه

التيار المتناوب يسبق الفولتية بزوايه اقل من 90° بقليل وذلك لوجود العازل بين لوحى المتسعه والذي يعمل كمقاومه مربوطه مع متسعه. يعطى التيار المتناوب بالعلاقه:

$$I = jWCV \dots\dots\dots(42)$$

حيث j يصف حالة الطور بين I و V وبالتعويض عن مقدار السعه نحصل على:

$$I = jW \frac{\epsilon_o \epsilon_r S}{h} V \dots\dots\dots(43)$$

فاذا قارنا بين العلاقه (28) والعلاقه (43) نلاحظ ان التيار في كلتا العلاقتين ذو مركبتين طوريتين، لذلك فالمتغير الوحيد الذي يمكن بواسطته تحقيق الشرط في الحالتين هو ان نعوض عن ϵ_r بالكميه:

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \dots\dots\dots(44)$$

هذا يعني ان السماحيه هي مقدار مركب، وعند التعويض بالمعادله (43) نحصل على:

$$I_a = W \epsilon_o \epsilon'' \frac{S}{h} V \dots\dots\dots(45)$$

$$I_r = W \epsilon_o \epsilon'' \frac{S}{h} V \dots\dots\dots(46)$$

ان حالة وجود مركبتين للتيار احدهما بنفس الطور مع الفولتية والاخرى متعامده تعني ان المتسعه ليست نقيه تماما C_p توازيها مقاومه R_p لذلك:

$$I = I_a + jI_r = \frac{V}{R_p} + jWC_p V \dots\dots\dots(47)$$

وبمقارنة العلاقتين (45) و (46) مع العلاقة (47) نحصل على:

$$\varepsilon' = \frac{hC_p}{\varepsilon_o S} \quad \dots\dots\dots(48)$$

$$\varepsilon'' = \frac{h}{W\varepsilon_o R_p S} \quad \dots\dots\dots(49)$$

يسمى العامل ε'' بمعامل الفقدان العزلي اي ان:

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta \quad \dots\dots\dots(50)$$

نستنتج ان المتسعه تبدد قدره مقدارها (VI_a) وكلما اقتربت المتسعه من الحاله المثاليه فان القدره المفقوده تتضائل حيث تقترب ε'' من الصفر وكذلك الزاويه δ . يعبر عن الفقدان في القدره بدلالة الزاويه δ ، وتدعى بزاوية الفقد (loss angel) ويسمى ظل زاوية الفقد $\tan \delta$ بظل الفقد (loss angel tan)، ومن تعريف الايصاليه النوعيه على اعتبار الايصاليه γ_a هي الجزء الناشى نتيجة الفقدان في مقاومة العازل R_p نحصل على:

$$R_p = \frac{h}{\gamma_a S} \quad \dots\dots\dots(51)$$

وبالتعويض عن العلاقة (49) نحصل على:

$$\gamma_a = W\varepsilon_o \varepsilon'' \quad \dots\dots\dots(52)$$

$$\Rightarrow \varepsilon'' = \frac{\gamma_a}{f} * 1.8 * 10^{10} \quad \dots\dots\dots(53)$$

هذه الايصاليه γ_a لاتشبه الايصاليه في المعادن واشباه الموصلات وانما تمثل الايصاليه المتناوبه التي هي مقياس للقدره المفقوده عند تسليط مجال متناوب عبر العازل وهي ليست مقياس لكميه الشحنات التي يمكن ان تنتقل خلال الماده من قطب لآخر، اي ان الايصاليه المتناوبه في العازل هي مقياس للحراره التي قد تتولد نتيجة دوران الدايبولات في مواضعها او اهتزاز الشحنات بتغير اتجاه المجال المتناوب، ولهذا فان γ_a تعتمد على التردد كذلك ايضا ε'' تتغير مع التردد، ويمكن اخذ الايصاليه الناتجه عن انتقال الشحنات بنظر الاعتبار في حالة التيار المستمر او عند الترددات الواطئه، وفي جميع الاحوال تعد الايصاليه مكونه من مركبتين:

$$\gamma = \gamma_{ac} + \gamma_{dc} \quad \dots\dots\dots(54)$$

حيث γ_{dc} الايصاليه الناشئه عن التيار المستمر وتكاد تكون لا تتغير مع التردد وهي واطئه جدا في المواد العازله، اما γ_{ac} فهي الايصاليه التي تعبر عن الفقد في العازل بسبب حركة الدايبولات بانواعها. ونلاحظ مما سبق ان السماحيه للعازل من

ϵ' ϵ''

اهم العوامل المؤثرة في السماحية المركبه وظل الفقدان

أ- التردد: تعتمد السماحية على حركة الشحنات و الدايبولات في العازل فتاثير هذه الحركة يؤدي الى تغير اتجاه المجال، وبسبب تناوب المجال الكهربائي المسلط فنه يؤدي الى تبدل اتجاه المجال، وهذا التناوب يؤدي الى تغير اتجاه الدايبولات. لذلك فان شدة تناوب المجال الكهربائي المتمثلة بتردد الفولتية المسلطه ينعكس تاثيره على مدى تاثير دايبولات المادة بهذا المدى من التردد، هذا يعني ان الاستقطاب الكهربائي سيتغير بتغير المجال وهذا يعتمد على نوعية استقطاب المادة (الالكترونية، الايونيه، الاتجاهيه). من الممكن بسهولة دراسة تاثير السماحية (ϵ' , ϵ'') مع التردد للانظمة المؤلفه من نوع واحد من الذرات وذلك من خلال دراسة تاثير المجال الكهربائي المتناوب على اهتزاز الشبيكه الاحادي ويمكن ايجاد العلاقة بين التردد W و (ϵ' , ϵ'') ورسم المخطط لها لمدى من الترددات والذي يعتمد على معاملات مختلفه تعتمد على التركيب الداخلي للنظام وخواصه العزليه. ولكن من الصعوبه تحديد العلاقة بين التردد وبين (ϵ' , ϵ'') للانظمة المؤلفه من انواع مختلفه من الجزيئات باتباع الطريقه اعلاه، ولكن من الممكن دراسة تاثير التردد على انواع الاستقطاب حيث تحدد بواسطة انواع الجزيئات داخل النموذج وترتكز الجزيئات لكل نوع من الاستقطابيه. فالحركه الاهتزازيه ترتبط بالاستقطاب الالكتروني والاستقطاب الايوني، والحركه الدورانيه ترتبط بدوران الدايبولات. وعند تسليط المجال الكهربائي ينتج الاستقطاب الالكتروني والايوني بسبب الفصل بين الشحنات الموجبه والسالبه وهذا الفصل يولد قوه تحاول ارجاع الشحنات الى وضعها المستقر، وعند زوال المجال الخارجي فان ترددا محدد يدعى بالتردد الطبيعي سيبقى ظاهرا على المنظومه المستقطبه، وان الاستقطاب يواكب تردد المجال (تستطيع الدايبولات الدوران مع التردد)، اما اذا كان التردد المؤثر للمجال عاليا جدا فان المنظومه لاتستطيع اللحاق او مواكبة تغير المجال، وفي حالة توافق تناوب المجال الكهربائي مع التردد الطبيعي للمنظومه يحصل ما يسمى بالامتصاص الرنيني (Resonance absorption) حيث تمتص المنظومه اقصى قدره ممكنه من المجال المسلط. وجد عمليا ان التردد الطبيعي للسحابه الالكترونية حول مركز الاستقطاب في الذره بمقدار (10^{16} rad/sec) الذي يقع في الجزء فوق البنفسجي من الطيف الكهرومغناطيسي، اما في النظام الايوني المكون من ايونات مستقطبه فان التردد الطبيعي بحدود (10^{14} rad/sec) ويقع في الجزء تحت الحمراء. ويمكن باستخدام نظام كهربائي مبسط مؤلف من (R-L-C) دراسة تغير الاستقطاب الالكترونية والايونيه مع التردد حيث التردد الرنيني لهذه الدائره هو:

$$W_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

وتعطي قيم (ϵ'', ϵ') بالعلاقات :

$$\epsilon' = \frac{q \left(\frac{W_0}{W} - \frac{W}{W_0} \right)}{1 + q^2 \left(\frac{W}{W_0} - \frac{W_0}{W} \right)^2} \dots\dots\dots(55)$$

$$\epsilon'' = \frac{1}{WC_0 R [1 + q^2 \left(\frac{W}{W_0} - \frac{W_0}{W} \right)^2]} \dots\dots\dots(56)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{q \left(\frac{W_0}{W} - \frac{W}{W_0} \right)} \dots\dots\dots(57)$$

حيث L : معامل الحث الذاتي للملف، C_0 : السعة في الفراغ، C السعة بوجود العازل وان $q = \frac{W_0 L}{R}$

اما اذا كانت هناك استقطابيه اتجاهيه (دورانيه) فيشار الى الاستقطاب بعملية الاسترخاء (Relaxation process) حيث تصطف الدايبولات باتجاه المجال الكهربائي المستمر وان هناك زمنا لكي تاخذ جميع الدايبولات وضعها الجديد وهذه العملية تسمى بالاسترخاء وكذلك في حالة زوال المجال الكهربائي. يبدو من هنا ان هناك حركه تعرقل حركه الدايبول، ويمكن توضيح عملية الاسترخاء من خلال شحن المتسعه وتفرغها، حيث تعتمد سرعة الشحن والتفريغ على مقدار المقاومه فكلما كانت المقاومه صغيره كان زمن الشحن والتفريغ اقصر. فمن خلال دائرة توالي المتسعه C والمقاومه R ، يمكن الوصول الى العلاقه بين التدد W و (ϵ'', ϵ') حيث تسمى العلاقات بمعادلات ديبياي (Debye equation) حيث:

$$\epsilon^*(W) = \epsilon_{(\infty)} + \int_0^{\infty} \alpha(t) e^{iWt} dt$$

$$\text{if } \alpha(t) = \alpha(0) e^{-t/\tau}$$

$$\therefore \epsilon^*(W) = \epsilon_{(\infty)} + \int_0^{\infty} \alpha(0) e^{(jW - 1/\tau)t} dt$$

$$= \epsilon_{(\infty)} + \frac{\alpha(0)}{\left(\frac{1}{\tau} - jW\right)}$$

$$\text{at } W = 0 \Rightarrow \epsilon^*(W) = \epsilon_{(S)}$$

$$\therefore \epsilon_{(S)} = \epsilon_{(\infty)} + \frac{\alpha(0)}{\frac{1}{\tau} - 0} \Rightarrow \epsilon_{(S)} = \epsilon_{(\infty)} + \tau \alpha(0)$$

$$\therefore \epsilon^*(W) = \epsilon_{(\infty)} + \frac{(\epsilon_{(S)} - \epsilon_{(\infty)}) / \tau}{\left(\frac{1}{\tau} - jW\right)}$$

$$\varepsilon^*(W) = \varepsilon_{(\infty)} + \frac{\varepsilon_{(s)} - \varepsilon_{(\infty)}}{1 - jW\tau} \quad \dots\dots\dots(58)$$

وبالمقرنه مع العلاقه (44) ($\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$) نحصل على:

$$\varepsilon'_{(W)} = \varepsilon_{(\infty)} + \frac{\varepsilon_{(s)} - \varepsilon_{(\infty)}}{1 + W^2\tau^2} \quad \dots\dots\dots(59)$$

$$\varepsilon''_{(W)} = (\varepsilon_{(s)} - \varepsilon_{(\infty)}) \frac{W\tau}{1 + W^2\tau^2} \quad \dots\dots\dots(60)$$

$$\tan \delta = \frac{(\varepsilon_{(s)} - \varepsilon_{(\infty)})W\tau}{\varepsilon_{(s)} + \varepsilon_{(\infty)}W^2\tau^2} \quad \dots\dots\dots(61)$$

حيث ان τ : يمثل زمن الاسترخاء (Relaxation time) وهو الزمن الازم لكي تصل فيه قيمة الاستقطاب الى $(1/e)$ من القيمه العظمى قبل تفريغ المتسعه من الشحنه.

اما المواد القطبيه والسوائل العازله فيمكن تحديد τ من حساب معامل الاحتكاك الداخلي (Internal fraction coefficient) ولزوجة الماده القطبيه، كذلك يمكن تحديده مباشرة من معرفة R و C حيث $(\tau = RC)$. يمكن رسم العلاقه بين $(W\tau)$ وبين $(\varepsilon'', \varepsilon')$ كما في الشكل ادناه، حيث نلاحظ منه ان زمن الاسترخاء يمثل الوقت المستغرق لوصول الداييولات الى حالة الاستقرار في وضع الاستقطاب، وكذلك يصف الوقت الذي تستغرقه الداييولات للرجوع الى وضعها الاول عند زوال المجال الكهربائي، ونلاحظ ايضا انه في حالة $(W\tau = 1)$ فان السماحيه ε' تتناقص بينما تصبح ε'' عند قيمتها القصوى.

ان تغير الاستقطاب الدوراني مع التردد يقع ما بين الترددات الواطنه جدا حتى الترددات الراديويه وترددات المايكرويف، ولما كانت كثير من التطبيقات الهندسيه وبالاخص في مجال الاتصالات والبث تقع ضمن هذا المدى من الترددات فان اختيار المواد العازله لهذا التطبيق يتطلب معرفة خواص العازل وتركيبه. ان الترددات $(W\tau = 1)$ الذي يحدث عنده تغير واضح في السماحيه يعتمد على حجم الجزيئات التي تتكون منها الداييولات وعلى كيفية حركة هذه الداييولات بفعل طاقتها الحركيه لدى غياب المجال الكهربائي. اما الماده التي تنشأ فيها الاستقطابات الثلاثه $(\alpha_d + \alpha_i + \alpha_e)$ تظهر فيها كل هذه الانواع عند الترددات الواطنه وتمثل الجزء (a) من الشكل ادناه، حيث تكون السماحيه $(\varepsilon' \approx \varepsilon_{(s)})$ ستاتيكيه مستقره، ويكاد ان يكون الفقد صفرا حيث يكون الفقدان ناشئا عن الايصاليه الستاتيكيه (γ_{dc}) فقط، وعند بلوغ التردد $(1/\tau)$ عند الموجات الراديويه والمايكرويه المشار اليها في الجزء

$$\alpha_i + \alpha_e)$$

$$\varepsilon''_r$$

$$W_{oi})$$

$$\alpha_i)$$

$$(\alpha_e)$$

ب- درجة الحرارة: درجة الحرارة لا تؤثر في عمليات الاستقطاب الالكتروني للعوازل غير القطبيه، والاستقطابيه الالكترونيه للجزيئات لا تعتمد على درجة الحرارة، وبسبب التمدد الحراري للماده فان النسبه بين عدد الجزيئات الى الطول الفعال (Λ) تتناقص عندما تتزايد درجة الحرارة، حيث في هذه الحاله تتناقص (ε) بزيادة درجة الحرارة وهذه الحاله تحدث لبعض المواد البولميريه والعضويه، اما تغير السماحيه مع درجة الحرارة للمواد العازله الصلبه الايونيه فان وجود الايونات وبسبب وجود الية الاستقطاب فان (ε) تتزايد مع تزايد درجة الحرارة. ولكن في بعض الحالات من الممكن (ε) تتناقص مع تزايد درجة الحرارة وخصوصا عندما تكون الازاحه الايونيه قليله جدا ومن الصعب فصل الايونات ونشوء الاستقطاب مثال ذلك TiO_2 و CaTiO_3 . وفي المواد القطبيه فان الدايبولات تجد الصعوبه في تدوير نفسها عند مدى درجات الحرارة المنخفضه، وعند زيادة درجة الحرارة فان دوران الدايبولات يصبح سهلا وهذا يزيد السماحيه. اما درجة ترتيب الدايبولات وبسبب الاهتزاز الحراري فانها سوف تقل عند زيادة درجة الحرارة، وهذه الحاله تعني ان $\varepsilon(T)$ ، ومن رسم منحنى (ε, T) فان (ε) من الممكن ان تتزايد مع درجة الحرارة الى ان تصل الى اعظم قيمه لها ثم تبدا بالتناقص بسبب الاهتزازات الحراريه وعدم الترتيب ولكن في مدى حراري عالي والتناقص يكون شديداً.

اما تغير الفقد (ε'') و ($\tan \delta$) مع درجة الحرارة، نلاحظ ان ($\tan \delta$) تعطي زياده عندما تزداد درجة الحرارة، هذه الزياده تاتي من حالة تناقص R_0 للعازل، ففي درجات الحرارة العاليه تكون هناك علاقته وثيقه بين متغيرات العازل ودرجة الحرارة. وتاتي الزياده في ($\tan \delta$) ايضا من الزياده في تيار التوصيل المار في العازل والتيار الممتص من العازل. ويحصل الفقدان العزلي بعد وصول الثنائيات

انهيار العزل الكهربائي Breakdown of dielectric

من اهم الصفات التي يجب ان تؤخذ بعين الاعتبار عند اختيار العازل هو مدى تحمل العازل للاجهاد الكهربائي دون ان ينهار، والانهيار يعني فقدان العازل خاصية العزل وتحوله الى موصل. وقد يسمى اقصى مجال كهربائي مطبق على العازل دون حصول الانهيار بمتانة العزل (Dielectric strength). تقاس متانة العازل بدلالة المجال الكهربائي (E_{br}) وهو يمثل المجال الذي ينهار عنده العازل فاذا كان سمك العازل (h) وفرق الجهد المسلط (V_{br}) الذي ينهار عنده العازل فان:

$$E_{br} = \frac{V_{br}}{h} \quad (\text{volt / m or kvolt / mm}) \quad \dots\dots\dots(62)$$

تعتمد متانة العزل على الكثير من العوامل، منها ما يتعلق بتركيب العازل مثل التركيب البلوري والعيوب والشوائب الموجودة فيها، وعوامل خارجيه مثل شكل الاقطاب التي تستخدم في تسليط المجال الكهربائي، وطبيعة الشكل الخارجي وظروف القياس من درجة حراره ورطوبه وتردد المصدر والفترة الزمنية عند تأثير الفولتية على العازل.

ان حدوث الانهيار يعني ظهور شحنات متحركة داخل المادة باستطاعتها الانتقال خلال المادة من طرف الى اخر ويكون مصدر هذه الشحنات اما من داخل المادة وذلك نتيجة تحركها من مستقراتها بفعل الطاقه المكتسبه نتيجة المجال الكهربائي المسلط او قد تكون ناتجه عن انتقال الشحنات من القطب المعدني الى داخل العازل وتمكنها من اجتيازه. في بداية تسليط الجهد العالي يكون عدد الشحنات قليلا والذي قد يتضاعف نتيجة انتقال الطاقه الى شحنات اخرى بفعل التصادم الحاصل بينهما. ومن العوامل التي قد تؤدي او تساعد على انهيار العازل هو ارتفاع درجة حرارة العازل بفعل مرور التيار الناتج عن حركة هذه الشحنات.

هناك ظواهر عده تحدث في العازل عند تأثير المجال الكهربائي مثل التوصيل الكهربائي، الاستقطاب، فقدان العزلي،... الخ، فزيادة الفولتية على العازل تؤدي الى زيادة تيار التسرب والتيار السعوي للفولتية المتناوبه، وعند الاستمرار بزيادة الفولتية المطبقة الى ان تصل الى اعظم قيمه لها في حالة انهيار العازل، عند هذه اللحظة يمر تيار التوصيل خلال العازل وبصوره متزايد، بعدها تبدا الفولتية بالتناقص بسبب تناقص مقاومة العازل، وهذه التوصيليه غالبا ماتمثل دائرة قصر بين اقطاب

هناك نوعان من الانهيار في العوازل الصلبه هما الانهيار الكهربائي و الانهيار الكهروحراري.

أ-الانهيار الكهربائي: يدعى في بعض الاحيان " جهد الانهيار الكهربائي النقي " لتمييزه من بين الانهيارات في العازل، ويتسبب هذا الانهيار من تاثير المجال الكهربائي فقط وتدمير العازل بواسطة القوى التي يؤثرها المجال الكهربائي. اما اذا كانت هناك تاثيرات اخرى على العازل مثل (الحراره والتاثيرات الكيمياويه) فانها تسهل من عملية الانهيار واحداث ثقب في العازل. في هذه الحالة لا نسمي الانهيار بالانهيار الكهربائي النقي. ان تطور الانهيار الكهربائي جاء حصيلة للتفاعل و التاثير المتبادل للجسيمات و الشحنات الحره (الكترونات و ايونات) المعجله بواسطة المجال الكهربائي مع الشحنات العازله لذلك فان نظرية الانهيار الكهربائي معقده جدا،ولهذا يدرس تاثير تركيب العازل على الانهيار بواسطة النتائج التجريبيه. وقد تكون النتائج النظرية اكبر من قيم التجارب بسبب وجود الشقوق الدقيقه (microcracks) ووجود العيوب في المواد حيث تؤثر على دقة القياسات العمليه.

طورت القاعده الاساسيه من الانهيار الكهربائي على اساس تزايد متانة العازل مع تزايد الطاقه للشبيكه البلوريه (طاقه الشبيكه هي الطاقه الازمه لفصل مول واحد من الشبيكه البلوريه في ماده الى ايونات منفرده وازالتها لمسافات لانهايه عن بعضها البعض (عند الصفر المطلق)) كذلك معاملات ماده لها علاقه بهذه الطاقه مثل نقطه الانصهار (درجة حرارة الانصهار)، الحراره النوعيه، الاتزان الكيمياوي، الصلاده، الخ...

الانهيار الكهربائي يتميز بالميزات الاتيه

- 1- الزمن القصير بتزايد الفولتيه (يصل في بعض الاحيان الى مايكروثانيه) ويحدث الانهيار حالا بعد تطبيق الفولتيه عندها يسمى الانهيار الكهربائي النقي.
- 2- الاعتماد الواطئ والقليل لجهد الانهيار (V_{br}) ومتانة العزل مع تردد الفولتيه وهذه الخاصيه ضروريه لمقارنة قيم الذروة للفولتيه المؤثره سواء كانت عبارة عن نبضات او فولتيه جيبيه.
- 3- الاعتماد القليل لمتانة العزل على درجة الحراره، في بعض الاحيان اعتماد (E_{br}) على درجة الحراره ياخذ اعتدالا لمدى من درجة الحراره.
- 4- عند تاثير مجال كهربائي منتظم على العازل فان اعتماد متانة العزل على ابعاد العازل واقطابه يكون قليلا.

ان التيار المار خلال العازل يولد مجالا مغناطيسيا بشكل نصف قطري يؤدي نشوء التأثير الكهروديناميكي والذي يقوم بكبس الايونات لتتحرك باتجاه بصف قطري ايضا، وتكتسب هذه الايونات مقدارا من الطاقة ويزداد هذا الضغط ومقدار الطاقة بزيادة جهد الفولتية المطبقة الى ان يصل الى اعظم انضغاط حيث يحصل عنده الانهيار.

ب- الانهيار الكهروحراري (Electothermal breakdown) :

ترتبط ظاهرة الانهيار الكهروحراري مباشرة بعملية فقدان في العازل على شكل حراره نتيجة وضع العازل تحت تاثير مجال كهربائي. ان تطور الانهيار الكهروحراري يحدث كما ياتي:

فولتية مطبقة على العازل تؤدي الى انطلاق الحراره من العازل نتيجة الفقد ويزداد الفقد بزيادة درجة الحراره، ثم يظهر تاثير الانصهار و الاحتراق والاختراق والتشق في العازل.

ان الفقدان النوعي تزداد شدته في النماذج غير المتجانسه عند تغيرات قليله في درجات الحراره.

افضل نظريه لاليه الانهيار الكهروحراري هي تلك المقدمه من قبل Semenov & Fok عند تاثير فولتية متناوبه على عازل كهربائي، وتم التوصل الى العلاقه الاتيه:

$$V_{br} = 382 \left[\frac{\lambda}{f \varepsilon'_i a \tan \delta_i} \right]^{1/2} \Phi(\beta h) \quad \dots\dots\dots (63)$$

حيث: V_{br} : فولتية الانهيار (القيمه المؤثره) (kV)

λ : معامل التوصيل الحراري للعازل (w/(m.k))

f : تردد الفولتية

ε'_i, δ_i : سماحية وزاوية الفقد عند درجة الحراره الابتدائيه قبل تطبيق

الفولتية على العازل.

a : المعامل الحراري (معامل التمدد الحراري) k^{-1}

h : سمك العازل

β : معامل يصف شرط استرجاع الحراره من العازل الى الوسط المحيط.

ويمكن حساب β من العلاقه:

$$\beta = \frac{\lambda_1 \sigma}{2\lambda(\lambda_1 + \sigma h_1)} \quad (m^{-1}) \quad \dots\dots\dots (64)$$

حيث λ_1 : معامل التوصيل الحراري لمادة الاقطاب

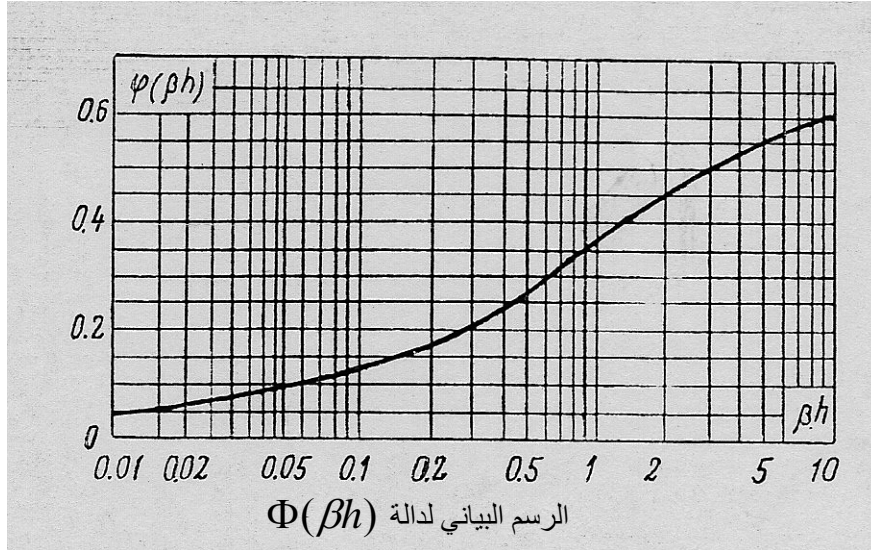
σ : معامل الانتقال الحراري من الاقطاب المعدنيه الى الوسط المحيط

(w/(m².k))

h_1 : سمك الاقطاب

اما الداله $\Phi(\beta h)$ فيمكن ايجاده من الشكل ادناه وعندما تكون ابعاد (βh) عاليه ومتزايد فان الداله $\Phi(\beta h)$ يمكن ان تساوي (0.662) تقريبا، واذا كانت الاقطاب رفيعة جدا فاننا نفرض ان $(h_1 \approx 0)$ في المعادله (64) بحيث يمكن الحصول على تعبير مبسط β حيث:

$$\beta = \frac{\sigma}{2\lambda} \quad \dots\dots\dots(65)$$



على الرغم من صعوبة تحقيق المعادله (63) عمليا لكثرة المعاملات التي يعتمد عليها الانهيار وتحتاج الى مواصفات خاصه بابعاد العازل واقطاب التوصيل المستخدمه، الا انها توضح مجموعة معاملات يعتمد عليها جهد الانهيار وكيفية التغير معها، فمثلا اعتماد V_{br} على التردد نحصل عليه بفرض كل المقادير ماعدى f في الطرف الايمن من العلاقه (63) هي ثوابت اي ان

$$V_{br} = \frac{A}{\sqrt{f}} \quad \dots\dots\dots(66)$$

حيث A ثابت

عندما تكون $(\beta h \rightarrow \infty)$ وكذلك $\Phi(\beta h) = 0.662$ فان V_{br} عندما h كبيره جدا تاخذ القيمه النهائيه العظمى اي ان:

$$V_{br \max} = 253 \left[\frac{\lambda}{f \epsilon'_i a \tan \delta_i} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots(67)$$

ان هذه العلاقه تحدد التردد ودرجة الحراره اللازمه لاستخدام العازل وعدم تجاوز القيمه النهائيه المضمونه للعمل، وعلى الرغم من ان افتراض h كبيره جدا هو غير عملي الا ان المعادله اعلاه يمكن الاستفاده منها في تقدير قيمة جهد الانهيار الاقصى للمواد، فاذا كان العازل منعزل بشكل كامل عن الوسط المحيط (العمليات الاديبياتيكيه

$$\Phi(\beta h) = 0, \beta h = 0, \beta = 0, \sigma = 0)$$

ان العلاقة (67) تكون دقيقة في تطبيقات العوازل التي تمتاز بمعاملات وظروف قياسيه خاصه: التردد العالي، التوصيليه الحراريه الواطئه للماده، حالة وجود الرطوبه والسلك العالي للعازل ودرجة الحراره العاليه والفترة الزمنيه للفولتيه المؤثره تكون طويله (حيث تساعد في تجميع الحراره على العازل) القيمه العليا $(\gamma_a, \varepsilon' \tan \delta)$ المتزايدة بشكل كبير مع درجة الحراره. هذا عكس الانهيار الكهربائي النقي الذي يحدث عندما تكون يكون تردد الفولتيه واطئا ودرجة الحراره وزمن تأثير الفولتيه واطئين و $(\gamma_a, \varepsilon' \tan \delta)$ صغير جدا ومتزايد ببطئ مع تزايد درجة الحراره.

خلاصة لاعلاه فان قياس الانهيار الكهروحراري للماده يعتمد في تقديره على:

- 1- تردد الفولتيه/ تتناقص المتانه الكهربائيه مع تزايد التردد.
- 2- الفترة الزمنيه خلال تأثير الفولتيه (معدل صعود وتزايد الفولتيه المؤثره) فاذا كانت الفترة الزمنيه قصيره فان العازل لا يحصل على الحراره الناشئه من الفقد العزلي والازمه للانهيار لذلك لا يحدث انثقاب كهروحراري في الماده.

ان رفع درجة حراره العازل تؤدي الى تغير السماحيه حسب العلاقة:

$$\varepsilon'_2 \tan \delta_2 = \varepsilon'_1 \tan \delta_1 \exp[a(T_2 - T_1)] \quad \dots\dots\dots(68)$$

حيث $\varepsilon'_1, \tan \delta_1$ سماحيه وظل الفقد عند درجه الحراره الابتدائيه (i) وهي T_1
 $\varepsilon'_2, \tan \delta_2$ سماحيه وظل الفقد عند درجه الحراره النهائيه (f) وهي T_2

واذا فرضنا ان التغير في ε' عند الدرجتين الحراريتين يكون طفيفا، بحيث:
 $\varepsilon'_2 \approx \varepsilon'_1$ لذلك:

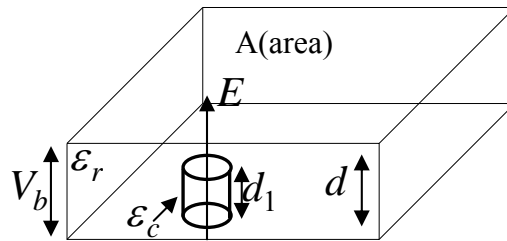
$$\tan \delta_2 = \tan \delta_1 \exp[a_1(T_2 - T_1)] \quad \dots\dots\dots(69)$$

ان شكل الثقوب والتكسرات التي تحدث في العازل نتيجة الانهيار تعتمد على طبيعة الماده وقدره ومصدر الطاقه الكهربائيه واليه نشوء الانهيار. قد يحدث الانتقاب قرب حافات العازل حيث يكون المجال الكهربائي اكثر تراصا هناك، وهو اكثر بروزا عند الانهيار الكهربائي ويسمى تأثير الحافه (Edge effect) ووجود العيوب في العازل تؤثر في بداية الانهيار ويمكن تقدير ذلك من خلال قياس ابعاد تلك العيوب وانواعها. لايمكن وصف الية الانهيار من خلال معامل ثابت تتغير معه وذلك لان شروط التجريب سوف تتغير اثناء القياس اذا المعاملات ستكون متداخله ومؤثره بعضها على بعض.

ان للرطوبة تأثير على المتانه الكهربائي للعازل المسترطب حيث يتناقص مقدار جهد الانهيار عند زيادة المحتوى الرطوبي. اما تغير فولتية الانهيار مع سمك العازل فانها ليست خطيه في معظم المنتجات السيراميكيه ولكنها متزايدة، كذلك المتانه العزليه فانها تتناقص بزيادة السمك (المتانه تقاس بوحدات فولت\متر) لذلك يفضل في قياس الانهيار الكهربائي ان يكون سمك العازل ذا ابعاد قليله لتقدير قيمة الانهيار بصوره دقيقه، ويمكن تفسير سبب التناقص عند الانهيار الكهروحراري بصعوبة استرجاع الحراره ولفضها من الوسط العازل الى المحيط مما يؤدي الى زيادة الفقدان العزلي وتناقص المتانه. كذلك لاقطاب التوصيل بين مصدر الجهد العالي والعازل تأثير، حيث زيادة مساحة الاقطاب (قياسا لابعاد العازل) تقلل من V_{br} وذلك لتزايد النقاط النافذه من العازل واحتمال حصول الانهيار في اضعف تلك النقاط.

كذلك فان العوازل البلوريه تتاثر من حيث الاتجاهات البلوريه مع الفولتية المسلطه ووجود العيوب البلوريه، وقوة الاواصر البلوريه، كلها تؤثر في تقدير متانه العازل.

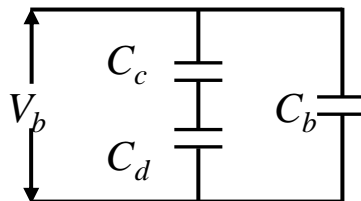
يؤثر وجود المسامات في المواد المساميه على قياس متانه مادة العازل لذلك يفضل دائما املاء هذه المسامات بغازات ذات متانه عزليه عاليه او سوائل تتميز بالعزل العالي وقدرة نفاذ الى المسامات، وهذه تظهر بشكل واضح في المواد السيراميكيه على وجه الخصوص.



نفرض ان المجال الكهربائي المؤثر على ماده هو E وان E_c المجال الكهربائي في الفجوه (المساميه) وان ϵ_r هي سماحية ماده ϵ_c هي سماحية الفجوه.

فاذا كان $\epsilon_c \approx 1$ فان متانه الانهيار للغاز هو $E_G (v/m)$.

انفرض ان الفجوه تمثل متسعه سعتها C_c والماده العازله C_d وان السعه الكليه هي محصلة المتسعتين وهي C_b كما في الشكل ادناه



لحساب الفولتية V_b على طرفي العازل نحسب اولاً سعة المادة وسعة الفجوة:

$$C_d = \frac{\epsilon_r A \epsilon_0}{(d - d_1)}, \quad C_c = \frac{A \epsilon_0}{d_1}$$

d : سمك المادة العازله الكلي

d_1 : سمك الفجوة

الفولتية سوف تتوزع على المادة والفجوة بنسب عكسيه مع السعه. فاذا كانت V_b هي فولتية المادة العازله فان فولتية الفجوة هي:

$$V_c = E_G d_1$$

$$\frac{V_c}{V_b} = \frac{C_d}{C_c + C_d} \Rightarrow V_c = \frac{C_d}{C_c + C_d} V_b$$

وعند التعويض عن C_c و C_d نحصل على

$$V_c = \frac{V_b}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{d_1} - 1 \right)}$$

$$\Rightarrow E_G d_1 = \frac{V_b}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{d_1} - 1 \right)}$$

$$\Rightarrow V_b = E_G d_1 \left(1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{d_1} - 1 \right) \right)$$

لقد وجد ان شدة المجال الكهربائي داخل المسامات المغلقه والكروييه المملؤه بالهواء هي:

$$E_c = E_G \approx \frac{3\epsilon'_r}{\epsilon'_c + 2\epsilon'_r} E \approx \frac{3E}{2} \quad (\text{if } \epsilon'_r \gg \epsilon'_c)$$

يحث E_c : متانة الفجوة الهوائيه الكروييه

ϵ'_r : سماحية المادة العازله

ϵ'_r : سماحية الفجوة

ايضا حالة التبدل في مواقع الالكترونات تؤثر على متانة العازل نتيجة تاثير المجال الخارجي، وشدة المجال داخل المسامات تعتمد على حجم تلك المسامات حيث تتزايد عندما تتناقص عندما تتناقص حجوم المسامات، اما في حالة المسامات المفتوحة فان التيار المنساب داخل النموذج يؤدي الى تاين تلك الغازات الموجوده داخل المسامات وقد حدث بسبب ذلك شقوق مجهرية في النماذج خصوصاً الهشه قد يؤدي الى حدوث كسر ميكانيكي في المادة، حيث القوى المتولده ما بين الايونات التي تتاين والمتشابهة في الشحنات والموجوده داخل المسامات تمتصها سطوح المسامات

الفصل الثاني

العوازل الحرارية Thermal Insulators

المقدمة: العزل الحراري هو استخدام مواد لها خواص عازله للحرارة بحيث تساعد في الحد من تسرب وانتقال الحرارة من خارج المنظومة الى داخلها او بالعكس.

ان اختيار ماده عازله معينه يستلزم معرفة خصائصها الحرارية وخصائصها الاخرى كامتصاص الماء وقابليتها للاحتراق وصلابتها..... .

التوصيلية الحرارية Thermal conductivity: يعتمد التوصيل الحراري على ظاهرة انتقال الطاقة من موقع الى اخر بسبب تهيج ذرات او جزيئات المادة نتيجة لتغير درجة حرارة الوسط. ويمكن تعريف التوصيلية الحرارية على انها كمية الحرارة المنتقلة خلال وحدة المساحة للمادة لوحدة السمك ولوحدة الفرق في درجة الحرارة على وجهي المادة في وحدة الزمن. ويمكن اعتبارها على انها القيمة النسبية لمقدار تشتت الحرارة.

تتم عملية التوصيل الحراري باربعة اليات: الاشعاع والحمل والشبيكة (الفونون) و توصيلية الالكترونات. وتتم التوصيلية في المواد الصلبة بتوصيل الفونون (phonon) والفوتون (photon) والالكترونات (electron) فاذا كانت الحرارة النوعية والسرعة ومتوسط المسار الحر للانواع الثلاثة هي (C_1, C_2, C_3) و (V_1, V_2, V_3) و (τ_1, τ_2, τ_3) على التوالي فان التوصيلية الحرارية للمادة الصلبة تعطى بالعلاقة:

$$k = \frac{1}{3}(C_1V_1\tau_1 + C_2V_2\tau_2 + C_3V_3\tau_3) \quad \dots\dots\dots(1)$$

في المواد الصلبة التي تحتوي على اواصر ايونية Ionic bonds او اواصر تساهمية Covalent bonds لذلك فان التوصيلية الحرارية تتاثر بصورة رئيسية بانتقال الفونون من خلال اهتزاز الشبيكة لان الفونون هو كم من طاقة اهتزاز الشبيكة البلورية.

ان معدل عدد الفوتونات يزداد بزيادة درجة الحرارة وبذلك تزداد توصيلية الفوتون بالاشعاع.

اما توصيلية الالكترونات في المواد ذات المقاومة النوعية الواطئه فانها تساهم في زيادة التوصيلية الحرارية. اما المواد ذات المقاومة النوعية العاليه فان توصيلية الالكترونات تهمل في هذه الحالة. لذلك فان التوصيلية الحرارية في المواد العازله كهربائيا يتم بالفونون الذي يعد الناقل الوحيد للطاقة الحرارية في درجات الحرارة الواطئه.

إذا كان الانحدار الحراري باتجاه المحور (X) هو (dT/dX) خلال وسط مادي باتجاه (X) فقط فان التدفق الحراري باتجاه (X) الناتج عن الفرق في درجات الحرارة خلال مساحه المقطع العمودي لانسياب الحرارة (A) يعطى بالعلاقة:

$$Q = -kA \frac{dT}{dX} \dots\dots\dots(2)$$

ان العلاقة اعلاه تمثل المعادله الاساسيه للتوصيل الحراري والتي تعرف بمعادلة فورير, حيث (k) ثابت التناسب ويسمى معامل التوصيل الحراري (thermal conductivity).

العوامل المؤثره فى التوصيل الحراري

- 1- التركيب الكيميائي للماده Chemical composition
- 2- المعامله الحراريه السابقه للماده Heat treatment
- 3- الحالة الفيزيائويه للماده والطور Physical condition and phases
- 4- مسامية الماده وحجوم وتوزيع المسامات Porosity and size of pore and distribution
- 5- درجة الحرارة عند فحص الماده Temperature test

التركيب الكيميائي المواد ذات التركيب المعقد تميل بشدة الى الاستطاره الحراريه للموجات المتولده من الاهتزاز الشبيكي والتي تؤدي الى توصيليه حراريه. كذلك فان متوسط المسار الحر للفونون في درجات الحرارة العاليه يميل الى الاقتراب من ابعاد الشبيكه في التركيب المعقد. وكلما كان التناظر البلوري كبير كان الاهتزاز توافقيا اي ان الماده موصل جيد للحراره (رديء العزل الحراري) بينما تكون التوصيليه رديئه في المواد الغير منتظمه او غير متناظره او تحتوي على اواصر مختلفه. لذلك فان الشكل الهندسي مهم جدا في تحديد متوسط مسار الحر للفونون حيث يحدد مقدار الاستطاره بالحدود البلوريه. وهذا يعني ان التوصيليه الحراريه تكون اعظم ما يمكن للتركيب البسيط حيث تقل الاستطاره الحراريه للفونونات.

المعامله الحراريه ان المعامله الحراريه تؤثر على الاطوار المتكونه في الماده والبنيه المجهرية حيث تزداد الكثافة وتقليل المساحه السطحيه للبنيه التركيبية.

يمكن اعتبار تأثير البنية والمسامية للمادة عامل مؤثر أساسي على التوصيلية الحرارية الذي يعود الى علاقه بين كمية المادة الصلبه والفجوات الهوائية بداخلها التي تعيق انتقال الحرارة خلال مرورها بالجسم الصلب. ويكون الهواء هو عازل افضل بكثير من اي ماده صلبه فانه كلما كانت نسبة الفجوات الهوائية داخل المادة عاليه كان عامل العزل الحراري عالي للماده. لذلك فان المواد التي لها تركيب بلوري دقيق جدا او بنيه متراسه فان لها توصيليه اعلى بشكل كبير من البنيه البلوريه المفتوحه او ذات التركيب البلوري الواسع. اما درجة حرارة الفحص فانها تؤثر على التوصيلية الحرارية للمواد بسبب زيادة اهتزازات الشبيكه وبالتالي زيادة الفونونات المتولده.

انتقال الحرارة في الوسط المسامي تشمل عملية الانتقال في الوسط المسامي انتقال الطاقه الحراريه وانتقال الكتله في الوسط المسامي.

تعتمد التوصيلية للمواد الصلبه على الكثافة لذلك فان المواد التي لها مسامات هي اقل توصيلية للحراره. حيث تنتقل الحراره بطريقه الاشعاع خلال المسامات لان طاقة الاشعاع تتناسب مع الفرق في درجة الحراره بين سطوح المساميه وحجم المساميه لذلك فان المسامات الكبيره تؤدي الى زيادة التوصيلية في درجات الحراره العاليه ولكن المسامات الصغيره تعتبر حاجز جيد لانتقال الحراره.

وعليه فان العوامل المهمه المؤثره في العزل الحراري هي:
1- درجة الحراره 2- حجم المسامات 3- شكل المسامات 4- موقع المسامات من بعضها البعض وفي داخل الجسم الصلب.
كذلك المسامات المفتوحه تؤثر اكثر من المسامات المغلقه لان المسامات المفتوحه تسمح بانتقال الغازات الساخنه حيث تزداد التوصيليه الحراريه. وكما مبين في الشكل ادناه تغير التوصيليه مع تغير المساميه.

ان الرسم اعلاه يوضح تاثير الكسر الحجمي للمسامات الموجوده في ماده وتاثيره على التوصيليه الحراريه حيث زياده الكسر الحجمي يقلل التوصيليه وبنفس النسب للكسر الحجمي لحبيبات ماده.

يمكن ايجاد التوصيليه الحراريه الكليه للصلب والمسامات من العلاقه:

$$k_t = v_s k_s + v_p k_p \quad \dots\dots\dots(3)$$

k_t التوصيليه الحراريه الكليه ، k_s التوصيليه الحراريه للطور الصلب
 k_p التوصيليه الحراريه للطور المسامي ، v_s الكسر الحجمي للطور الصلب
 v_p الكسر الحجمي للطور المسامي.

بالاضافه الى انخفاض معامل التوصيل الحراري فان البعض منها يتميز بخواص ميكانيكيه جيده وقدره عاليه على التحمل ويمكن استخدامها في دعم وتحمل المنظومات الموضوعه فيها اضافة الى العزل الحراري.

اما تاثير وجود الماء بصوره رطبه او سائله في ماده العازله فانه يقلل من قيمه العزل الحراري للماده وقد يساهم في اتلاف ماده بصوره سريعه. وتاثير الرطوبه على ماده العازله حراريا يعتمد على خواص تلك ماده من حيث قدرتها على الامتصاص والنفاذيه.

بعض المواد العازله للحراره قد تستخدم لتحقيق المتطلبات الصوتيه مثل امتصاص الصوت او تشتيته و امتصاص الاهتزازات. لذا فان معرفه الخواص الرتبطه بهذا الجانب قد يحقق هدفين بوسيله واحده نتيجته لاستخدام تلك المواد وهما العزل الحراري والعزل الصوتي.

اضافه الى ماسبق من خواص فان هناك خواص اخرى قد تكون ضروريه عند اختيار ماده العازله المناسبه كمعرفه الكثافه والقدره على مقاومه الانكماش وامكانية الاستعمال لمرات عديده، وسهولة الاستعمال، انتظام الابعاد ومقاومة التفاعلات الكيميائيه والمقاسات المتوفره بالاضافه الى العامل الاقتصادي الذي يلعب دورا هاما في استخدام او عدم استخدام تلك المواد العازله.

- من اهم العوامل التي تؤثر على اختيار مواد العزل الحراري المناسبه مايلي:
- 1- ان تكون ماده العازله ذات مقاومه توصيل حراري منخفض.
 - 2- ان تكون على درجه عاليه من المقاومه لنفاذ الماء والاشعاع.
 - 3- ان تكون على درجه عاليه في مقاومتها لامتصاص بخار الماء.
 - 4- ان تكون على درجه عاليه في مقاومتها للاجهادات الناتجه عن الفروقات الكبيره في درجات الحراره.
 - 5- ان تكون ذات خواص ميكانيكيه جيده كارتفاع مقاومه الانضغاط ومقاومه الكسر.

- 6- ان تكون مقاومه للبكتريا والعفن والحريق خاصه في الاماكن المعرضه للحرق.
- 7- ان تكون ثابتة الابعاد على المدى الطويل وقليلة القابليه للتمدد او التقلص.
- 8- ان تكون مقاومه للتفاعلات والتغيرات الكيمياويه.
- 9- الاليتج عنها اي اضرار صحيه.
- 10- ان تكون مطابقه للمواصفات العالمي.
- 11- سهلة التركيب.

تصنيف مواد العزل الحراري: يمكن تصنيف المواد العازله حراريا حسب مصادرها وكما يلي:

- 1- المواد العازله من اصل حيواني: مثل صوف وشعر الحيوانات ويعتبر استخدامها كماده عازله حراريا ذات كفاءه محدوده.
- 2- المواد العازله من اصل جمادي: كالصوف الزجاجي وهو من افضل مواد العزل الحراري
- 3- المواد العزله الصناعيه: تشمل المطاط والبلاستيك الرغوي والاخير هو الاكثر شيوعا واكثر ما يستخدم هو نوع البولي ستايرين والبولي يورثين الرغوي.
- 4- المواد العازله من اصل نباتي: وتشمل الالياف او المواد السيلوزيه مثل القصب والقطن.
- 5- العوازل السيراميكيه: تعتبر الاطيان من افضل المواد العازله السيراميكيه.

بعض انواع المواد العازله حراريا:

- 1- سليكات الكالسيوم Calcium silicate: عباره عن ماده مكونه من الزجاج والسليكا حيث تضاف الى ماده الاسبست (asbestos) العازل حراريا لغرض تحسين الخواص الميكانيكيه وتستخدم في العزل الحراري لدرجات حراريه عاليه.
- 2- الياف السيراميك Ceramic fiber: يعتبر من العوازل الحراريه الجيده حيث يتميز بالاستقرار العزلي مع ارتفاع درجة الحراره
- 3- الفلين Cork: ماده واسعه الانتشار من الناحيه التجاريه (رخيصه الثمن) ولكن محدوده الاستخدام في درجات حراره واطئه. ويستخدم كماده مائه وعازله لانابيب واجهزة التبريد. وكذلك يستعمل لعزل السطوح في المباني.
- 4- اللباد Fell: يوجد على شكل لفائف طويله وباسماك مختلفه، واغلب اللباد مغلف بالورق او برقائق معدنيه مزوده باطار من الجوانب لمسك الجوانب، ويمكن ان تكون الرقيقه المعدنيه على وجه واحد من تلك اللفائف، كما يكون احد الاوجه مغلفا

وغالبا مايصنع اللباد من مواد عضويه تشتمل على الياف الزجاج. وكذلك يمكن توفر الياف السليلوز على هيئة اللباد.

5- الصوف الصخري: يتم صناعة الصوف الصخري من الصخور الطبيعيه كما يمكن صناعة الصوف الصخري من خبث الحديد او النحاس او الرصاص، ويتم صهر الخبث باستخدام الفحم كوقود، ويغزل في الياف بصب ماده المنصهره في وعاء دوار. وتجفف الالياف بواسطه البخار وتبرد بسرعه لدرجة حرارة الغرفه. والمواد العازله المصنوعه من الصوف الصخري (الخبث) ليس لها مرونة الجسم المصنوع من الزجاج. ويتم رش تلك الالياف مع ماده صمغيه من الفينينيل التي تعمل كرابط وتظغط، ثم يتم معالجتها بتمريرها في فرن، ويتم تقطيع الشرائح الناتجه بالحجم المناسب.

6- البرلايت: وهو نوع من الصخور البركانيه (ماده سيراميكيه) الشفافه، تحتوي على السليكا والالومينا واكاسيد اخرى. وتحتوي خامات البرلايت على ماء التبلور حيث تحرق بدرجات حراريه مفاجئه وسريعه فيتبخر ماء التبلور داخلها ويتضاعف حجمها من 4-20 مره قدر حجمها الاصلي.

يمتاز البرلايت بخواص عزل حراري جيد ومن المواد الطارده للمياه والمقاومه للرطوبه. يمكن خلط البرلايت مع السمنت ليعطي خرسانه خفيفه وعازله. ويمكن استخدامه في حفظ وتخزين الغازات السائله مثل الاوكسجين عند درجات حراره منخفضه قد تصل الى (-240°C) وهو ايضا من العوازل الصوتيه الممتازه ويتحمل درجات حراره لغايه (900°C).