



วัสดุโพลิเมอร์ไดอิเล็กตริก Giant Dielectric Material

ธานินทร์ ปัจจุโส¹

บทนำ

ในปัจจุบันการพัฒนาวัสดุอิเล็กทรอนิกส์มีความก้าวหน้าไปมาก ดังจะเห็นได้จากการมีสินค้าหรือผลิตภัณฑ์แปลกใหม่ซึ่งมีประสิทธิภาพการทำงานสูงใช้ในอุตสาหกรรมและครัวเรือนทั่วไป การที่อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์พัฒนาก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วในส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการค้นพบวัสดุที่มีสมบัติพิเศษหรือเฉพาะทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ใหม่ๆ หลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุประเภท เซรามิกใหม่ (New ceramic) ที่เรียกว่าอิเล็กทรอนิกส์เซรามิก (electronics ceramic) ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้นอีกทั้งยังมีขนาดเล็กลงทั้งนี้สิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากองค์ประกอบและโครงสร้างของวัสดุที่ปรับแต่งให้ต่างไปจากเดิมจึงมีส่วนช่วยให้วัสดุเหล่านี้สามารถทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพสูงขึ้นดังจะได้อธิบายถึงต่อไป

ในโลกของเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ปฏิเสธไม่ได้ว่าการพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุให้ดีขึ้นนั้นส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาสมบัติในด้านต่างๆ ของวัสดุ โดยเฉพาะทางด้านไฟฟ้าที่เป็นส่วนสำคัญของอุปกรณ์ไฟฟ้าให้สามารถทำงานได้ดีขึ้น เช่นมีความเร็วสูง มีขนาดเล็กลง มีการนำไฟฟ้าที่ดี มีความจุไฟฟ้าสูง เป็นต้น

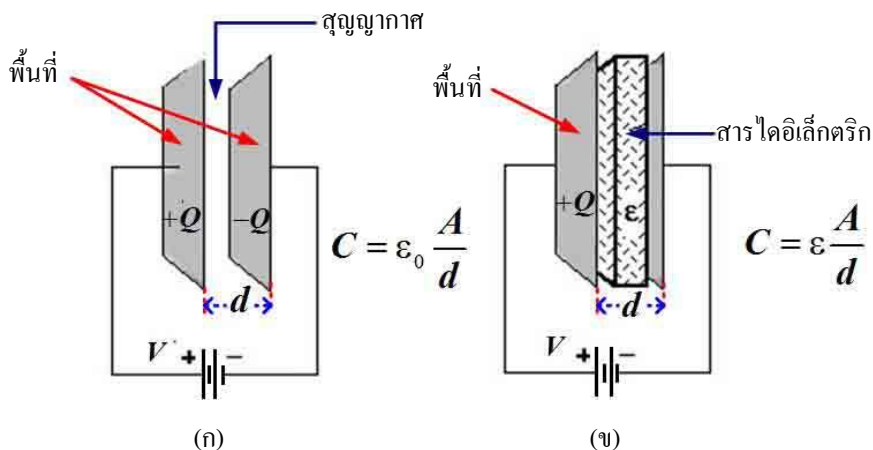
ในบรรดา อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ ขดลวดเหนี่ยวนำ หรือ ตัวเก็บประจุ พบว่ามีผู้ให้ความสนใจศึกษาและวิจัยกันมาก ตัวเก็บประจุค่าความจุสูงเป็นจำนวนมาก โดยการพัฒนาสารไดอิเล็กตริก ให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงและค่าแทนเจนต์การสูญเสียต่ำ ซึ่งบทความนี้จะได้อธิบายถึงตัวเก็บประจุและสมบัติที่เกี่ยวข้องโดยเฉพาะตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงมาก ที่เรียกว่า วัสดุโพลิเมอร์ไดอิเล็กตริก โดยทั่วไป โครงสร้างของตัวเก็บประจุ (Capacitor) เกิดจากการนำสารตัวนำแบบแผ่น 2 ชั้นมาวางในลักษณะขนานใกล้ๆ กัน แต่ไม่ได้ต่อกันระหว่างตัวนำทั้งสองจะถูกกั้นด้วยฉนวนที่เรียกว่า ไดอิเล็กตริก (Dielectric) ซึ่งวัสดุใช้เป็นไดอิเล็กตริกนี้อาจจะเป็นอากาศ แก้ว ไม้ก้ำ พลาสติก เซรามิกหรือสารที่มีสภาพคล้ายฉนวนอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก)

โดยทั่วไปค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบแผ่นเพลตที่วางอยู่ในสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) จะมีค่าตามสมการที่ (1) แต่ถ้าเรานำแผ่นวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก k ไปวางไว้ระหว่างแผ่นเพลตทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจะเป็นไปตามสมการที่ (2) ซึ่งจะเห็นว่า มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม (C_0) ถึง k เท่า

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

$$C = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{\epsilon_0 k A}{d} = C_0 k \quad (2)$$

¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล ถ. เพชรเกษม ต. หนองแก อ. หัวหิน จ. ประจวบคีรีขันธ์ 77110
E-Mail: putjuso@hotmail.com



รูปที่ 1 (ก) ตัวเก็บประจุแผ่นโลหะขนานอย่างง่ายที่ตัวกลางระหว่างแผ่นเป็นสุญญากาศ (ข) ตัวเก็บประจุแบบเดียวกันแต่มีวัสดุไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างแผ่นโลหะ (ดัดแปลงจาก <http://faculty.wvu.edu/vawter/PhysicsNet/Topics/Capacitors/ParallCap.html>)

จากสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ค่า คือ ความ C_0 จุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีตัวกลางคั่นเป็นสุญญากาศ, C คือความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีตัวกลางคั่นเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก, A คือพื้นที่ของแผ่นเพลตตัวนำ, d คือความหนาของแผ่นสารไดอิเล็กตริกหรือระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตตัวนำ และ ϵ_0 คือค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (permittivity) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-12} \text{ N.m}^2/\text{C}^2$ จากสมการทั้งสองจะเห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าหรือการเก็บประจุมีอยู่สามปัจจัยด้วยกัน โดยปัจจัยแรกได้แก่พื้นที่ (A) ของตัวนำที่เป็นแผ่นเพลต ถ้าพื้นที่ A มีค่าน้อยก็จะเก็บประจุได้น้อย ถ้า A มีค่ามากจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่ามาก ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มค่าความจุต้องเพิ่มพื้นที่ A ให้มีค่ามากขึ้น แต่ถ้าพื้นที่ A มากเกินไป ก็ไม่เหมาะที่จะนำไปทำ

เป็นอุปกรณ์ใช้งานด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (microelectronics) หรือนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nanoelectronics) ซึ่งเป็นประดิษฐ์กรรมที่ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน ปัจจัยที่สองคือระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต (d) ถ้าแผ่นเพลตอยู่ห่างกัน d มีค่ามากจะทำให้ C มีค่าน้อย แต่ถ้าอยู่ใกล้กันนั่นคือ d มีค่าน้อยจะทำให้ C มีค่ามาก ซึ่งการลดระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตเพื่อเพิ่มค่าความจุจะมีขีดจำกัดกล่าวคือ ถ้าระยะห่างระหว่างแผ่นเพลตน้อยเกินไปก็จะทำให้ตัวเก็บประจุกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ และปัจจัยที่สามคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (K) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ได้รับความสนใจอย่างมากเพราะสามารถเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บได้ไม่มีขีดจำกัด ขึ้นกับว่าวัสดุนั้นจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากน้อย โดยที่ ตัวอย่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

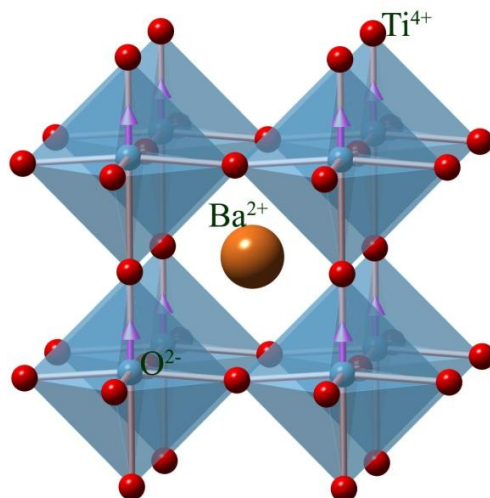
ตารางที่ 1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
สุญญากาศ	1	ไมก้า	5.5
อากาศ	1.0006	ไมล้า	3
เซรามิก	30-7500	น้ำมัน	4

โดยปกติแล้ววัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกตริก (K) ตั้งแต่ 1000 ขึ้นไปถือว่าเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูง หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “วัสดุไอออนที่ไดอิเล็กตริก” เมื่อนำไปค้นกลางระหว่างแผ่นเพลตดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) จะทำให้สามารถเก็บประจุได้มากขึ้น และมีประสิทธิภาพการทำงานมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุที่ไดอิเล็กตริกเป็นสูญญากาศ ดังนั้นการนำไปใช้งานจริงในการประดิษฐ์วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ จึงสามารถลดขนาดของตัวเก็บประจุให้เล็กลงได้ โดยไม่ต้องคำนึงว่าความสามารถในการเก็บประจุจะลดน้อยลง และเหมาะสมกับการนำไปใช้งานด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ หรือนาโนอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นวัสดุไอออนที่ไดอิเล็กตริกจึงได้รับการพัฒนาคุณสมบัติ และมีผู้ศึกษาค้นคว้าวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อที่จะนำไปใช้งานได้จริง โดยปกติแล้ววัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไอออนที่ไดอิเล็กตริกจะมีโครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskites) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นกลุ่มวัสดุที่นำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน วัสดุเพอโรฟสไกต์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงที่สุดกว่า 1000 สามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มด้วยกัน กลุ่มแรกคือเฟอร์โรอิเล็กตริกแบบปกติ (normal-ferroelectric) เช่น $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) และ BaTiO_3 โดยปกติวัสดุกลุ่มนี้จะแสดงค่าไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้าถาวร (permanent electric dipole moment) นั่นคือเมื่อวางวัสดุไว้ในสนามไฟฟ้าไดโพลไฟฟ้าจะจัดเรียงตัวตามทิศของสนามไฟฟ้าภายนอก ส่งผลให้เกิดการตอบสนองทางไดอิเล็กตริก และกลุ่มที่สองคือ เฟอร์โรอิเล็กตริกแบบรีแลกเซอร์ (relaxor-ferroelectric) ได้แก่ $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (PMN), $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (PZN), $\text{Pb}(\text{Sc}_{1/2}\text{Ta}_{1/2})\text{O}_3$ (PST) และ $(\text{Bi}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ วัสดุออกไซด์กลุ่มนี้มีการตอบสนองทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ และภายใต้สนามไฟฟ้าสูง อย่างไรก็ตามค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุทั้งสองกลุ่มนี้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากทำให้เกิดข้อจำกัดต่อการนำไปประยุกต์

ใช้งานในหลายๆ ด้าน (Wu et al., 2002) รวมทั้งการประดิษฐ์เป็นตัวเก็บประจุที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นวัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้กันระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดนอกจากจะมีค่าไดอิเล็กตริกที่สูงแล้วยังต้องมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่เสถียรสามารถทำงานได้เป็นปกติภายใต้สภาวะต่างๆ เพราะถ้าวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมากแล้ว สิ่งประดิษฐ์จะไม่แข็งแรงทนทาน และอาจเสียหายได้ นอกจากนี้วัสดุเพอโรฟสไกต์ที่ใช้งานในขณะนี้ส่วนใหญ่มีตะกั่ว (lead) เป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นพิษต่อมนุษย์และยังทำลายสิ่งแวดล้อม ดังนั้นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ไม่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิในช่วงที่กว้างและไม่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบ จึงเป็นที่ต้องการและได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมาก ปัจจุบันจึงมีการศึกษาเพื่อค้นหาวัดไดอิเล็กตริกใหม่ๆ ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง เปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิน้อย ไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง

ในกลุ่มวัสดุที่กล่าวถึงนี้ วัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงและเปลี่ยนแปลงค่าน้อยมากเมื่ออุณหภูมิและความถี่เปลี่ยน รวมทั้งไม่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ที่ถือได้ว่าเป็นวัสดุไอออนที่ไดอิเล็กตริก ได้แก่ วัสดุในกลุ่มแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) (Subramanian et al., 2000; Patterson et al., 2005; Masingboon et al., 2008; Wang et al., 2010; Ramajo et al., 2010; Yang et al., 2011), กลุ่มนิกเกิลออกไซด์ $\text{Li}_{1-x}\text{Ti}_x\text{Ni}_{1-x-y}\text{O}$ (LTNO) (Wu et al., 2002; Chen et al., 2007; Hsiao et al., 2007; Maensiri et al., 2007), เหล็กออกไซด์ $A(\text{Fe}_{1/2}\text{B}_{1/2})\text{O}_3$ ($A=\text{Ba}, \text{Sr}, \text{Ca}$ and $B=\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Sb}$) (Raevski et al., 2003; Liu et al., 2007; Chung et al., 2008), และคอปเปอร์ออกไซด์ CuO (Sakar et al., 2006; Thongbai et al., 2008; Putjuso et al., 2011)



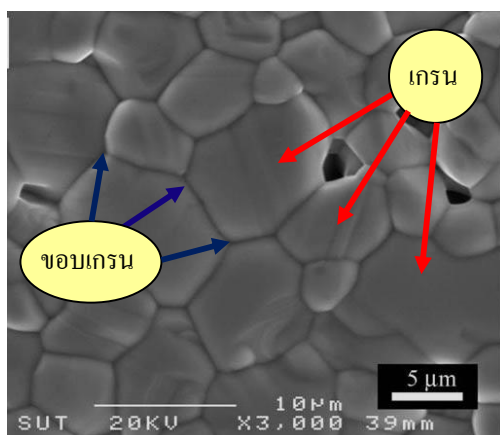
รูปที่ 2 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ของวัสดุ BaTiO_3

(ดัดแปลงจาก <http://www.camsoft.co.kr/CrystalMaker/graphics/hires.htm>)

หลักการ

โดยทั่วไปการอธิบายพฤติกรรมค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีค่าสูงมากในวัสดุไดอิเล็กตริก จะใช้แบบจำลองตัวเก็บประจุแบบขวางกัน (barrier-layer

capacitor, BLC) และการรีแลกซ์เซชันแบบ แมกซ์เวลล์-วากเนอร์ (Maxwell-Wagner) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างกว้างขวางโดยในแบบจำลองตัว



รูปที่ 3 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างของส่วนการนำไฟฟ้าภายในเกรนและส่วนของชั้นฉนวน (ขอบเกรน) (ดัดแปลงจาก Moulson and Herbert., 2003)

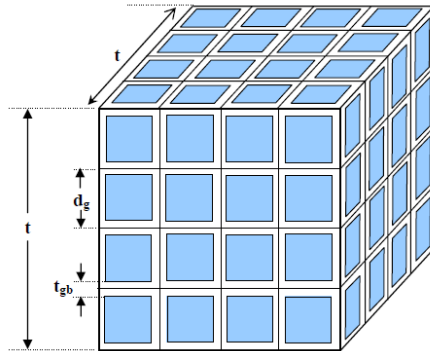
เก็บประจุแบบขวางกันนี้ สาเหตุที่ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าสูงเกิดจากโครงสร้างทางจุลภาคภายในของวัสดุสองส่วนที่ตอบสนองทางไฟฟ้าได้แก่ ส่วนของการนำไฟฟ้าภายในเกรน (Conductive grain) และส่วนของชั้นฉนวนระหว่างเกรน (insulating barrier-layer) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ขอบเกรน “grain boundary” ซึ่งทำหน้าที่กั้นการนำไฟฟ้าระหว่างเกรนดังแสดงในรูปที่ 3

เมื่อพิจารณาไดอะแกรมของโครงสร้างในระดับจุลภาคของวัสดุไดอิเล็กตริกในรูปที่ 3 จะเห็นว่าประกอบด้วยเกรนและขอบเกรนจำนวนมาก และเมื่อพิจารณา

ในระดับมหภาคพบว่าโครงสร้างดังกล่าวสามารถเทียบเคียงได้กับวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งส่งผลให้วัสดุที่มีโครงสร้างทางจุลภาคดังกล่าวมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงมาก (Wu et al., 2003)

จากแผนภาพแบบจำลองโครงสร้างตัวเก็บประจุแบบขวางกันรูปที่ 4 สามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมดได้จากความจุไฟฟ้าของแต่ละส่วน (C_i) โดยสมมติว่า $d_g \gg t_{gb}$ (Moulson and Herbert., 2003) ดังนี้

$$C_i = \frac{\epsilon_{gb} \epsilon_0 d_g^2}{t_{gb}} \quad (3)$$



รูปที่ 4 แผนภาพจำลองแสดงโครงสร้างแบบ BLC (ดัดแปลงจาก Moulson and Herbert., 2003)

เมื่อ d_g คือขนาดของเกรน (Grain size) t_{gb} คือ ความหนาของชั้นฉนวน (boundary layer thickness) ที่กั้นอยู่ระหว่างเกรน และ ϵ_{gb} คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้น

ฉนวน และค่าความจุไฟฟ้าของการต่ออนุกรมตามแนวดิ่งกำหนดโดย

$$C_i / \text{จำนวนเซลล์ในแนวตั้ง} = \frac{\epsilon_{gb} \epsilon_0 d_g^2 t_{gb}}{t / d_g} \quad (4)$$

ความจุไฟฟ้า C ต่อหน่วยพื้นที่ คือ

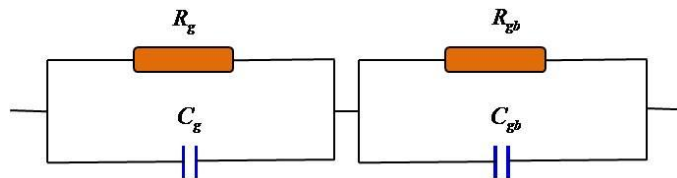
$$C = \frac{\epsilon_{gb} \epsilon_0 d_g}{t t_{gb}} \quad (5)$$

จาก $C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{t}$ สมการที่ (5) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{gb} d_g}{t_{gb}} \quad (6)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง ส่วนของเกรนที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง และส่วนของขอบ ระหว่างเกรนที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ สามารถอธิบายได้ด้วยการรีแลกเซชันแบบแมกซ์เวลล์-วากเนอร์ ในรูปของวงจรไฟฟ้า RC แบบขนานสองชุด แต่ละชุดต่อกันแบบอนุกรม โดยชุดแรก

ใช้แทนส่วน ของเกรนที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำและชุดที่สองแทนส่วนของชั้นฉนวนระหว่างเกรน ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยทั่วไปแล้วความต้านทานและความจุไฟฟ้าของเกรนมีค่าน้อยกว่าชั้นฉนวนระหว่างเกรน



รูปที่ 6 แผนภาพแสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้แทนสมบัติทางไฟฟ้าของเกรน (R_g , C_g) และขอบเกรน (R_{gb} , C_{gb}) ในวัสดุโพลิเอทิลีน (ดัดแปลงจาก Liu et al., 2005)

จากแผนภาพของการนำไฟฟ้าระหว่างเกรนและขอบเกรนดังแสดงในรูปที่ 5 สามารถคำนวณอิมพีแดนซ์ของวงจรได้จากสมการที่ (7) (Sinclair et al., 1989) ดังนี้

$$Z^* = Z' - jZ'' = \frac{1}{R_g^{-1} + j\omega C_g} + \frac{1}{R_{gb}^{-1} + j\omega C_{gb}} \quad (7)$$

เมื่อ (R_g , R_{gb}) และ (C_g , C_{gb}) คือความต้านทานไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าของเกรนและชั้นฉนวนระหว่างเกรนตามลำดับ และจากความสัมพันธ์

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \frac{1}{j\omega C_0 Z^*} \quad (8)$$

จากสมการที่ (7) และ (8) สามารถหาค่าคอมเพล็กซ์ เพอร์มิตติวิตี (complex permittivity) ได้จากสมการที่ (9)

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty' + \frac{\varepsilon_s' - \varepsilon_\infty'}{1 + j\omega\tau} - j\frac{\sigma'}{\omega} \quad (9)$$

เมื่อ ε_s' และ ε_∞' คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำ และ ความถี่สูง ตามลำดับ σ' คือ สภาพนำไฟฟ้ากระแสตรง และ C_0 คือ ความจุไฟฟ้าของที่ว่างระหว่างตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนาน ซึ่งเราเรียกสมการที่ (9) นี้ว่า สมการการรีแลกซ์เซชันแบบ แมกซ์เวลล์-วากเนอร์ กระบวนการนี้เกิดขึ้นในวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) และแต่ละส่วนมีสภาพนำไฟฟ้าที่ต่างกัน เมื่อให้กระแส

ไฟฟ้าไหลผ่านผิวที่มีสภาพนำไฟฟ้าที่ต่างกัน ประจุจะถูกตรึงอยู่บริเวณระหว่างผิว ส่งผลให้เกิดกระบวนการรีแลกเซชันแบบแมกซ์เวลล์-วากเนอร์ ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าแบบกระแสสลับ

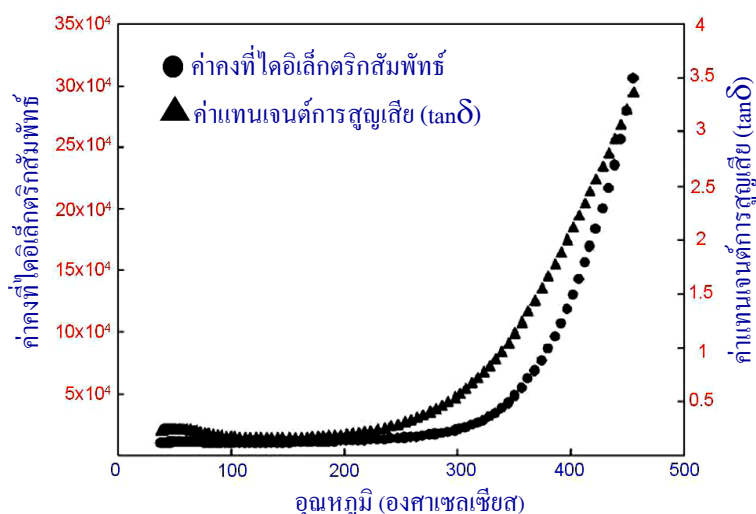
ปัจจุบันแม้ว่าแบบจำลองทั้งสองจะเป็นที่ยอมรับและใช้อธิบายพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวัสดุโพลิเอทิลีนอย่างกว้างขวาง แต่ก็ยังเป็น

ถกเถียงกัน และนำไปสู่การค้นพบแบบจำลองใหม่ๆ ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกให้ดียิ่งขึ้น ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าตัวเก็บประจุที่พบในท้องตลาดทั่วไปส่วนใหญ่ผลิตจากวัสดุเซรามิกในกลุ่มต่างๆต่อไปนี้ เช่น (Ba, Sr)TiO₃ (Moulson and Herbert., 2003) ซึ่งกระบวนการเตรียมมีความยุ่งยากและใช้อุณหภูมิในการเตรียมสูง และในการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะต้องศึกษาค่าแทนเจนต์การสูญเสีย (tanδ) ไปพร้อมกันเนื่องจากเป็นตัวกำหนดความเหมาะสมของวัสดุที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ (Hench and West., 1990)

วัสดุกลุ่มแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต

ในบรรดาวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ได้อิเล็กทริกที่ได้อีกถึงมาแลวั้น $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจมากเป็นพิเศษทั้งนี้เนื่องจากมีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ มีค่าคงที่ได้อิเล็กทริกสูงมาก ประมาณ 10^4 (ที่อุณหภูมิห้อง และในช่วงค่าความถี่ต่ำ กว่า 1 กิโลเฮิร์ตซ์) ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งเทียบเท่ากับค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของวัสดุ PZT หรือ PMN และที่สำคัญค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของ CCTO

มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิ 173 ถึง 325 องศาเซลเซียส ตามรายงานการวิจัยครั้งแรกโดยกลุ่มของ Subramanian (Subramanian et al., 2000) ต่อมา มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ศึกษาพฤติกรรมการมีค่าได้อิเล็กทริกสูง ใน วัสดุ CCTO ทำให้ทราบว่ามีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเผาไหม้ (sintering temperature) การเปลี่ยนแปลงข้อของข้อไฟฟ้า รวมถึงวิธีการเตรียม CCTO เนื่องจากวัสดุ CCTO ส่วนใหญ่เตรียมจากวิธีปฏิกิริยาของแข็ง (solid state reaction) ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยากและยังต้องใช้อุณหภูมิในการเผาไหม้สูง ในปี ค.ศ. 2008 กลุ่มของ Masingboon (Masingboon et al., 2008) ได้รายงานการเตรียมผงนาโน CCTO ที่มีขนาดประมาณ 30 ถึง 100 นาโนเมตร ด้วยวิธีสารละลายไข่ขาว (egg white solution) ซึ่งค่าได้อิเล็กทริกของวัสดุ CCTO ที่เตรียมได้มีค่าสูงประมาณ 10^4 ถึง 2×10^4 ส่วนค่าแทนเจนต์การสูญเสียจะอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 30 ในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 170 องศาเซลเซียส ปี ค.ศ. 2011 กลุ่มของ Jesurani (Jesurani et al., 2011) ได้รายงานค่าเฟอร์โรอิเล็กทริก และค่าแทนเจนต์การสูญเสียประมาณ 10^5 และ 1 ตามลำดับของผงนาโน CCTO ที่เตรียมด้วยวิธีโซเจล ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผาไหม้ต่ำที่อุณหภูมิ 1020 และ 1040 องศาเซลเซียส



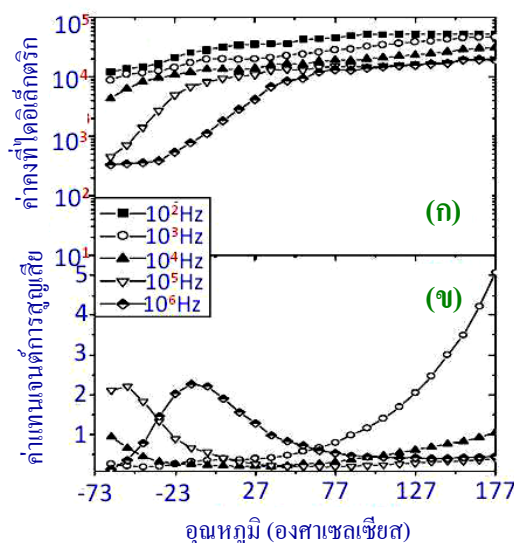
รูปที่ 6 ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกสัมพัทธ์และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ของวัสดุ CCTO ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 450 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ (ดัดแปลงจาก Subramanian et al., 2000)

จากรายงานการเตรียม CCTO ที่กล่าวมาจะเห็นว่าค่าแทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุ CCTO ยังมีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งค่าที่เหมาะสมในการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุนั้นควรมีค่าต่ำกว่า 0.05 เพื่อให้วัสดุ CCTO สามารถนำไปใช้งานได้จริง ปัจจุบันจึงมีนักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มที่ทำการเตรียมวัสดุ CCTO ด้วยเทคนิคใหม่ๆ เพื่อลดค่าแทนเจนต์การสูญเสียในวัสดุ CCTO ให้ต่ำลง เช่น กลุ่มของ Amaral (Amaral et al., 2011) ได้รายงานการลดค่าแทนเจนต์การสูญเสียด้วยการเจือ TiO_2 ในวัสดุ CCTO กลุ่มของ Patterson (Patterson et al., 2005) ได้ศึกษาการลดค่าแทนเจนต์การสูญเสียในวัสดุ CCTO ที่เจือด้วย ZrO_2 และกลุ่มของ Yang (Yang et al., 2011) ได้รายงานค่าแทนเจนต์การสูญเสียที่ลดลงในวัสดุ CCTO ที่เจือด้วย SrCO_3 นอกจากนี้กลุ่มของ Wang และกลุ่มของ Ramajo (Wang et al., 2010; Ramajo et al., 2010) ได้รายงานค่าแทนเจนต์การสูญเสียที่ลดลงโดยการทำคอมโพสิต (composite) ระหว่าง CCTO และ CaTiO_3

วัสดุกลุ่มนิเกิลออกไซด์

ปี ค.ศ. 2002 กลุ่มของ Wu (Wu et al., 2002) ได้รายงานการค้นพบวัสดุเฟอร์ไรต์ไดอิเล็กตริก NiO ที่เจือด้วยสาร Li และ Ti เขียนแทนด้วยสูตรเคมีเป็น $\text{Li}_x\text{Ti}_y\text{Ni}_{1-x-y}\text{O}$ (LTNO) วัสดุ LTNO มีโครงสร้างไม่เป็นเพอโรฟสไกต์ (non-perovskite) มีค่าเฟอร์ไรต์

ไดอิเล็กตริกและแทนเจนต์การสูญเสียอยู่ระหว่าง 10^4 ถึง 10^5 และ 0 ถึง 5 ตามลำดับ ในช่วงความถี่ 10^2 ถึง 10^4 เฮิร์ตซ์ และค่าไดอิเล็กตริกจะค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ -73 ถึง 177 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) และ (ข) รวมทั้งมีพฤติกรรมทางไดอิเล็กตริกคล้ายกับ CCTO มาก แต่ไม่เป็นวัสดุเฟอร์ไรต์ไดอิเล็กตริก (non-ferroelectric material) และไม่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากวัสดุเฟอร์ไรต์ไดอิเล็กตริกกลุ่มนี้ยังมีค่าแทนเจนต์การสูญเสียที่สูงยังไม่เหมาะในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นในปี ค.ศ. 2006 กลุ่มของ Jana (Jana et al., 2006) ได้เตรียมวัสดุ $\text{K}_{1-x}\text{Ti}_x\text{Ni}_{1-y}\text{O}$ (KTNO) ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงประมาณ 10^5 และค่าแทนเจนต์การสูญเสียต่ำ 0.03 ถึง 0.045 ในช่วงความถี่ 100 เฮิร์ตซ์ ถึง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ต่อมาในปี ค.ศ. 2007 กลุ่มของ Chen (Chen et al., 2007) ได้เตรียม $\text{Zr}_{0.1}\text{Ni}_{0.8}\text{O}$ และ $\text{Zr}_{0.2}\text{Ni}_{0.6}\text{O}$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง ที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงประมาณ 10^4 ซึ่งพฤติกรรมเฟอร์ไรต์ไดอิเล็กตริกสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองตัวเก็บประจุแบบขวางกัน และในปี ค.ศ. 2007 กลุ่มของ Maensiri (Maensiri et al., 2007) ได้เตรียมวัสดุ NiO ที่เจือด้วย Li และ Ti ที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงประมาณ 10^4 ถึง 10^5 และค่าแทนเจนต์การสูญเสียอยู่ในช่วง 2.95 ถึง 10.62 ที่อุณหภูมิห้อง และความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

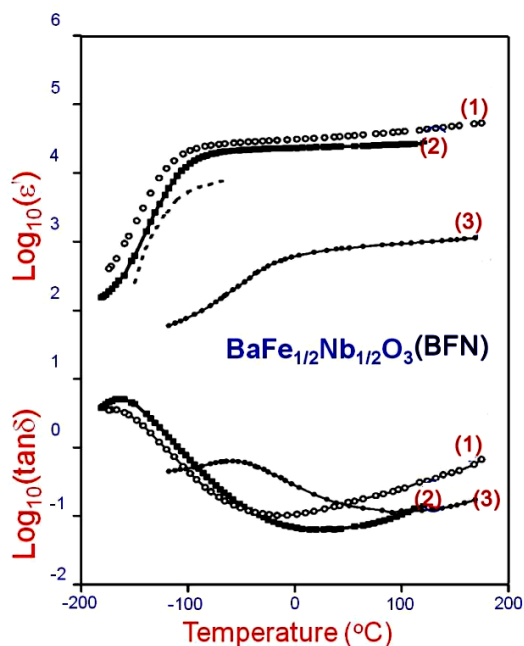


รูปที่ 7 (ก) การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ (ข) แทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุ LTNO ในช่วงความถี่จาก 100 เฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ (ดัดแปลงจาก Wu et al., 2002)

วัสดุกลุ่มเหล็กออกไซด์

ในปี ค.ศ. 2003 กลุ่มของ Raevski (Raevski et al., 2003) ได้รายงานพฤติกรรมการมีค่าไจแอนท์ไดอิเล็กตริกในวัสดุ $\text{BaFe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ (BFN) ซึ่งมีค่าประมาณ 10^4 ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่ไม่เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริก และไม่มีความเป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 8 นอกจากนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -73 ถึง 177 องศาเซลเซียส รวมทั้ง

มีพฤติกรรมทางไดอิเล็กตริกคล้ายกับ CCTO มาก ต่อมา กลุ่มของ Liu (Liu et al., 2007) ได้ศึกษาพฤติกรรมของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก $\text{CaFe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ (CFN) ซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียสูงประมาณ 2000 และ 1 ตามลำดับ และในปี ค.ศ. 2008 กลุ่มของ Chung (Chung et al., 2008) ได้รายงานวัสดุไจแอนท์ไดอิเล็กตริก $\text{BaFe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ (BFN) ที่เจือด้วย Bi ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง 1000



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และแทนเจนต์การสูญเสียที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ของวัสดุ BFN ที่มีค่าสภาพต้านทาน (ρ) เท่ากับ 10^7 (1), 10^8 (2) และ (3) โอห์มเซนติเมตรตามลำดับ (ดัดแปลงจาก Raevski et al., 2003)

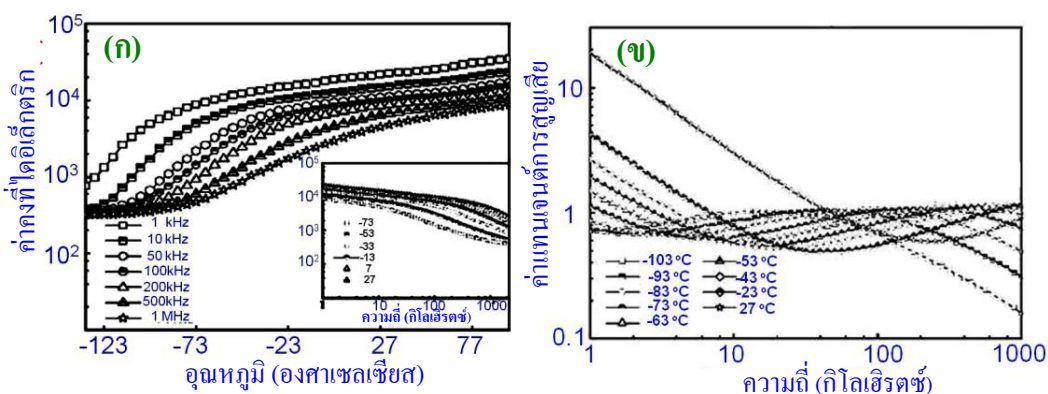
วัสดุกลุ่มคอปเปอร์ออกไซด์

นอกจากนี้ยังมีวัสดุอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งมีรายงานการค้นพบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงมากประมาณ 10^5 และ แทนเจนต์การสูญเสียมีค่าประมาณ 0.3 วัดที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ อีกทั้งยังมีการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกน้อยมากในช่วงอุณหภูมิ -73 ถึง 80 องศาเซลเซียส วัสดุที่กล่าวถึงนี้ คือคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) มีรายงานการค้นพบครั้งแรกโดยกลุ่มของ

Sarkar ในปี ค.ศ. 2006 (Sarkar et al., 2006) ดังแสดงในรูปที่ 9 คุณสมบัติที่ได้เปรียบของ CuO เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุไจแอนท์ไดอิเล็กตริกชนิดอื่นๆ คือ เป็นวัสดุสารประกอบที่มีองค์ประกอบไม่ซับซ้อน มีราคาถูก และง่ายต่อการเตรียมให้ได้องค์ประกอบที่บริสุทธิ์ ปี ค.ศ. 2008 กลุ่มของ Thongbai (Thongbai et al., 2008) ได้รายงานการศึกษาผลของ เกรน ขอบเกรน และสนามไฟฟ้ากระแสตรง ต่อค่าไจแอนท์ไดอิเล็กตริกของวัสดุ CuO

ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยที่พฤติกรรมของค่าไดอิเล็กทริกสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองตัวเก็บประจุแบบขางกัน และมีค่าขึ้นกับขนาดของเกรนอย่างมาก และผลจากการศึกษาด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงพบว่า เมื่อความต่างศักย์เพิ่มจาก 0 ถึง 3 โวลต์ ค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุจะเพิ่มขึ้นและสอดคล้องกับการลดลงของความต้านทานของขอบเกรน และเมื่อไม่นานมานี้มีรายงานการศึกษาผลของความต่างศักย์ย้อนกลับกระแสตรง (Dc bias voltage) และแรงกดในแนวตั้งฉาก (Uniaxial compressive stress) ต่อค่าไดอิเล็กทริกของ CuO เตรียมด้วยวิธีสารละลาย โดย

กลุ่มของ Thanin (Thanin et al., 2011) พบว่าค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ CuO ที่เตรียมได้มีค่าประมาณ 10^4 และค่าแทนเจนต์การสูญเสียอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ จากการศึกษพบว่าผลของความต่างศักย์ย้อนกลับกระแสตรงและแรงกดในแนวตั้งฉากมีผลทำให้ประจุอิสระ (free charge) ถูกกระตุ้นได้มากที่ความถี่ต่ำ จาก 1 เฮิร์ตซ์ ถึง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ (มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่ความถี่ต่ำ) และเมื่อประจุอิสระได้รับพลังงานมากพอก็จะทำให้ข้ามชั้นฉนวนของขอบเกรนซึ่งมีผลทำให้ค่าไดอิเล็กทริกลดลงและสอดคล้องกับค่าแทนเจนต์การสูญเสียที่มากขึ้น



รูปที่ 9 (ก) การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความถี่ (รูปเล็ก) ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ข) และ แทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ในช่วงความถี่จาก 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ (ดัดแปลงจาก Sarkar et al., 2006)

จากพฤติกรรมของวัสดุไดอิเล็กทริกที่กล่าวมาจะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเหล่านี้มีค่าสูงโดยเฉลี่ยแล้วประมาณ 10^5 และมีค่าแทนเจนต์การสูญเสียประมาณ 7 ที่อุณหภูมิห้อง และที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าแทนเจนต์การสูญเสียและช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

วัสดุ (Materials)	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)	ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย (tan δ)	ช่วงอุณหภูมิที่ไม่มีการ เปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
CaCu ₃ Ti ₄ O ₁₂	10286	0.067	30 ถึง 325 °C
Li _x Ti _y Ni _{1-x-y} O	100000	1.00	-73 ถึง 177 °C
BaFe _{1/2} Nb _{1/2} O	25000	0.5	-100 ถึง 180 °C
CuO	10000	15	-93 ถึง 97 °C

ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าวัสดุโพลีเมอร์ไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดมีพฤติกรรมทางไดอิเล็กตริกที่คล้ายกัน แต่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ออุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งแบบจำลองที่อธิบายการมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงของวัสดุโพลีเมอร์ไดอิเล็กตริกเหล่านี้จะใช้แบบจำลองตัวเก็บประจุแบบขวางกัน และแบบจำลองการรีแลกซ์เซชันแบบแมกซ์เวลล์-วากเนอร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าแบบจำลองทั้งสองนี้จะใช้อธิบายพฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริกได้ดี แต่ก็ยังมีการค้นคว้าวิจัยเพื่อศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆ ที่คาดว่าจะส่งผลต่อพฤติกรรมดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ผลของอิเล็กโทรด ผลของการนำไฟฟ้ากระแสตรง รวมไปถึงผลของเกรน และชั้นฉนวนที่มีผลต่อสมบัติของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เพื่อนำไปพัฒนาให้ได้วัสดุที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้นเมื่อนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

สรุป

จากที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าวัสดุโพลีเมอร์ไดอิเล็กตริกเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงตั้งแต่ 1000 ขึ้นไป และสามารถนำไปพัฒนางานด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพสูงได้ ซึ่งในปัจจุบันวัสดุไดอิเล็กตริกที่นำมาใช้งานเป็นตัวเก็บประจุได้จริงนั้นส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่มี BaTiO_3 เป็นองค์ประกอบซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมาก อีกทั้งยังมีการกระบวนการเตรียมที่ซับซ้อนและต้องใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์สูง ในขณะที่วัสดุโพลีเมอร์ไดอิเล็กตริก กลุ่ม CCTO, LTNO, BFN และ CuO ต่างก็ มีค่าไดอิเล็กตริกสูงประมาณ 10^4 และมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างและกระบวนการเตรียมง่ายไม่ซับซ้อน (Sinclair et al., 2002, Sarkar et al., 2006) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเหล่านี้ไปพัฒนาในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะการผลิตเป็นตัวเก็บประจุเพื่อใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น และยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตให้ต่ำ ลง แต่ที่ยังเป็นปัญหาสำคัญของวัสดุโพลีเมอร์ไดอิเล็กตริกก็คือมีค่าแทนเจนต์การสูญเสียสูง ซึ่งโดยปกติค่าแทนเจนต์การสูญเสียที่เหมาะสมในการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุควรอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.05

ดังนั้นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดหากมีการนำวัสดุโพลีเมอร์ไดอิเล็กตริกเหล่านี้ไปใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จะต้องหาวิธีลดค่าแทนเจนต์การสูญเสียลง ซึ่งข้อประเด็นปัญหานี้ยังคงเป็นโจทย์ที่ท้าทายนักวิจัยต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Amaral, F., Costa, L. C. and Valente, M. A. (2011). Decrease in dielectric loss of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ by the addition of TeO_2 . *J. Non-cryst. Solids*. 357: 775–781.
- Chen, K., Yuan, S. K., Li, P. L., Gao, F., Liu, J., Li, G. L., Zhao, A. G., Lu, X. M., Liu, J. M. and Zhu, J. S. (2007). *J. Appl. Phys.* 102: 034103.
- Chung, C.-Y., Chang, Y.-S., Chen, G.-J., Chung, C.-C. and Huang, T.-W. (2008). Effects of bismuth doping on the dielectric properties of $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$ ceramic. *Solid State Commun.* 145: 212-217.
- Hench, L. L. and West, J. K. (1990). *Principles of electronic ceramics*. New York: Wiley.
- Jana, P. K., Sarkar, S. and Chaudhuri, B. K. (2006). Low loss dielectric and electrical transport behavior of $\text{K}^{1-x}\text{Ti}_x\text{Ni}_{1-x-y}\text{O}$ system. *Appl. Phys. Lett.* 88: 182901.
- Jesurani, S., Kanagesan, S., Velmurugan, R., Thirupathi, C., Sivakumar, M. and Kalaivani, T. (2011). Nanoparticles of the giant dielectric material, calcium copper titanate from a sol-gel technique. *Mater. Lett.* 65: 3305–3308.
- Liu, J., Duan, C., Mei, W. N., Smith, R. W. and Hardy, J. R. (2005). Dielectric properties and Maxwell-Wagner relaxation of compounds $\text{ACu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ($\text{A}=\text{Ca}, \text{Bi}_{2/3}, \text{Y}_{2/3}, \text{La}_{2/3}$). *J. Appl. Phys.* 98: 093703.

- Liu, Y. Y., Chen, X. M., Liu, X. Q. and Li, L. (2007). Dielectric relaxations in $\text{Ca}(\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ complex perovskite ceramics. *Appl. Phys. Lett.* 90: 262904.
- Maensiri, S., Thongbai, P. and Yamwong, T. (2007). Giant dielectric response in (Li, Ti)-doped NiO ceramics synthesized by the polymerized complex method. *Acta Mater.* 55: 2851–2861.
- Masingboon, C., Maensiri, S., Yamwong, T., Anderson, P. L., Seraphin, S. (2008). Nanocrystalline $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ powders prepared by egg white solution route: synthesis, characterization and its giant dielectric properties. *Appl. Phys. A* 91: 87–95.
- Moulson, A. J. and Herbert, J. M. (2003). *Electroceramics: Material. Properties. Application.* New York: John Wiley & Sons. p150-155.
- Patterson, E. A., Kwon, S. and Huang, C. C. (2005). Effects of ZrO_2 additions on the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4012}$. *Appl. Phys. Lett.* 87: 182911–182913.
- Putjuso, T., Manyum, P., Yimnirun, R., Yamwong, T., Thongbai, P. and Maensiri, S. (2011). Giant dielectric behavior of solution-growth CuO ceramics subjected to dc bias voltage and uniaxial compressive stress. *Solid State. Sci.* 13-158-162.
- Raevski, I. P., Prosandeev, S. A., Bogatin, A. S., Malitskaya, M. A. and Jastrabik, L. (2003). High dielectric permittivity in $\text{AFe}_{1/2}\text{B}_{1/2}\text{O}_3$ nonferroelectric perovskite ceramics (A=Ba, Sr, Ca; B=Nb, Ta, Sb). *J. Appl. Phys.* 93: 4130.
- Ramajo, L., Parraa, R., Varela, J. A., Reboredo, M. M., Ramire M .A. and Castro, M. S. (2010). Influence of vanadium on electrical and microstructural properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}/\text{CaTiO}_3$. *J. Alloys Compd.* 497: 349–353.
- Sarkar, S., Jana, P. K., Chaudhuri, B. K. and Sakata, H. (2006). Copper (II) oxide as a giant dielectric material. *Appl. Phys. Lett.* 89: 212905.
- Sinclair, D. C., Adams, T. B., Morrison, F. D. and West, A. R. (2002). $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$: One-step internal barrier layer capacitor. *Appl. Phys. Lett.* 80: 2153.
- Subramanian, M. A., Dong, L., Duan, N., Reisner, B. A. and Sleight, A. W. (2000). High dielectric constant in $\text{ACu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ and $\text{ACu}_3\text{Ti}_3\text{FeO}_{12}$ Phases. *J. Solid State Chem.* 151: 323–325.
- Thongbai, P., Maensiri, S. and Yamwong, T. (2008). Effect of grain, grain boundary, and dc electric field on giant dielectric response in high purity CuO ceramics. *J. Appl. Phys.* 104: 1.
- Wang, C.-M., Lin, S.-Y., Kao, K.-S., Chen, Y.-C. and Weng, S.-C. (2010). Microstructural and electrical properties of CaTiO_3 - $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics *J. Alloys Compd.* 491: 423–430.
- Wu, J., Nan, C. W., Lin, Y. and Deng, Y. (2002). Giant dielectric permittivity observed in Li and Ti doped NiO. *Phys. Rev. Lett.* 89:217601.
- Wu, J. B., Nan, J., Nan, C. W., Lin, Y., Deng, Y. and Zhao, S. (2003). Analysis of AC electrical properties of (Li and Ti)-doped NiO. *Mater. Sci. Eng. B* 99: 294-297.
- Yang, Z., Zhang, L., Chao, X., Xiong, L. and Liu, J. (2011). High permittivity and low dielectric loss of the $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics. *J. Alloys Compd.* 509: 8716-8719.