

المواد العازلة

المرحلة الرابعة
فرع علم المواد
قسم العلوم التطبيقية

مدرس المادة
د. مفيد عبد اللطيف جليل

الفصل الاول

العوازل الكهربائية Electrical Insulators

المقدمة: تختلف المواد العازلة عن المواد الموصلة في كونها لا تمتلك الالكترونات حرة الحركة تناسب داخل المادة تحت تاثير المجال الخارجي ومن الامثلة على هذه المواد الزجاج و السيراميك و البوايومرات والورق والشمع

المجال الكهربائي يؤثر في ايونات او ذرات المواد العازلة التي هي عبارة عن شحنات سالبة و شحنات موجبه حيث يحدث اختلالا في حالة توازن الشحنات وتبتعد الشحنات الموجبه باتجاه المجال الكهربائي بينما تزاح الشحنات السالبة بالاتجاه المعاكس مكونه ثنائي قطب كهربائي وهذه الازاحه هي صغيره جدا قياسا الى الابعاد الذريه للماده حيث انها لا تزيد 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

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

\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

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

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

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

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

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 R_o هي المقاومه النوعيه للعازل ($\Omega.m$)

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

Electrical Displacement \vec{D} 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

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

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

$$\therefore C = \epsilon \frac{S}{h} \quad \dots\dots\dots (5)$$

وتمثل علاقه المتسعه بدلاله الابعاد

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

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

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

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

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

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

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

ومن اعلاه نلاحظ ان السعة 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_o تهبط الى قيمه (E_o/ϵ_r) ، فاذا كان المجال المسلط بين اللوحين بوجود الفراغ والمجال المعاكس الناشء داخل العازل E_b فان المجال الخارجي بعد وضع العازل يكون:

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

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 والسعة) حيث اذا تساوت مساحة مقطع العازل مع مساحة لوح المتسعه اي ان العازل يملئ جميع المتسعه فانه في الحالات الكهروستاتيكيه نحصل على:

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

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

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

3- الاستقطاب Electric polarization

تسمى العوازل التي لا تمتلك شحنات طليقة بالعوازل المثالية (Identical dielectric) ولكن جميع الاوساط المادية تتكون من جزيئات وهذه تتألف من جسيمات مشحونة (نوى الذرات او الالكترونات) و الجسيمات تتأثر بالمجال الكهربائي لانه يسلط قوة على هذه الجسيمات المشحونة 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 بالدايپول (او ثنائي القطب) وبالتالي يتولد عزم دايپول 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 دايپول 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 الدايپول باتجاه شدة المجال الكهربائي وهذا المجال يزيد من قيمة عزم الدايپول وتدعى الجزيئه القطبيه بالدايپول 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 مرنة 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 الدايپولات المتولده نتيجة لوجود مجال كهربائي وبالتالي سيتكون فيض من الشحنات في الطبقتين السطحييتين الرقيقتين وهي تمثل الشحنات السطحيه المحتثه السالبه التي تتضمنها الطبقة الاخرى. وهذه الشحنات غير حرة، ولكن كل منها مرتبط بذره تقع داخل او قرب السطح.

فاذا فرضنا ان كثافة الشحنات السطحيه المقيدة σ_b (Bound charge) تأتي 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:

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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:

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

حيث σ_t كثافة جميع الشحنات

σ_f كثافة الشحنات الطليقه

σ_b كثافة الشحنات المقيدة

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

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

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

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

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

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 نتيجته تاثير المجال الخارجي، يمكن حساب الاستقطابية الناشئه عنها من العلاقه:

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

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:

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

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 تاثير 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 تاثير الاستقطاب الالكتروني فقط لذلك فان المعادله اعلاه في الترددات العاليه تصبح:

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

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:

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

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

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

إذا المعادله (18) تصبح:

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

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

و من المعادله (16) لدينا:

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

بمساواة المعادلتين نحصل على:

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

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

العلاقه (20) تحدد العلاقه بين المجال الخارجي المسلط \vec{E} و المجال الداخلي \vec{E}_i الذي يسمى مجال لورنز. 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 الاتيه:

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

نتيجه لفصل الذي يحدث بين مركزي ثقل الشحنات السالبه والموجبه عند تكوين الجزيئه ينشأ عنها داييولات دائميّه، مثال ذلك بلورات (NaCl) القطبيّه. والاستقطابيه التي تنشأ نتيجة هذا الفصل سواء كانت الداييولات 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 الداييول حول محور التناظر حيث تترتب الداييولات باتجاه المجال المسلط، يسمى هذا النوع بالاستقطاب الاتجاهي او الدوراني (Orientational polarization). ان هذه الحركه او التارجح للمواد التي تتميز بالداييولات الدائميّه تكون مستمره ومتنقله 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 اضافته 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 الواطئه جدا دون الموجات السعويه بالاعتماد على نوع العيوب وفقدان التجانس الذي يسبب الاستقطاب البيني.

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

ففي الترددات الواطئه تصبح معادله كلوزيوس- موستي كما يلي:

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

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
عندما تكون $E = 0$ فإن $\vec{P}(0) \neq 0$ ، 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
الصف (1) بالاضافه 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 hysteresis) 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 بصورة 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: $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- Potassium dihydrogen Phosphate: KH_2PO_4
- Lead Zirconate-titanate: $\text{Pb}[\text{ZrO}_3, \text{TiO}_3]$

ب- تمتاز المواد الفيروكهربائية بسماحيه عاليه جدا (وجدت في السنوات الاخيره 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 الفيزيائيه تتغير مع درجة الحراره، وتوصف خصائص الماده من خلال تحديد نقاط الانتقال او مايسمى بنقاط كوري (Curie Point) حيث مقدار السماحيه عند اقصاها وفقدان الخصائص الفيروكهربائيه يحصل عندما تكون درجة حراره الماده اعلى من درجة حرارة 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 حرارة كوري تمتد لمناطق حراريه عاليه اكثر من (200°C) واقل ما يمكن (100°C) وتعتمد درجة حرارة كوري على مدى نقلوة الماده. وفي المدى الاكبر من درجة حرارة كوري تمتاز الماده 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 $((\alpha_e + \alpha_i) >> \alpha_d)$

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

الخواص البيزوكهربائية لاي مادة تحسب من ثابت البيزوكهربائية حيث يمثل النسبة بين مقدار الشحنة المتولده الى القوى الميكانيكية المطلقة على طول المحور البلوري. ويمثل هذا الثابت بالنسبة للكوارتز (2.2 PC/N) وهذا يعني تولد شحنات اضافيه نتيجة تاثير الاجهادات الميكانيكية ستضاف الى الشحنات المقيدة المتولده نتيجة الاستقطاب من المجال الخارجي.

السماحية لخليط من مواد متعددة الاطوار:

في احيان كثيره تستخدم مواد سراميكية 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 السماحية العزليه عند الترددات المنخفضه للمجال الكهربائي، حيث ينشا استقطاب السطوح البينية (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 البينية المستقطبه بشكل كبير، عندها يحدث تزايد في فقدان الطاقة. كذلك في حالة المواد متعددة الاطوار يمكن قياس القيمه المحصله للسماحية عند ثبات التردد ودرجة الحراره، على اساس قياس السماحية العزليه لاطوار وتوزيعات تبادليه مختلفه. فعندما يحصل الطور في الطبقات الموازيه او العاموديه على اتجاه المجال الكهربائي المسلط فان حصيلة السماحية 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. $\varepsilon'_1, \varepsilon'_2, \dots, \varepsilon'_q$ تعني سماحية الاجزاء الحقيقيه المنفصله اما V_1, V_2, \dots, V_q تعني كسور الحجوم لهذه الاطوار.

ويمكن تعميم العلاقتين اعلاه فنحصل على:

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

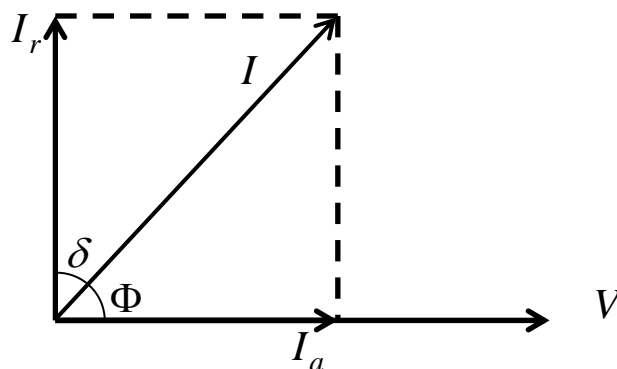
ويمكن استخدام العلاقه اعلاه في تقدير السماحية لانظمة متعددة الاطوار من معرفة سماحية كل نظام.

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 الماده 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، والاخر 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 Q (Quality factor) 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 الضائع في العزل P_w لمتسعه سعتها C من منحنى مخطط الطور اي ان:

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

$$\therefore I_r = VWC$$

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

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

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 بصورة 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:

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

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

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

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

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:

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

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

(توازي)

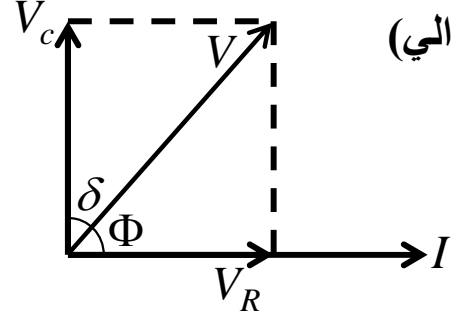
ومن حالة ربط التوالي:

$$\tan \delta = \frac{V_R}{V_c}; \sin \delta = \frac{V_R}{V}; \cos \delta = \frac{V_c}{V} \quad \text{(توالي)}$$

$$\Rightarrow I = V_c W C_s \Rightarrow V_c = \frac{I}{W C_s}$$

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

$$\therefore \tan \delta = \frac{I R_s}{\frac{I}{W C_s}} = W C_s R_s \quad \dots\dots\dots(37)$$



ومن ربط التوالي ايضا نحصل على:

$$P = I V_R = V_c W C_s V_R$$

$$P = V \cos \delta W C_s V \sin \delta = V^2 W C_s \sin \delta \cos \delta$$

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

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

$$\therefore V^2 W C_p \tan \delta = V^2 W C_s \frac{\tan \delta}{1 + \tan^2 \delta}$$

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

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

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

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

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

اما اذا كان الفقد كبير فان السعة (وكذلك السماحيه اذا قيست من السعه) تصبح مقادير غير محدده 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:

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

السماحيه المركبه

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

$$I = jWCV$$
(42)

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

$$I = jW \frac{\epsilon_o \epsilon_r S}{h} V$$
(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:

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

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

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

$$I_r = W \epsilon_o \epsilon'' \frac{S}{h} V$$
(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:

$$I = I_a + jI_r = \frac{V}{R_p} + jWC_p V$$
(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 المتسعة تبدد قدره مقدارها (VI_a) وكلما اقتربت المتسعة من حاله المثاليه فان قدره المفقوده تتضائل حيث تقترب ε'' من الصفر وكذلك الزاويه δ . يعبر عن الفقدان في قدره 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 فى 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 (الالكترونيه، الايونيه، الاتجاهيه). من الممكن بسهولة دراسة تاثير السماحية (ϵ' , ϵ'') مع التردد للانظمه المؤلفه من نوع واحد من الذرات وذلك من خلال دراسة تاثير المجال الكهربائي المتناوب على اهتزاز الشبيكه الاحادي ويمكن ايجاد العلاقه 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 العلاقه بين التردد وبين (ϵ' , ϵ'') للانظمه المؤلفه من انواع مختلفه من الجزيئات باتباع الطريقه اعلاه، ولكن من الممكن دراسة تاثير التردد على انواع الاستقطاب حيث تحدد بواسطه 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 محددا 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 الالكترونيه 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 الالكترونيه والايونيه مع التردد حيث التردد الرنيني لهذه الدائره هو:

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

وتعطى قيم (ϵ'', ϵ') بالعلاقات :

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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 الواطئه 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 حركه 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 الواطئه 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 تبدأ 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 تأتي من حالة تناقص R_0 للعازل، ففي درجات الحرارة العاليه تكون هناك علاقته وثيقه بين متغيرات العازل ودرجة الحرارة. وتأتي الزياده في ($\tan \delta$) ايضا من الزياده في تيار التوصيل المار في العازل والتيار الممتص من العازل. ويحصل الفقدان العزلي بعد وصول الثنائيات

$$(\tan \delta) \quad (\varepsilon'')$$

اما الفقدان بسبب التوصيليه فانه يزداد بزيادة درجة الحراره نتيجة تناقص المقاومه النوعيه بسبب تزايد الالكترونات الطليقه.

ج- الرطوبه: هناك الكثير من العوازل التي تستخدم في التطبيقات تعمل على امتصاص الرطوبه من الجو (Hygroscopic dielectrics) وتسمى هذه المواد بنافذة الرطوبه (Moisture permeable) والتي لها قدره على السماح بنفوذ الرطوبه من خلالها. ان عملية النفوذ لها تاثير كبير على خواص العازل العامه (الفيزيائيه والميكانيكيه) لذلك يجب اخذ هذه العمليات بنظر الاعتبار، اذ ستكون العوازل في تماس مع المحيط اثناء الاستخدام.

ان الخواص العزليه الكهربائيه تتاثر بشكل واضح ليس فقط من خلال المقدار الكمي للمحتوى الرطوبي الممتص في ماده ولكن كذلك من خلال انتشار هذا المحتوى وتوزيعه داخل الماده. توصف قابليه تبلل العوازل بواسطة زاوية التبلل (β wetting angle) لقطرة الماء الواقعه على سطح الماده العازله، ففي حالة السطوح الغير متبلله (Non wettable surfaces) عندما $\beta > 90^\circ$ والسطوح المتبلله فان $\beta < 90^\circ$ كما موضح في الشكل ادناه. يقدر التبلل من النسبه بين قوة الجذب لجزيئات الماء ككل الى قوة جذب جزيئه واحده من الجزيئات الموجوده على الطبقة السطحيه الخارجيه للماده، او يقدر من قوى تماسك جزيئات الماء (cohesive force) وقوى تلاصق الجزيئات مع العازل (adhesive force)، فاذا كانت قوة التلاصق اكبر من قوة التماسك فان الماء يبيلل العازل واذا كان العكس فان جزيئات الماء تميل الى ان تكون على شكل قطرات منفصله (سطح غير مبتل).

ان العوازل التي لا تتاثر بالرطوبه (غير مبتله) تكون اكثر استخداما وذلك لاحتفاظها بخواصها العزليه عند تغير الظروف المناخيه، وتستخدم مواد غير مبتله في طلاء السطوح الخارجيه للمواد الاكثر ابتلالا وقد تستخدم مركبات السليكون العضوي (Organosilicon compounds) لطلاء العوازل مثل العوازل السيراميكيه وتسمى هذه العمليه بنفور الماء (Hydrophobization). على العموم فان الزاويه β تتناقص بزيادة درجة حرارة المحيط لمعظم المواد، كذلك فان للظروف المناخيه والعوامل المحيطه بالعازل اثناء الاستخدام تاثيرا كبيرا على

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 منطبق 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 الطاقة المكتسبه نتيجة المجال الكهربائي المسلط او قد تكون ناتجة 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 الطاقة 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، الفدان 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 تبدأ الفولتية بالتناقص بسبب تناقص مقاومة العازل، وهذه التوصيلية غالبا ماتمثل دائرة قصر بين اقطاب

هناك نوعان من الانهيار في العوازل الصلبه هما انهيار 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 تأثير المجال الكهربائي فقط وتدمير العازل بواسطة القوى التي يؤثرها المجال الكهربائي. اما اذا كانت هناك تأثيرات اخرى على العازل مثل (الحراره والتاثيرات الكيماويه) فانها تسهل من عملية انهيار واحداث ثقب في العازل. في هذه الحالة لا نسمي الانهيار بالانهيار الكهربائي النقي. ان تطور الانعيار الكهربائي جاء حصيلة للتفاعل و التأثير المتبادل للجسيمات و الشحنات الحره (الكترونات و ايونات) المعجله بواسطة المجال الكهربائي مع الشحنات العازله لذلك فان نظرية الانهيار الكهربائي معقده جدا،ولهذا يدرس تأثير تركيب العازل على الانهيار بواسطة النتائج التجريبيه. وقد تكون النتائج النضريه 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 متانه العازل مع تزايد الطاقه للشبكيه البلوريه (طاقه الشبكيه هي الطاقه اللازمه لفصل مول واحد من الشبكيه 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 الكيماوي، 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}) ومتانه العزل مع تردد الفولتيه وهذه الخاصيه ضروريه لمقارنه قيم الذروة للفولتيه المؤثره سواء كانت عبارة عن نبضات او فولتيه جيبيه.
- 3- الاعتماد القليل على درجة الحراره، في بعض الاحيان اعتماد (E_{br}) على درجة الحراره ياخذ اعتدالا لمدى من درجة الحراره.
- 4- عند تأثير مجال كهربائي منتظم على العازل فان اعتماد متانه 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 نصف قطري ايضا، وتكتسب هذه الايونات مقدارا من الطاقه ويزداد هذا الضغط ومقدار الطاقه بزيادة جهد الفولتية المطبقة الى ان يصل الى اعظم انضغاط حيث يحصل عنده الانهيار.