



บทที่ 2

ทฤษฎีไดอิเล็กทริกและสารประกอบเฟอร์โรอิเล็กทริก

ในบทนี้เป็นการทบทวนความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีที่ใช้อธิบายคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้งานเป็นฉนวนภายในตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบาง อันประกอบด้วยทฤษฎีของสารไดอิเล็กทริกซึ่งอธิบายคุณสมบัติต่างๆ เช่น การสูญเสียของไดอิเล็กทริก (Dielectric loss, D) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับการโพลาไรซ์ การพังทลายของไดอิเล็กทริก (Dielectric breakdown) และทฤษฎีของวัสดุที่เป็นฉนวนอันประกอบด้วยไดอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) และ พาราอิเล็กทริก (Paraelectric)

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสารไดอิเล็กทริก

คุณสมบัติของสารไดอิเล็กทริกของวัสดุเกิดจากคุณสมบัติการไม่นำไฟฟ้าภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ การตอบสนองทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกเกิดจากการเคลื่อนที่ในระยะสั้นๆ ของประจุ (นำไฟฟ้า) ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ การเคลื่อนที่ของประจุเป็นผลให้เกิดการสะสมพลังงานไฟฟ้าและเกิดการสะสมประจุของวัสดุไดอิเล็กทริก เพราะฉะนั้นในการทดสอบพฤติกรรมของสารไดอิเล็กทริกเราจะพิจารณาจากขนาดของความจุไฟฟ้า (Capacitance) โดยความจุไฟฟ้าคือ การวัดความสามารถในการเก็บประจุของแผ่นตัวนำไฟฟ้าคู่ขนาน ที่อยู่ใกล้กันที่เก็บประจุ Q โดยเมื่อมีความต่างศักย์ที่ตกคร่อมแผ่นตัวนำซึ่งเราสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าหรือค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance) ได้ตามสมการ $C = \frac{Q}{V}$ โดย Q คือ ประจุในหน่วยคูลอมบ์ และ V คือ ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมแผ่นตัวนำคู่ขนาน ค่าความจุไฟฟ้าสามารถกล่าวในรูปของหลักไฟฟ้าสถิตย์อันหมายถึงความหนาแน่นของประจุบนแผ่นตัวนำ

ค่าสนามไฟฟ้า (Electrical field) มีค่าตามสมการ $E = \frac{V}{d}$ โดย d คือระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ ค่าคงที่อัตราความจุกระแสไฟฟ้าของ free space (Permittivity ϵ_0) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-12} \frac{C^2}{m^2}$ ด้วยเหตุนี้ ค่าเก็บประจุของแผ่นตัวนำคู่ขนานมีค่าเท่ากับ

$$Q = qA = \epsilon_0 \frac{V}{d} A \quad (2.1)$$

$$C_0 = \frac{Q}{V} = \epsilon_0 \frac{V}{d} A \frac{1}{V} = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

โดย q = ประจุต่อหน่วยพื้นที่
 d = ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ หน่วยเป็นเมตร
 A = พื้นที่โลหะคู่ขนาน หน่วยเป็นตารางเมตร

เมื่อแทรกวัสดุไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นโลหะตัวนำอันเป็นผลให้ ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative permittivity ϵ_r) ซึ่งถูกกำหนดจากอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกต่อค่าเก็บประจุที่เป็นสุญญากาศระหว่างโลหะตามสมการ

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon \frac{A}{d}}{\epsilon_0 \frac{A}{d}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.3)$$

โดย ϵ = อัตราความจุกระแสไฟฟ้าของสารไดอิเล็กทริกในหน่วย $\frac{C^2}{m^2}$ หรือ $\frac{F}{m}$

ดังนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ คือค่าอัตราส่วนความจุไฟฟ้าของวัสดุนั้นต่ออัตราส่วนความจุไฟฟ้าของสุญญากาศ จากสมการ (2.3) แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่แทรกระหว่างแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุจะเพิ่มความสามารถในการเก็บประจุ ดังตัวอย่างการเปรียบเทียบในตารางที่ 2.1

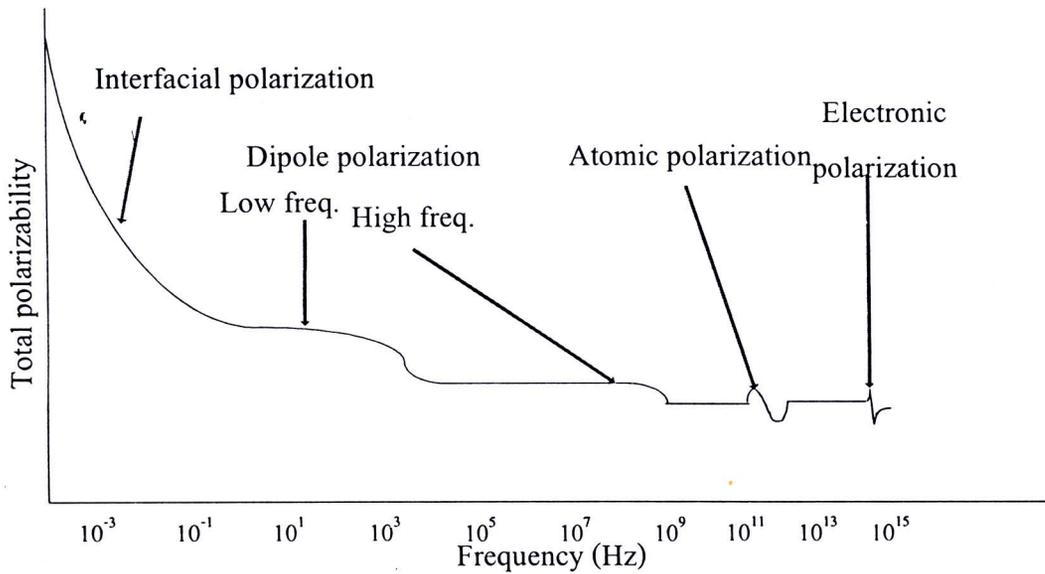
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์และค่าเก็บประจุ

วัสดุ	ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์	ค่าเก็บประจุ (พื้นที่ 1cm^2 หนา $1\mu\text{m}$)
Si	11.68	10.3 nF
อากาศ	1.0058	0.89 nF
SrTiO ₃	319	282.3 nF
BaTiO ₃	1250	1,106 nF

ไดโพลไฟฟ้า (Electric dipole) ถูกสนามไฟฟ้าบังคับให้เกิดการเรียงตัวขึ้น โดยผลของการเรียงตัวนี้ทำให้ประจุบวกและลบเกิดการแยกออกจากกัน ไปยังแผ่นตัวนำแต่ละด้านเพื่อทำให้เป็นสนามไฟฟ้าภายในหักล้างกับสนามไฟฟ้าภายนอกจากแหล่งจ่าย ในส่วนของประจุภายในวัสดุที่ไม่ได้ถูกหักล้างด้วยไดโพล เรียกว่าประจุอิสระ (Free charge) ซึ่งมีค่าเท่ากับ Q/ϵ_r สนามไฟฟ้าและความต่างศักย์จากภายนอกนั้นมีความสัมพันธ์ตามสมการ $V=QC_0/\epsilon_r$ ด้วยเหตุนี้สนามไฟฟ้าภายนอกจึงรักษา

ประจุที่บริเวณผิวได้ เนื่องจากประจุบางส่วนถูกยึดเหนี่ยวจากการโพลาไรซ์ (Polarize) ในสารไดอิเล็กทริก

กลไกพื้นฐานของการโพลาไรซ์สำหรับประจุไฟฟ้านั้นมีด้วยกัน 4 ชนิดได้แก่ โพลาไรซ์เชิงอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics polarization, P_e) โพลาไรซ์เชิงอะตอม (Atomic polarization, P_a) โพลาไรซ์เชิงไดโพล (Dipole polarization, P_d) และโพลาไรซ์ที่ผิวรอยต่อ (Interfacial polarization, P_i)



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการโพลาไรซ์กับความถี่

การโพลาไรซ์เชิงอิเล็กทรอนิกส์เกิดจากการเลื่อนของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนวงนอกสุดของไอออนภายในเนื้อสาร ซึ่งสัมพันธ์กับประจุบวกภายในนิวเคลียสและเกิดในช่วง Ultraviolet (10^{15} Hz) ในกลไกนี้ทำให้เกิดการดูดกลืนอันเนื่องจากการกำจร (Resonance) ที่ความถี่ในช่วง Infrared (10^{12} - 10^{13} Hz) การโพลาไรซ์เชิงอะตอมเกิดขึ้นในช่วงความถี่นี้ การโพลาไรซ์เชิงอะตอมเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบภายในเนื้อสารที่ยึดเหนี่ยวกัน ในช่วงความถี่ Subinfrared การโพลาไรซ์เชิงไดโพลจะเป็นตัวช่วยเพิ่มคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุ เนื่องจากการโพลาไรซ์เชิงไดโพลมีผลต่อการรบกวนการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในไดโพลอันเป็นต้นเหตุให้เกิดการเรียงตัวของไดโพลทั้งหมดให้เป็นไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ กลไกการโพลาไรซ์เชิงไดโพลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ ลักษณะแรก โมเลกุลที่มีไดโพลโมเมนต์ถาวร ด้วยการหมุนด้านแรงเพื่อรักษาสภาพให้อยู่ในตำแหน่งที่สมดุล โดยผลของกลไกนี้มีผลในของเหลว ก๊าซและของแข็งที่มีโมเลกุลแบบมีขั้ว เช่น น้ำแข็ง พลาสติกที่มีองค์ประกอบอินทรีย์ เป็นต้น การโพลาไรซ์เชิงไดโพล นั้นในลักษณะหลังเป็นกลไกสำคัญในการอธิบายถึงพฤติกรรมของสารไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องของ

กระจกและเซรามิก โดยเกี่ยวข้องกับการหมุนของไดโพลระหว่าง 2 ตำแหน่งที่สมดุล กลไกนี้เกิดการเรียงตัวของไดโพลที่ตำแหน่งสมดุลตามแนวตัวเอง ซึ่งเป็นตัวเพิ่มให้ของไดอิเล็กทริกที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุประเภทเฟอร์โรอิเล็กทริกให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประมาณ 10^4 หรือมากกว่านั้น กลไกการโพลาไรซ์บริเวณที่ผิวรอยต่อ หรือ การโพลาไรซ์บริเวณปลดปล่อยประจุเกิดเมื่อประจุอิสระถูกขวางด้วยกำแพงกายภาพ (Physical barrier) ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนประจุ ประจุนั้นจะสะสมอยู่ที่กำแพงและเกิดจากโพลาไรซ์ภายใน (Localized polarization) วัสดุขึ้น เมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ต่ำมาก (ต่ำกว่า 10^3 Hz) ผลการสั่นของประจุโดยรวมจะถูกสร้างอยู่ระหว่างบริเวณกำแพงและสร้างค่าเก็บประจุและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีค่าสูง หากกำแพงมีค่าความหนาแน่นของประจุช่วยในการโพลาไรซ์ที่ผิวรอยต่อแล้ว ช่วงตอบสนองต่อความถี่ของการโพลาไรซ์นี้ขยายได้ไปถึงช่วง 10^3 Hz

2.2 การใช้วงจรสมมูลไฟฟ้าที่อธิบายถึงไดอิเล็กทริก

เมื่อป้อนสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ sine $V = V_0 \exp i\omega t$ ให้กับสารไดอิเล็กทริก ประจุจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแสเกิดขึ้นตามสมการ

$$I_c = dQ/dt = C dV/dt = i\omega CV = \omega CV_0 \exp[i(\omega t + \pi/2)] \quad (2.4)$$

โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสารไดอิเล็กทริกนำหน้าแรงดันที่ป้อนให้อยู่ 90° ในการเก็บประจุไฟฟ้าของไดโพล กระแสรั่วในไดอิเล็กทริก (Leakage current) สามารถได้จาก 2 แหล่งด้วยกัน ได้แก่ การเคลื่อนย้ายของประจุในช่วงยาวและการกระจายตัวของพลังงานจากการสั่นของไดโพล

แนวคิดของสารไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นการควบคุมทั้งประจุและขบวนการสูญเสียด้วยการใช้ค่าอัตราความจุไฟฟ้าเชิงซ้อน (Complex permittivity) เพื่ออธิบายตามสมการ

$$\epsilon^* \equiv \epsilon' - j\epsilon'' \quad \text{และ} \quad \epsilon_r^* \equiv \epsilon^*/\epsilon_0 = \epsilon_r' - i\epsilon_r'' \quad (2.5)$$

ดังนั้น กระแสรวมในไดอิเล็กทริกสามารถกระจายได้ในเทอมของ ϵ_r^* ได้เป็น

$$i = dQ/dt = C dV/dt = \epsilon_r^* C_0 i\omega V = (\epsilon_r' - i\epsilon_r'') C_0 i\omega V_0 \exp i\omega t \quad (2.6)$$

และ
$$I_T = i\omega \epsilon_r' C_0 V + \omega \epsilon_r'' C_0 V \quad (2.7)$$

โดยพจน์แรกทางขวามือของสมการนั้นอธิบายถึงประจุที่สะสมอยู่ในไดอิเล็กทริก และ ϵ_r' คือค่าคงที่การประจุหรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ในส่วนของ ϵ_r'' คือตัวประกอบการสูญเสียของไดอิเล็กทริก

(Dielectric loss factor) หรือตัวประกอบการสูญเสียสัมพัทธ์ ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent) หรือมุมการสูญเสีย (Loss angle) หรือที่ถูกรู้จักว่าตัวประกอบการกระจาย (Dissipation factor) ถูกนิยามดังสมการ

$$\tan \delta \equiv \epsilon''/\epsilon' = \epsilon_r''/\epsilon_r' \quad (2.8)$$

ตัวประกอบการสูญเสียของไดอิเล็กทริกแสดงถึงความสัมพันธ์ในการใช้พลังงานเพื่อที่ใช้ในการสะสมประจุ

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับการโพลาไรซ์

เพื่อการทำความเข้าใจถึงปริมาณของสมบัติไดอิเล็กทริกแล้วนั้น จำเป็นต้องรู้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนและการโพลาไรซ์ภายในของสาร ซึ่งพิจารณาได้จากผลรวมของสนามไฟฟ้าที่เกิดการเลื่อน (D) โดย D คือผลรวมของสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในกรณีที่ไม่มีสารไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ รวมกับสนามของการโพลาไรซ์ภายในสาร

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon^* E \quad (2.9)$$

ดังนั้น ผลรวมของสนามไฟฟ้าที่เกิดการเลื่อน D มีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าภายนอก E โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนเป็นตัวแปรร่วมอยู่ เพราะฉะนั้นการโพลาไรซ์ก็สามารถเขียนได้เป็นสมการ

$$P = E(\epsilon^* - \epsilon_0) \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.3) สามารถเทียบได้ $\epsilon_r^* = \epsilon^*/\epsilon_0$

$$P = E(\epsilon_0 \epsilon_r^* - \epsilon_0) = \epsilon_0 (\epsilon_r^* - 1)E \quad (2.11)$$

หรือ $\epsilon_r^* = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E}$ (2.12)

โดยกำหนด $\frac{P}{\epsilon_0 E} = \chi$ คือความไวต่อไฟฟ้า (Electric susceptibility)

ดังนั้น $\epsilon_r^* = 1 + \chi$ (2.13)

จากสมการ (2.12) และ (2.13) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและผลรวมของการโพลาไรซ์ในสาร แต่อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ดังกล่าวก็ยังไม่เป็นรูปอย่างง่ายที่จะใช้หา

ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_r^* และ การโพลาไรซ์พื้นฐานของกลไกการประจุที่เป็นตัวช่วยในการโพลาไรซ์รวม (P)

การโพลาไรซ์ (P) มีค่าเท่ากับผลรวมของไดโพลโมเมนต์ที่ถูกเหนี่ยวนำภายในสารจากสนามไฟฟ้า ดังนั้น

$$P = N_i \bar{\mu}_i \quad (2.14)$$

โดย N_i คือ จำนวนของไดโพลชนิดต่างๆ

$\bar{\mu}_i$ คือ ไดโพลโมเมนต์เฉลี่ย

ค่าไดโพลโมเมนต์เฉลี่ยของประจุจะแปรผันตามกับสนามไฟฟ้าเฉพาะที่ (local electric field E')

$$\bar{\mu}_i = \alpha_i E' \quad (2.15)$$

โดย α_i คือ ความสามารถในการโพลาไรซ์ของไดโพลโมเมนต์เฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยของสนามไฟฟ้าเฉพาะที่

ดังนั้น ผลรวมของการโพลาไรซ์มีค่าเท่ากับ

$$P = N_i \alpha_i E' \quad (2.16)$$

สำหรับก๊าซโมเลกุลเล็ก สนามไฟฟ้าเฉพาะที่ E' จะมีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้าที่จ่ายจากภายนอก E_a อย่างไรก็ตาม สำหรับของแข็งที่เป็นฉนวนไดอิเล็กทริก การโพลาไรซ์ของตัวกลางนั้นมีผลต่อขนาดสนามไฟฟ้าเฉพาะที่ Mosotti เป็นผู้ที่พิสูจน์สนามไฟฟ้าเฉพาะที่โดยการอินทิเกรตขององค์ประกอบของเวกเตอร์โพลาไรซ์บนผิวของทรงกลมกลวงในสาร โดยผลที่ได้ตามสมการ

$$E' = E_a + \frac{P}{3\epsilon_0} \quad (2.17)$$

จากสมการ (2.11) ได้

$$N_i \alpha_i = \frac{P}{E_a + \frac{P}{3\epsilon_0}} \quad (2.18)$$

และจากสมการ (2.5) จะได้

$$N_i \alpha_i = \frac{1}{\frac{1}{(\epsilon_r^* - 1)\epsilon_0} + \frac{1}{3\epsilon_0}} \quad (2.19)$$

$$\text{จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น} \quad N_i \alpha_i = \frac{3 \epsilon_0^2 (\epsilon_r^* - 1)}{\epsilon_0 (\epsilon_r^* + 2)} \quad (2.20)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{(\epsilon_r^* - 1)}{(\epsilon_r^* + 2)} = \frac{1}{3 \epsilon_0} N_i \alpha_i \quad (2.21)$$

โดยสมการ (2.21) ที่ได้คือ สมการ Classical Clausius-Mosotti ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของสาร (ϵ_r^*) และชนิดต่างๆของการโพลาไรซ์ (N_i) และความสามารถในการโพลาไรซ์ชนิดต่างๆ (α_i) ดังนั้นสมการ (2.18) สามารถเขียนในรูปของการโพลาไรซ์ทั้ง 4 แบบได้ดังนี้

$$\frac{(\epsilon_r^* - 1)}{(\epsilon_r^* + 2)} = \frac{1}{3 \epsilon_0} [N_e \alpha_e + N_a \alpha_a + N_d \alpha_d + N_i \alpha_i] \quad (2.22)$$

2.4 การพังทลายของไดอิเล็กตริก (Dielectric breakdown)

เมื่อเซรามิกถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้าโดยนำมาใช้เป็นฉนวน ตัวเก็บประจุและเอนแคปซูเลชัน อายุการใช้งานของวัสดุนั้นถูกกำหนดจากแรงดันเกรเดียนท์ที่วัสดุสามารถทนได้ในระหว่างการใช้งานในระบบ ความล้มเหลวของวัสดุเกิดขึ้นเมื่อวัสดุนั้นมีลักษณะลัดวงจรหรือเกิดความล้มเหลวในกรณีนี้เรียกว่าการพังทลายของไดอิเล็กตริก แรงดันเกรเดียนท์ (Volts/centimeter) ที่มากเกินไปเป็นสาเหตุให้เกิดการลัดวงจรของวัสดุอันหมายถึงค่าขนาดแรงดันพังทลายของวัสดุ

ขนาดค่าแรงดันพังทลายของเซรามิกนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ โดยปัจจัยหลัก ได้แก่ ความหนา อุณหภูมิ สภาวะแวดล้อม รูปร่างและองค์ประกอบของขั้วโลหะ ลักษณะผิว ความถี่ของสนามไฟฟ้า รูปคลื่น ลักษณะของผลึก และองค์ประกอบทางเคมี

การพังทลายของไดอิเล็กตริกเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อันมีผลต่อโครงสร้างผลึกหรืออิเล็กตรอน อันทำให้มีค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นผลให้วัสดุถูกทำลายอย่างถาวร ชนิดของการพังทลายพื้นฐานมีอยู่ 3 ลักษณะ ได้แก่ การพังทลายตามธรรมชาติ (Intrinsic) การพังทลายเชิงอุณหภูมิ (Thermal) และการพังทลายแบบอะวาลันซ์ (Avalanche) นอกจากนี้ยังมีการพังทลายแบบเทียม (Pseudo-types) อีก 3 ลักษณะ คือ การคายประจุ (Discharge) อิเล็กโตรเคมี (Electro-chemical) และการพังทลายเชิงกล การพังทลายจลจลเทียมเป็นสาเหตุของการพังทลายพื้นฐานด้วยเช่นกัน

การคายประจุของไดอิเล็กตริกช่วยเสริมการพังทลาย โดยก๊าซในรูเล็ก (Pores) หรือที่ผิวของวัสดุที่เป็นของแข็ง การพังทลายเชิงอิเล็กโตรเคมีจากผลของการเสื่อมลงของสภาพฉนวนผ่านปฏิกิริยา

เคมีจนเกิดการพังทลาย อันเนื่องมาจากรอยแตก ขั้วบกพร่อง และความเครียดอื่นๆที่เพิ่มการ फैนไปของสนามไฟฟ้า

การพังทลายตามธรรมชาติขึ้นกับสนามไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งสนามไฟฟ้าที่ง่ายให้เป็นตัวกำหนดเมื่อพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่ามากกว่าระดับวิกฤตจึงเกิดการพังทลายขึ้น การพังทลายตามธรรมชาติเกิดที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่า และเกิดขึ้นในช่วงเวลาเพียงสั้นๆ ประมาณ 1×10^{-6} วินาที โดยการพังทลายตามธรรมชาติเกิดจากกลไกของการพังทลาย โดยที่ไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะของขั้วหรือรูปคลื่นที่ใช้ แต่ขึ้นอยู่กับค่าสนามไฟฟ้าที่ง่ายที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด

การพังทลายที่เกิดในช่วงอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิประมาณ 300°C เรียกว่าการพังทลายเชิงอุณหภูมิ เนื่องจากค่าพลังงานวิกฤตสำหรับการพังทลายมีผลต่อการพังทลาย ซึ่งได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิแวดล้อม โดยไม่ขึ้นกับค่าสนามไฟฟ้า นอกจากนี้การพังทลายเชิงอุณหภูมิขึ้นกับค่าอัตราการป้อนสนามไฟฟ้า การเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆของสนามไฟฟ้านั้นเป็นสาเหตุให้เกิดการพังทลายในช่วงเวลาตั้งแต่ 10^{-3} วินาทีถึง 1 นาที ซึ่งค่าแรงดันพังทลายยังขึ้นกับลักษณะรูปร่างของวัสดุ สำหรับสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเป็นพัลส์โดยการพังทลายในกรณีนี้ไม่ขึ้นกับลักษณะรูปร่างและค่าแรงดันพังทลายจะเพิ่มตามความแคบของรูปคลื่นพัลส์

การพังทลายแบบอะวาลานซ์นั้นสัมพันธ์กับการพังทลายแบบธรรมชาติ ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ และในระยะเวลาสั้น อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงอุณหภูมิของวัสดุถูกนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมของการพังทลาย ดังนั้นสมบัติเชิงอุณหภูมิของวัสดุเป็นผลรวมของกลไกตามธรรมชาติและอุณหภูมิ วัสดุบางชนิดเช่นฟิล์มบางของวัสดุไดอิเล็กทริกมีลักษณะการพังทลายเป็นแบบอะวาลานซ์

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างค่าแรงดันพังทลายสำหรับแก้วและเซรามิกชนิดต่างๆ

วัสดุ	โครงสร้าง	ความหนา	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	แรงดันในการ พังทลาย 10^6V/cm(DC)
Al_2O_3	Anodized film	300 Å	25	7.0
Al_2O_3	Anodized film	6000 Å	25	1.5
Al_2O_3	Anodized film	1000 Å	100	16.0
99.5% Al_2O_3	Polycrystalline ceramic	0.63 cm	25	0.18
94.0% Al_2O_3	Polycrystalline ceramic	0.63 cm	25	0.26
Alumina porcelain		0.63 cm	25	0.15

(ต่อ) ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างแรงดันพังทลายสำหรับแก้วและเซรามิก

วัสดุ	โครงสร้าง	ความหนา	อุณหภูมิ (°C)	แรงดันในการ พังทลาย 10^6 V/cm(dc)
High voltage porcelain		0.63 cm	25	0.15
Low voltage porcelain		0.63 cm	25	0.03
Lead glass		0.02 cm	25	0.25
Lead glass		0.02 cm	200	0.05
Borosilicate glass		0.003 cm	20	5.8
PbZrO ₃	Poly crystal (0%porosity)	0.0016 cm	20	0.033
PbZrO ₃	Poly crystal (10%porosity)	0.0016 cm	20	0.020

2.5 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric material)

ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectricity) เป็นปรากฏการณ์ที่ถูกล้มพบในช่วงศตวรรษที่ผ่านมา โดยคุณสมบัติของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นมีความคล้ายคลึงกับแม่เหล็ก แม้ว่าจะมีการเข้าใจผิดโดยสารเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้น ไม่มีเหล็กเจือปนอยู่เลย ซึ่งเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นกลุ่มหนึ่งของผลึกเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric crystals)

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity) เป็นปรากฏการณ์ที่ผลึกถูกความเครียด (Stress) ทางกลทำให้เกิดประจุไฟฟ้า โดยปริมาณของประจุที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับขนาดของความเครียด (แรงยืด Tensile force และแรงอัด Compressive force)

สมบัติคอนเวิร์สของเพียโซอิเล็กทริก (Converse piezoelectricity) เกิดเมื่อผลึกเพียโซอิเล็กทริกที่ถูกยืดหรืออัดตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ เมื่อทิศของสนามไฟฟ้ากลับทิศเครื่องหมายของขนาดก็จะเปลี่ยนแปลง การตรงข้ามของเพียโซอิเล็กทริกต่างจากการอัดตัวด้วยไฟฟ้า (Electrostriction)

การอัดตัวด้วยสนามไฟฟ้า แสดงถึงสาเหตุการเปลี่ยนแปลงขนาดจากทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ แต่ไม่สามารถเปลี่ยนเมื่อทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้เกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงโดยการอัดตัวทางไฟฟ้ามีขนาดที่น้อยกว่าหลายเท่าตัว จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการปรากฏการณ์การตรงข้ามของเพียโซอิเล็กทริก และสามารถเกิดได้ในวัสดุหลายชนิด เช่น ใน ของแข็งอสัณฐาน (Amorphous) ผลึกบางชนิดและในของเหลว

โดยทั่วไปแล้วประจุที่เกิดขึ้นในผลึกเพียโซอิเล็กทริกเกิดขึ้นบริเวณผิว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะที่ไม่มีความเครียดทางกล ผลึกเพียโซอิเล็กทริกชนิดนี้เรียกว่าผลึกไฟโรอิเล็กทริก (Pyroelectric) โดยผลึกไฟโรอิเล็กทริกทุกชนิดนั้นเป็นผลึกเพียโซอิเล็กทริก แต่ผลึกเพียโซอิเล็กทริกส่วนใหญ่ไม่ใช่ผลึกไฟโรอิเล็กทริก

การเปลี่ยนแปลงของโพลาไรซ์ถาวรที่มีสาเหตุจากอุณหภูมิแสดงบ่งชี้ได้จากค่าคงตัวเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient) ในขณะที่ค่าคงตัวเพียโซอิเล็กทริกแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความเครียดในผลึก โดยไม่มีการโพลาไรซ์ถาวรเกิดขึ้น ผลของอุณหภูมินั้นไม่ส่งผลต่อการโพลาไรซ์อย่างชัดเจน อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปอาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของการโพลาไรซ์ถาวรภายในผลึก แต่ผลของแรงดันมีผลต่อการโพลาไรซ์ในผลึกประเภทนี้

ฉนวนทางไฟฟ้าสามารถแบ่งตามการคล้ายคลึงกับกลไกในแม่เหล็กได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ ไดอิเล็กทริก (Dielectrics) พาราอิเล็กทริก (Para electrics) เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectrics) โดยโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กทริกไม่สามารถควบคุมโมเมนต์ทางไฟฟ้าได้ เมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าจากภายนอกเป็นผลให้การโพลาไรซ์เกิดขึ้นจากการเลื่อนของโมเลกุล การโพลาไรซ์ชนิดนี้ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ เนื่องจากโมเลกุลของพาราอิเล็กทริกสามารถควบคุมไดโพลโมเมนต์ โดยโมเลกุลชนิดนี้เรียงตัวตามสนามไฟฟ้าภายนอก ดังนั้นการเลื่อนของโพลาไรซ์ประกอบจากการเรียงตัวของไดโพลและการโพลาไรซ์ของพาราอิเล็กทริกนี้ขึ้นกับอุณหภูมิ

ในวัสดุไดอิเล็กทริกและพาราอิเล็กทริก การโพลาไรซ์เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับสนามไฟฟ้า และทิศทางของการโพลาไรซ์ก็มีทิศทางเดิม และค่าคงไดอิเล็กทริกจึงไม่ขึ้นกับความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยเช่นเดียวกัน

การโพลาไรซ์ในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกไม่เป็นเชิงเส้นกับสนามไฟฟ้าภายนอก โดยการเรียงตัวบางอย่างเกิดขึ้นขณะที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งก็คือการโพลาไรซ์ที่เกิดเองตามธรรมชาติ (Spontaneous polarization) เหมือนกับการแมกนีไทเซชันที่เกิดเองตามธรรมชาติ (Spontaneous magnetization) ในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetics)

ลักษณะสำคัญของเฟอร์โรอิเล็กทริกคือความสามารถในการกลับทิศของโพลาไรซ์ถาวร ความสามารถในการกลับทิศเกิดจากโครงสร้างของขั้วในสารเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกที่ไม่มีขั้วที่เปลี่ยนรูปไป โดยความสามารถในการกลับทิศของการโพลาไรซ์นี้นำไปสู่พฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นของสารไดอิเล็กทริก ในการพล็อตค่าของการโพลาไรซ์ของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกจะต้านสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกคือความสามารถเกิดการเรียงตัวของไดโพลกลับทิศได้ด้วยตัวเองจากปฏิกิริยาร่วมของไดโพล สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าเฉพาะที่ โดยมีสัดส่วนกับการโพลาไรซ์ ซึ่งเพิ่มขึ้นตามการเรียงตัวของไดโพลกับสนามไฟฟ้า การเรียงตัวนี้



เกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิ T_c ซึ่ง ปรากฏการณ์สุ่ม (Randomizing effect) ของ Thermal energy (kT) มีผลน้อยกว่า

เพื่ออธิบายถึงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกจากผลของการโพลาไรซ์ด้วยสนามไฟฟ้า มีสมการดังนี้คือ จากสมการ (2.11) (2.16) และ (2.17)

$$P = \epsilon_0 (\epsilon_r' - 1)E = N_i \alpha_i E'$$

โดย
$$E' = E_a + \frac{P}{3\epsilon_0}$$

ดังนั้น
$$P = N\alpha \left(E + \frac{P}{3\epsilon_0} \right) = N\alpha E + \frac{N\alpha P}{3\epsilon_0} \quad (2.23)$$

จัดรูปได้เป็น
$$P \left(1 - \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} \right) = N\alpha E \quad (2.24)$$

และความไวต่อไฟฟ้า χ มีค่าตามสมการที่ (2.12) และ (2.13) เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (2.24) ได้

$$\chi = \epsilon_r' - 1 = \frac{N\alpha/\epsilon_0}{\left(1 - \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} \right)} \quad (2.25)$$

สมการที่ (2.20) เรียกว่าสมการ Clausius-Mosotti และจาก $\epsilon_r' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้ตามสมการ

$$\frac{N\alpha}{\epsilon_0} = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \quad (2.26)$$

โดยจากสมการ (2.20) เมื่อ $\frac{N\alpha}{3\epsilon_0}$ เข้าใกล้ 1 มีผลให้ $P \chi$ และ ϵ_r' เข้าใกล้อนันต์

จากความสัมพันธ์ของการจัดเรียงตัวของไดโพลแปรผกผันตามอุณหภูมิ

$$\alpha_0 = C/kT \quad (2.27)$$

เมื่อ α_0 คือ การจัดเรียงตัวของไดโพล



C คือ ค่าคงตัวคูรี (Curie constant) ของวัสดุ

โดยถ้าพิจารณาให้ $\alpha_0 \gg \alpha_c + \alpha_a + \alpha_i$ แล้วจะนำไปสู่อุณหภูมิวิกฤต (T_c)

$$\frac{N\alpha_0}{3\epsilon_0} = \frac{N}{3\epsilon_0} \left(\frac{C}{kT_c} \right) = 1 \quad (2.28)$$

ดังนั้น T_c จะได้
$$T_c = \frac{NC}{k3\epsilon_0} \quad (2.29)$$

ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตการโพลาไรซ์ที่เกิดเองตามธรรมชาติ จะเกิดขึ้นและการเรียงตัวของไดโพลหลักมีทิศทางเดียวกัน โดยเมื่อรวมสมการเข้าด้วยกันจะได้สมการซึ่งเรียกว่า กฎคูรี โดยอธิบายถึงอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

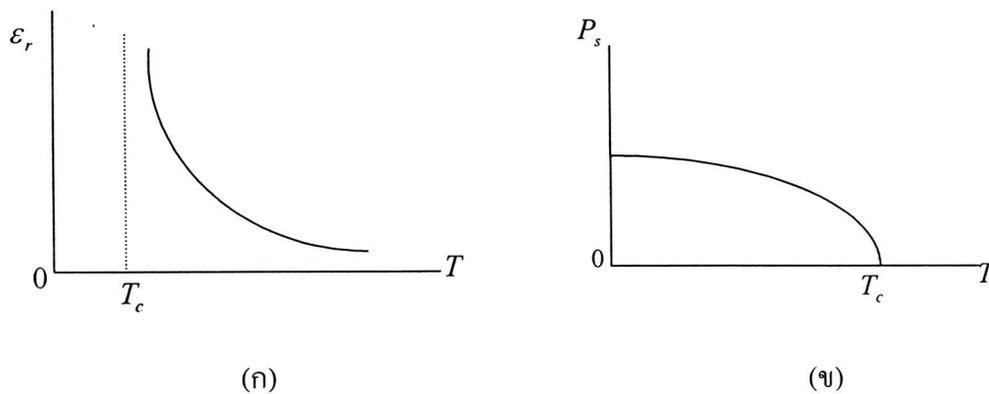
$$\chi = \epsilon_r' - 1 = \frac{N\alpha_0 T}{\left(1 - \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} \right)} \quad (2.30)$$

เมื่อนำกฎคูรีไปรวมกับสมการที่อธิบายถึงอุณหภูมิวิกฤต

$$\frac{T_c}{T} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} \quad (2.31)$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายความไวต่อไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิของสารและพฤติกรรมของเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิวิกฤต

$$\chi = \frac{3N\alpha/3\epsilon_0}{\left(1 - \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} \right)} = \frac{3T_c/T}{\left(1 - \frac{T_c}{T} \right)} = \frac{3T_c/T}{(T - T_c)/T} = \frac{3T_c}{T - T_c} \quad (2.32)$$



รูปที่ 2.2

- (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าอุณหภูมิของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก
- (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า spontaneous polarization และ ค่าอุณหภูมิ ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

ในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) สามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม Rochelle salt กลุ่ม KDP (potassium dihydrogen phosphate) และ กลุ่ม perovskites ซึ่งมี BaTiO_3 เป็นที่สนใจ เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีค่าสูงสุด อยู่ที่ประมาณ 10^5 ซึ่งค่าอยู่ใกล้อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะ

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกและตัวแปรที่สำคัญ [6]

Crystal	Chemical formula	T_c (K)	C (K)	P_s , (Coul/m ²)
Rochelle-salt group	$\text{NaK}(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	297(upper)	178	267×10^5
	$\text{LiNH}_4(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}) \cdot \text{H}_2\text{O}$	255(lower)		
KDP group	KH_2PO_4	123	3100	5330
	KD_2PO_4	213		
	RbH_2PO_4	147		
	CsH_2AsO_4	143		
Perovskites	BaTiO_3	393	1.7×10^5	26000
	SrTiO_3	32		
	WO_3	223		