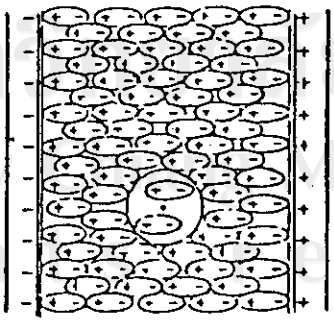
บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 ไดอิเลคตริก (Dielectrics)

สารไดอิเลคตริก เป็นสารที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ภายในสารจึงไม่มีประจุไฟฟ้าอิสระ (Free electron) หรือมีประจุก็มีค่าน้อยมาก เมื่อมีสนามไฟฟ้าผ่านเข้าในสารไดอิเลคตริก จะเกิดแรงทางไฟฟ้าเนื่องจากสนามไฟฟ้า กระทำที่นิวเคลียส และอิเลคตรอนของอะตอมสารไดอิเลคตริก โดยนิวเคลียสมีแนวโน้มเคลื่อนที่ไปตามสนามไฟฟ้า ส่วนอิเลคตรอนจะเคลื่อนที่สวนทางกับสนามไฟฟ้า ทำให้ประจุไฟฟ้าบวก-ลบ ในอะตอมย้ายห่างออกจากตำแหน่งสมดุลในทิศตรงกันข้ามกัน[1]

เมื่อพิจารณามวลสารทั้งหมดของสารไดอิเลคตริก จะเห็นว่า ประจุบวกทั้งหมดย้ายห่างออกจากประจุลบ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าสารไดอิเลคตริกนั้นถูกโพลาไรซ์ (Polarized) ดังแสดงตามรูปที่ 2.1

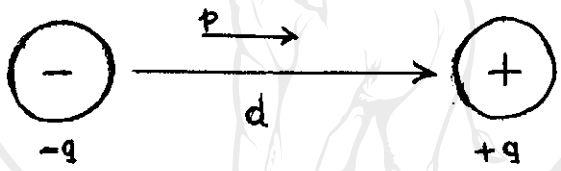


รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดโพลาไรซ์ ของสารไดอิเลคตริก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารไดอิเลคตริกที่ถูกโพลาไรซ์ แล้วจะถูกสร้างอำนาจไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอกของสารไดอิเลคตริก ทำให้สนามไฟฟ้าที่ทำให้สารไดอิเลคตริก ถูกโพลาไรซ์นั้นเปลี่ยนไปจากเดิม

เมื่อวัตถุอยู่ภายในสนามไฟฟ้า E ทำให้มีไดโพล โมเมนต์ (Dipole moment) เกิดขึ้นภายในวัตถุนั้น ซึ่งไดโพล โมเมนต์ เกิดจากประจุบวกและประจุลบแยกห่างจากกัน ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงไดโพล โมเมนต์ ของประจุไฟฟ้า

ให้ p = ไดโพล โมเมนต์

จะได้ $p = qd$ (2.1)

เมื่อ d = ระยะระหว่างประจุบวก-ลบ

q = ประจุไฟฟ้า

จากกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's Law) สามารถหาสนามไดโพล[2] ได้เป็น

$$\bar{E}_{(r)} = (1/4\pi\epsilon_o)(3(\bar{p}.\bar{r})\bar{r}-r^2\bar{p})/r^5 \qquad (2.2)$$

$\bar{r}$ = เวคเตอร์ (vector) ระหว่างไดโพล กับจุดที่สนาม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ให้ r >> d, d = ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของอะตอม ซึ่งมีค่าน้อยมาก

เมื่อไดโพล วางอยู่ในสนามภายนอก จะทำให้เกิด torque (τ) บนไดโพลด้วย

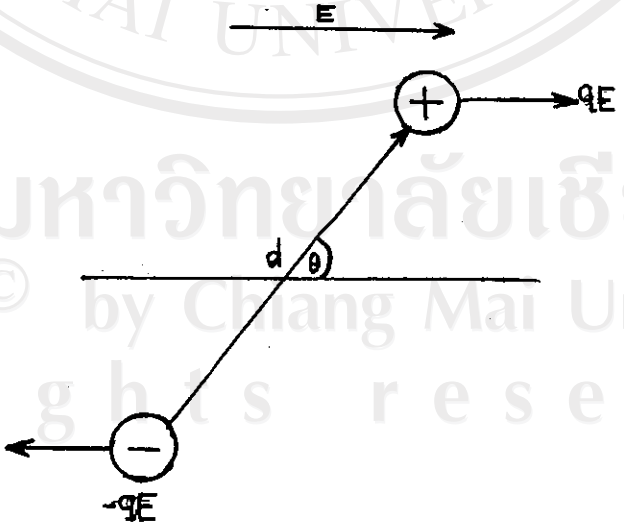
$$\tau = \bar{p} \times \bar{E} \qquad (2.3)$$

เมื่อ E เป็นสนามไฟฟ้าภายนอกจากสมการที่ (2.3)

$$\tau = pE \sin \theta$$

θ = มุมระหว่างทิศทางของสนามไฟฟ้ากับไดโพล โมเมนต์ ทิศของ τ ไปในทิศที่ทำให้ไดโพล เรียงตัวไปตามทิศของสนามไฟฟ้า และทำให้เกิดพลังงานศักย์ขึ้น

$$V = -\bar{p}.\bar{E}$$
$$= -pE \cos \theta \qquad (2.4)$$



รูปที่ 2.3 แสดง Torque เกิดบนไดโพลเนื่องจากสนามไฟฟ้า[13]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากสมการที่ (2.4) จะเห็นว่าค่าพลังงานขึ้นอยู่กับมุม θ และมุม θ มีค่าอยู่ระหว่าง $0 - \pi$ ซึ่งทำให้ค่าพลังงานมีค่าอยู่ระหว่าง $-pE$ เมื่อไดโพล เรียงตัวตามสนาม และ pE ค่าพลังงานส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยที่สุด เพราะไดโพลมักจะเรียงตัวไปตามสนาม

2.2 โพลาไรเซชั่น (Polarization)

ค่าโพลาไรซ์ถูกกำหนดจากค่าไดโพล โมเมนต์ ต่อหน่วยปริมาตร ถ้าจำนวนโมเลกุลต่อหน่วยปริมาตรเป็น N และทุกโมเลกุลมีไดโพล โมเมนต์ เป็น $\bar{p}$ ดังนั้นค่า Polarization (P) จะได้เป็น

$$\bar{P} = N\bar{p} \qquad (2.5)$$

เมื่อตัวกลางถูกโพลาไรซ์ คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเปลี่ยนไป โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์

$$\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E} + \bar{P} \qquad (2.6)$$

เมื่อ $\bar{D}$ = Electric displacement vector

$\bar{E}$ = สนามไฟฟ้าในตัวกลาง

ค่า D จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าภายนอกเท่านั้น และ ถ้า $\bar{E}_0$ = สนามไฟฟ้าภายนอก ดังนั้นสนามไดอิเลคตริก

$$\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E}_0 \qquad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.6) กับ (2.7) จะได้

$$\bar{E} = \bar{E}_0 - (1/\epsilon_0)\bar{P} \qquad (2.8)$$

จะเห็นว่าโพลาไรเซชั่น มีผลต่อสนามภายในของตัวกลางเท่านั้น และจากสมการที่ (2.8) เขียนใหม่ได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \bar{E} \qquad (2.9)$$

เมื่อ $$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \qquad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.10) เป็นตัวแสดงคุณสมบัติของตัวกลางว่าเกิดโพลาไรเซชั่นขึ้นมาก-น้อยเพียงใด

ϵ_r = relative permittivity หรือ ค่าคงที่ไดอิเลคตริก[3] (dielectric constant)

ค่าคงที่ไดอิเลคตริก ของตัวกลางนั้น อาจหาค่าได้ โดยใช้แผ่นตัวนำคู่ขนานของตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่อเข้ากับความต่างศักย์ ซึ่งจะทำให้แผ่นตัวนำคู่ขนานมีประจุเกิดขึ้น ในขณะที่ยังไม่มีสารไดอิเลคตริกวางอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนานจะมีสนามไฟฟ้า E_0 ซึ่งหาได้โดยวัดค่าความต่างศักย์ (V_0) ระหว่างแผ่นคู่ขนานนั้น และจะได้ความสัมพันธ์

$$\bar{E}_0 = V_0/L \qquad (2.11)$$

L = ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน

เมื่อนำสารไดอิเลคตริก สอดเข้าไปอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน สนามไฟฟ้า E_0 จะเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากเกิดการโพลาไรซ์เซชั่น ในตัวกลาง ซึ่งจะมีสนามไฟฟ้าเป็น E สามารถหาค่าได้โดยวัดความต่างศักย์ใหม่ และจะได้ความสัมพันธ์

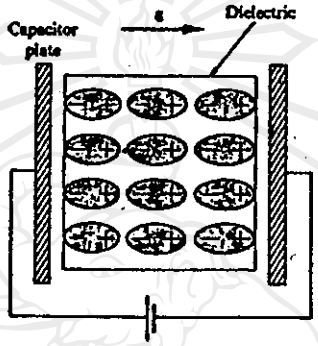
$$E = V/L \qquad (2.12)$$

ค่าคงที่ไดอิเลคตริก (ϵ_r) สามารถเขียนในเทอม $\bar{E}$ และ $\bar{E}_0$ คือ

$$\epsilon_r = \bar{E}_0/\bar{E} \qquad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.12) และ (2.13) จะได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.4 แสดงการทดลองอย่างง่ายสำหรับวัดค่าคงที่ไดอิเลคตริก

$$\epsilon_r = V_o/V \qquad (2.14)$$

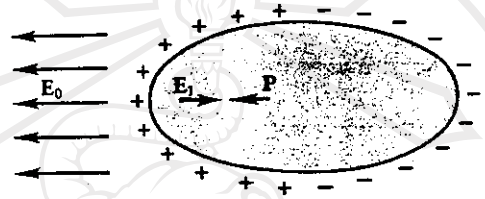
นั่นคือค่าคงที่ไดอิเลคตริก ได้จากการวัดความต่างศักย์ของแผ่นตัวนำคู่ขนาน ในขณะที่ยังไม่ใส่สารไดอิเลคตริก กับขณะใส่สารไดอิเลคตริกระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน แล้วหาอัตราส่วนระหว่างค่าทั้งสอง

จากการเกิดโพลาไรเซชั่น ประจุภายในสารเหมือนกับว่าหักล้างกันหมดไป คงเหลือแต่บริเวณผิวของสารไดอิเลคตริกเท่านั้น ดังแสดงตามรูปที่ 2.5

ถ้าสนามไฟฟ้าภายในสารไดอิเลคตริก เป็น $\bar{E}_i$ มีทิศตรงข้ามกับสนามภายนอก และมีโพลาไรเซชั่น $\bar{P}$ เกิดในทิศตรงข้ามกับสนาม $\bar{E}_i$

สนามไฟฟ้า $\bar{E}_i$ เรียกว่า depolarization field เพราะว่าสนาม E_i ที่เกิดขึ้นจะทำให้โพลาไรเซชั่น ถูกทำลายไปที่ตำแหน่งใด ๆ ภายในสาร จะมีสนามรวมเป็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.5 แสดงสนามไฟฟ้า เกิดจากประจุที่ผิวสารมีทิศตรงข้ามกับสนามภายนอก[11]

$$\bar{E} = \bar{E}_0 + \bar{E}_1 \qquad (2.15)$$

$\bar{E}_1$ มีทิศตรงข้ามกับ $\bar{E}_0$ และค่า $\bar{E}_1$ แปรตามโพลาไรเซชั่น

$$\bar{E}_1 \propto \bar{P}$$
$$\bar{E}_1 = -M\bar{P} \qquad (2.16)$$

M = ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของสารนั้น เช่น ถ้าแผ่นบาง และสนามภายนอกตั้งฉากกับแนวระนาบของแผ่น

$$M = 1/\epsilon_0 \qquad (2.17)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สนามภายนอกจะเหนี่ยวนำให้เกิดโพลาไรเซชั่นขึ้นใน ellipsoid[2] โดยกำหนดว่า dielectric susceptibility (X) ชิ้น

$$\bar{P} = \epsilon_o X \bar{E} \qquad (2.18)$$

ถ้าสนามภายนอก E_o ขนานกับแกนหลักของ ellipsoid ดังนั้น

$$\bar{E} = \bar{E}_o - M\bar{P} \qquad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.17)

$$\bar{P} = X(\epsilon_o \bar{E}_o - \epsilon_o M\bar{P})$$

หรือ

$$\bar{P} = [X\epsilon_o \bar{E}/(1+\epsilon MX)] \qquad (2.20)$$

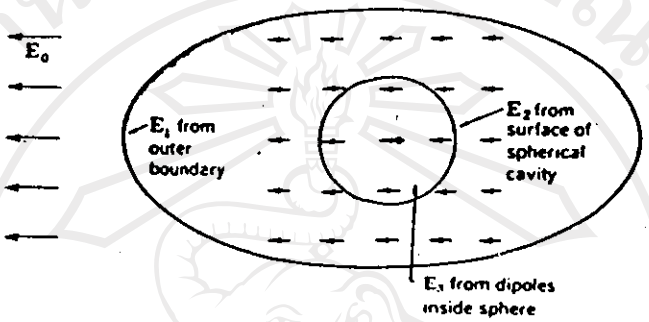
ค่าโพลาไรเซชั่น มีค่าขึ้นอยู่กับ depolarization factor M

2.3 สนามไฟฟ้าท้องถิ่น (Local electric field)

การโพลาไรซ์ ของสารไดอิเลคตริก ถ้าพิจารณามวลสารทั้งหมด ประจุไฟฟ้าบวก -ลบ ภายในสาร จะเกิดการหักล้างกันหมดไปเหลือเฉพาะบริเวณผิวของสาร แต่ถ้าพิจารณาที่จุดใดจุดหนึ่งหรือโมเลกุลใดโมเลกุลหนึ่ง บริเวณใกล้ ๆ จุดนั้นจะมีโพลาไรเซชั่น และมีสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุบวกและประจุลบเหล่านี้ด้วย ซึ่งเรียกเป็นสนามท้องถิ่น (local field) หรือ E_{loc}

การคำนวณหาสนามไฟฟ้าท้องถิ่น ต้องคำนวณสนามไฟฟ้าทั้งหมดที่กระทำต่อไดโพลโมเมนต์ สนามไฟฟ้าท้องถิ่นเกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอก Lorentz[7] ได้สร้างทรงกลมล้อมรอบบริเวณที่ต้องการทราบสนามท้องถิ่น แล้วดึงอะตอมภายในทรงกลมนั้นออกไปกลายเป็นช่องว่าง (Cavity) ดังรูปที่ (2.6)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.6 แสดงสนามไฟฟ้าภายในที่อะตอมในผลึก ซึ่งเป็นผลรวมของสนามไฟฟ้าภายนอก E_0 กับสนามไฟฟ้าเนื่องจากอะตอมอื่นในผลึก

เมื่อให้สนามไฟฟ้า $\bar{E}_0$ แก่ผลึก จะเกิดโพลาไรเซชั่นขึ้นในผลึก ซึ่งจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า $\bar{E}_1$ ขึ้นเนื่องจากเป็น depolarization field และประจุที่ผิวทรงกลมกลวงที่สร้างขึ้นจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า $\bar{E}_2$ ขึ้นเรียก $\bar{E}_2$ ว่า Lorentz field และภายในช่องว่างทรงกลมจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า $\bar{E}_3$ ขึ้น (ในกรณี lattice site ทั่วไป)

ดังนั้น สนามไฟฟ้าท้องถิ่นที่อะตอมใด ๆ มีค่าดังสมการ

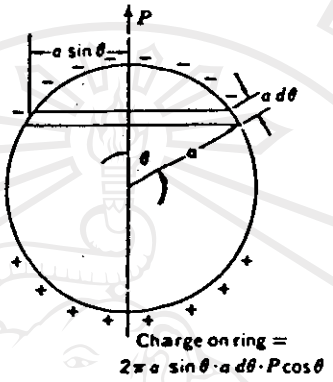
$$\bar{E}_{loc} = \bar{E}_0 + \bar{E}_1 + \bar{E}_2 + \bar{E}_3 \qquad (2.21)$$

เนื่องจากผลึกเป็น Cubic symmetry จะได้ $\bar{E}_3$ ซึ่งก็คือ $\bar{E}_3$ เป็นศูนย์ และจากการคำนวณ $\bar{E}_2$ ดังรูปที่ 2.7 จะได้

$$\bar{E}_2 = \int_0^{\pi} a^{-2}(2\pi a \sin\theta)(a d\theta)(\bar{P}\cos\theta)(\cos\theta)$$

$$\bar{E}_2 = (4\pi/3)\bar{P} \text{ ในหน่วย cgs}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.7 แสดงการคำนวณสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุที่ผิวช่องว่างทรงกลมในเนื้อสารที่ Uniformly Polarized[7]

หรือ $$\bar{E}_2 = (1/3\epsilon_0)P \text{ ในหน่วย SI} \qquad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.21) จะได้เป็น

$$\bar{E}_{loc} = \bar{E}_0 + \bar{E}_1 + (1/3\epsilon_0)\bar{P} \qquad (2.23)$$

เรียกสมการที่ (2.23) นี้ว่า Lorentz relation ซึ่งบางครั้งอาจเขียนในรูป

$$\bar{E}_{loc} = \bar{E}_{(r)} + (1/3\epsilon_0)\bar{P} \qquad (2.24)$$

2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเลคตริกกับอุณหภูมิ

กรณีของการ Polarization catastrophe เป็นการกล่าวถึงสภาวะวิกฤต ทำให้โพลาไรซ์มีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เพราะสนามไฟฟ้าท้องถิ่นทำให้โพลาไรซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมากกว่าแรงระหว่างไอออนในผลึก เป็นผลให้ตำแหน่งของ ionic เคลื่อนไปจากสมดุล ระยะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ทางที่ ionic เคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับแรงกระทำระหว่างไอออนด้วยกัน

การกำหนดทฤษฎี Catastrophe ทำโดยสมมติให้สนามท้องถิ่นที่อะตอมทั้งหมดเป็นตามสมการ

$$\bar{E}_{loc} = \bar{E}_{(r)} + (1/3\epsilon_0)\bar{P} \qquad (2.25)$$

ในผลึกไดอิเลคตริก ทั่วไปเมื่อให้สนามไฟฟ้าจะเกิดโพลาไรเซชั่นขึ้น โดยค่า คงที่ไดอิเลคตริก มีความสัมพันธ์กับโพลาไรเซชั่นกับสนาม ดังสมการ[2]

$$\epsilon_r = 1 + (P/\epsilon_0 E) \qquad (2.26)$$

ส่วนผลึกเฟอโรอิเลคตริก (ferroelectric crystals)นั้นมี spontaneous polarization (P_s) อยู่แล้ว แม้ไม่มีสนามไฟฟ้า แต่เมื่อมีสนามไฟฟ้าเข้าไปเพียงเล็กน้อย จะทำให้เกิดโพลาไรเซชั่น P มากขึ้น การโพลาไรเซชั่นที่อุณหภูมิวิกฤตมีค่ามาก จะทำให้ค่าคงที่ไดอิเลคตริก (ϵ_r) มากด้วย ในกรณีสนามไฟฟ้า E = 0 ค่า ϵ_r จะเป็นอนันต์ ดังนั้นสภาวะการเกิด ferroelectricity อธิบายค่าคงที่ไดอิเลคตริกด้วย สมการที่ (2.26)

$$\epsilon_r = [1+(2/3\epsilon_0)\Sigma N_j\alpha_j]/[1-(1/3\epsilon_0)\Sigma N_j\alpha_j] \qquad (2.27)$$

นั่นคือ $\Sigma N_j\alpha_j$ มีค่าเท่ากับ $3\epsilon_0$ ค่าคงที่ไดอิเลคตริก จะเป็นอนันต์ ที่ตำแหน่งอุณหภูมิวิกฤต ในความเป็นจริงค่า ϵ_r ไม่ได้เป็นอนันต์เพียงแต่มีค่ามาก หมายความว่าเทอม $(1/3\epsilon_0)\Sigma N_j\alpha_j$ ไม่ได้เป็น 1 ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$(1/3\epsilon_0)\ N_j\alpha_j = 1 - \delta \qquad (2.28)$$

เมื่อ δ มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ๆ ($\delta << 1$) แทนค่าสมการที่ (2.28) ลงในสมการที่ (2.27) จะได้ว่า

$$\epsilon_r = 3/\delta \qquad (2.29)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ที่อุณหภูมิใกล้อุณหภูมิวิกฤติ (T_c) ค่า δ ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังสมการ

$$\delta \propto (3/C)(T - T_c) \qquad (2.30)$$

แทนค่าสมการที่ (2.30) ลงในสมการที่ (2.29) จะได้

$$\epsilon_r = C/(T-T_c) \qquad (2.31)$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่ และเรียกสมการที่ (2.31) ว่า Curie-Weiss Law

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเลคตริกกับความถี่

เมื่อสารไดอิเลคตริกอยู่ในสนามไฟฟ้าแบบ Oscillating field ไดโพลโมเมนต์พยายามหมุนตัวตามทิศของสนามตลอดเวลา และเนื่องจากความเฉื่อยของการโพลาไรซ์จะทำให้เกิด Relaxation ขึ้น

สมการของ Debye สามารถอธิบายกระบวนการ relaxation ได้ ถ้าให้

ϵ_s = Static dielectric constant

ϵ_∞ = Optical dielectric constant

ϵ_s, ϵ_∞ เป็นค่า relative permittivity

เมื่อสนามมีความถี่ต่ำหรือสูงกว่าความถี่ธรรมชาติของการโพลาไรซ์มาก ๆ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเลคตริก ตามความถี่ดังสมการ

$$\epsilon_{(\omega)} = \epsilon_\infty + f_{(\omega)} \qquad (2.32)$$

กรณี $\omega \longrightarrow 0$ จะได้ว่า

$$f_{(\omega)} = \epsilon_s - \epsilon_\infty \qquad (2.33)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กรณีที่ใส่สนามสม่ำเสมอให้กับสารไดอิเลคตริกแล้ว เอาสนามออกทันที การ โพลาไรซ์ จะลดลงแบบ exponential ด้วยค่าคงที่ ถ้าเวลา τ เป็นสมบัติเกี่ยวกับ relaxation time ของโมเลกุล จะได้

$$P(t) = P_o \exp(-t/\tau) \qquad (2.34)$$

ถ้า $f(\omega)$ เป็น spectrum ของความถี่ เนื่องจากฟังก์ชั่นของเวลา $P_{(t)}$ จาก Fourier transform

$$f(\omega) = \int_0^\infty P(t)\, e^{i\omega t}\, dt$$

$$= \int_0^\infty P_o \exp(i\omega t - t/\tau)\, dt$$

$$f(\omega) = P_o/(-i\omega + (1/\tau))$$

เมื่อ $\omega = 0$

$$P_o = \epsilon_s - \epsilon_\infty$$

และจาก $\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + f(\omega)$

$$\therefore \quad \epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + [(\epsilon_s - \epsilon_\infty)/(i\omega\tau + 1)] \qquad (2.35)$$

เมื่อแยกส่วนจริง (real part) และส่วนจินตภาพ (imaginary part) ออกจากกัน

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + [(\epsilon_s - \epsilon_\infty)/(1+\omega^2\tau^2)] \qquad (2.36)$$

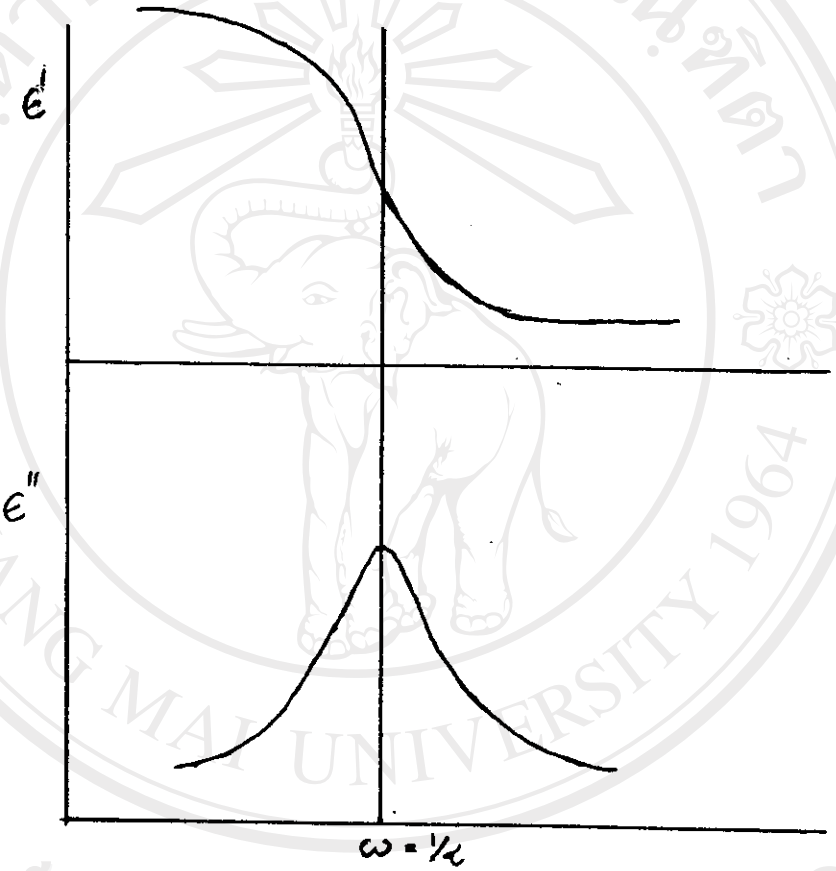
$$\epsilon'' = \omega\tau/(1+\omega^2\tau^2)(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \qquad (2.37)$$

ดังนั้นสามารถเขียน $\epsilon(\omega)$ ในรูปทั่วไปเป็น

$$\epsilon(\omega) = \epsilon' - j\epsilon'' \qquad (2.38)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อนำสารไดอิเลคตริกใส่ไปในตัวเก็บประจุ ϵ' จะมีผลต่อค่าความจุ ส่วน ϵ'' จะมีผลต่อ joul heat loss ในตัวเก็บประจุ รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของ ϵ' และ ϵ'' เป็นดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ ϵ' และ ϵ'' ตามความถี่

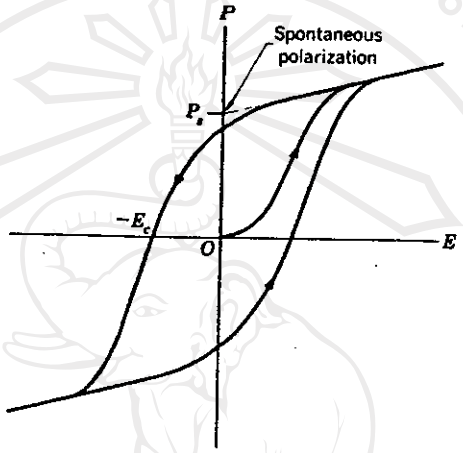
2.6 ผลึกเฟอโรอิเลคตริก[11] (Ferroelectric Crystals)

ผลึกเฟอโรอิเลคตริก จะแสดงสมบัติของไดโพล โมเมนต์ ถึงแม้ว่าจะนำเอาสนามไฟฟ้าภายนอกออกไปแล้วก็ตาม กล่าวได้ว่า มีไดโพล โมเมนต์ ถาวรอยู่ภายในผลึก

จากกรณีที่เอาสารไดอิเลคตริก วางในสนามไฟฟ้า จะเกิด โพลาไรเซชั่นขึ้นภายในสารนั้น และเมื่อลดสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าในสารไดอิเลคตริก จนเป็นศูนย์โพลาไรเซชั่นภายในสารก็จะเป็นศูนย์ทันที แต่มีสารบางอย่างเมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไปทำให้เกิดโพลาไรเซชั่นขึ้น และเมื่อลดสนามไฟฟ้าภายนอกจนเป็นศูนย์โพลาไรเซชั่น ไม่เป็นศูนย์เหมือนในสาร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ไดอิเลคตริก ตามรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดง Hysteresis loop ของผลึกเฟอโรอิเลคตริก

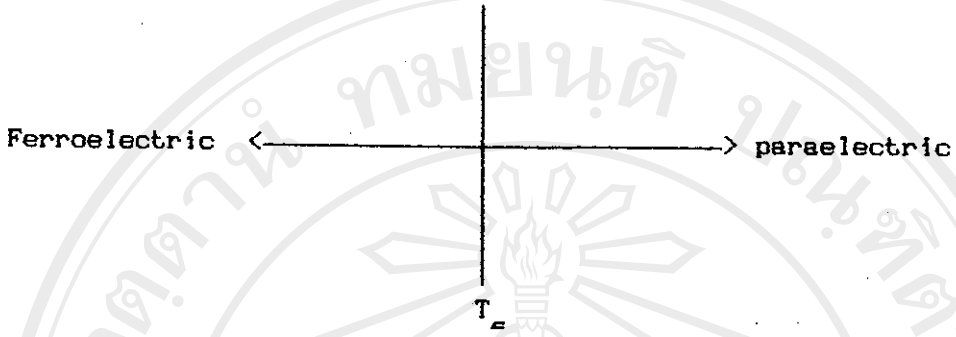
Hysteresis loop เป็นตัวแสดงสภาวะเฟอโรอิเลคตริก (Ferroelectric state) ส่วนผลึกทั่วไปที่เป็นไดอิเลคตริก จะไม่แสดงลักษณะของ Hysteresis loop นี้ แสดงว่าในสภาวะ เฟอโรอิเลคตริก จะมีไดโพล โมเมนต์ ถาวรอยู่แล้ว ดังนั้นสามารถทำให้สารบางชนิดแสดงสภาวะเฟอโรอิเลคตริก ได้โดยไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้าภายนอกเลย แต่ใช้การลดอุณหภูมิแทน โดยปกติสภาวะเฟอโรอิเลคตริก จะไม่ปรากฏที่อุณหภูมิสูงกว่า อุณหภูมิแน่นอนค่าหนึ่งเรียกว่า อุณหภูมิวิกฤติ (T_c) หรืออุณหภูมิคูรี (Curie Temperature)

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ผลึกจะอยู่ในสภาวะ Paraelectric และที่ T_c ผลึกจะมีการเปลี่ยนเฟส (Phase transistion)[2, 18] เกิดขึ้น ดังแสดงตามรูปที่ 2.10

สารเฟอโรอิเลคตริก บางชนิดไม่มี T_c เนื่องจาก T_c สูงมาก ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นไปเรื่อย ๆ อาจจะหลอมเหลวเสียก่อนที่จะถึง T_c ก็ได้

ผลึกเฟอโรอิเลคตริก แบ่งได้หลายกลุ่ม เช่น กลุ่ม Perovskites ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ได้แก่ $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $LiTaO_3$, $KNbO_3$, WO_3 และ $PbTiO_3$ สารใน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.10 แสดงการเปลี่ยนเฟส (Phase transistion) ที่อุณหภูมิคูรี (T_c)

กลุ่มนี้ที่อุณหภูมิห้องเป็นผลึกเฟอโรอิเลคตริกแล้ว. และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบง่าย เช่น $BaTiO_3$ มีโครงสร้างผลึกเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

2.7 เลดติตาเนต (Lead Titanate)

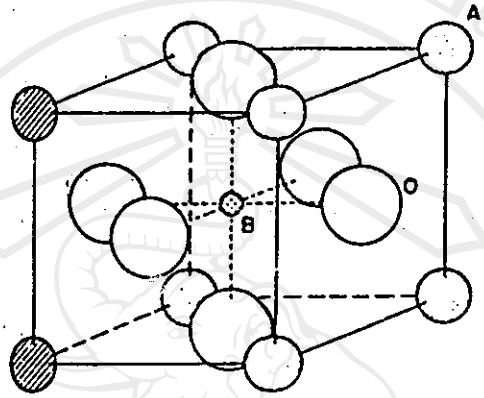
เลดติตาเนต ($PbTiO_3$) จัดเป็นสาร new ceramics ชนิดหนึ่ง[3] มีส่วนประกอบของตะกั่วออกไซด์ (PbO) กับติตาเนียมออกไซด์ (TiO_2) ทำปฏิกริยากันดังสมการ

$$PbO + TiO_2 \longrightarrow PbTiO_3 \qquad (2.39)$$

หรือ $$PbCO_3 + TiO_2 \longrightarrow PbTiO_3 + CO_2 \qquad (2.40)$$

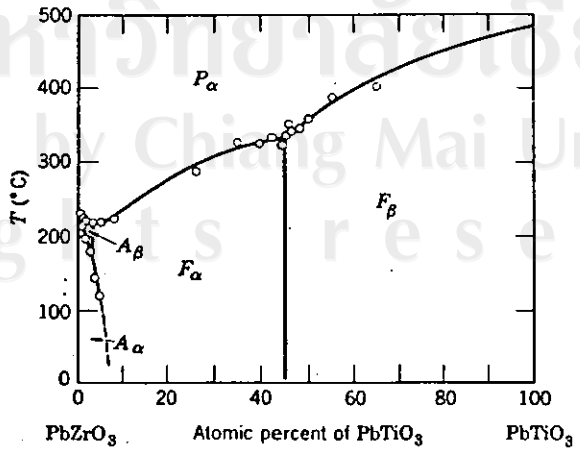
ผลึกเชิงเดี่ยวของ $PbTiO_3$ เป็นแบบ Tetragonal[8] เป็นผลึกประเภทเฟอโรอิเลคตริก กลุ่ม Perovskites[9]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.11 แสดง Cubic ABO_3 perovskite structure[8]

$PbTiO_3$ มีอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) 492 ± 5 °C[14] เนื่องจากเลดติตาเนตมีอุณหภูมิคูรีสูง จึงนิยมที่จะนำไปผสมเข้ากับสารที่เหมาะสมกันที่มีอุณหภูมิคูรีต่ำ ๆ เพื่อเลื่อนอุณหภูมิคูรีให้สูงขึ้น ดังแสดงตามรูปที่ 2.12

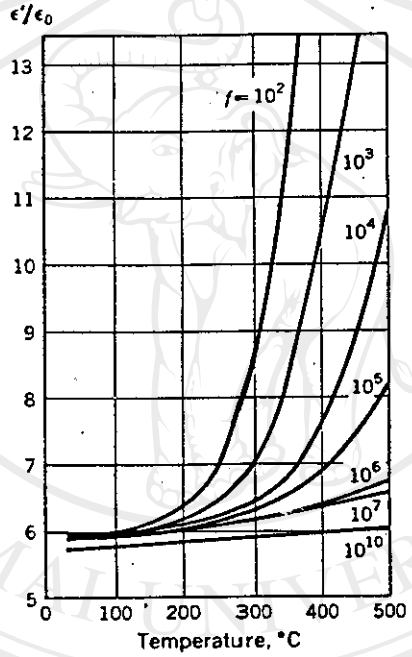


รูปที่ 2.12 แสดงอุณหภูมิคูรีที่เลื่อนไปตามเปอร์เซนต์การผสมของ $PbTiO_3$[11]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

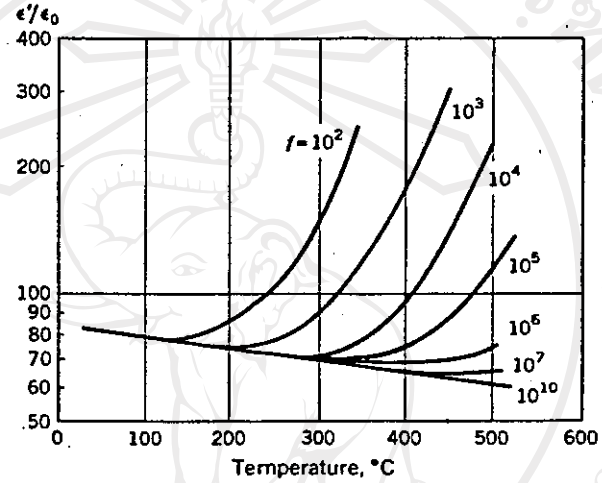
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเลคตริกกับอุณหภูมิและความถี่ของ Steatie ceramic และ Titania ceramic

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าดังกล่าวข้างต้นด้วยรูปที่ 2.13 - 2.14



รูปที่ 2.13 แสดง Dielectric constant ϵ'/ϵ_o of steatic ceramic[15]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.14 แสดง Dielectric constant of titania ceramic

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved