

บทที่ 2 การทบทวนเอกสารทางวิชาการ

สมบัติเฉพาะของเซรามิกแต่ละชนิดเป็นส่วนที่สำคัญยิ่ง สมบัติเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดการนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น เซรามิกที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปเรียกว่า เทอร์มิสเตอร์ (thermistors) เซรามิกที่ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างสัญญาณเวลาและความถี่เรียกว่า เรโซเนเตอร์ (resonators) เป็นต้น การจะนำเซรามิกชนิดใดไปใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้นั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาตั้งแต่ ขั้นตอนการเตรียมผง การขึ้นรูป การเผาซินเตอร์ และการตรวจสอบพฤติกรรมทางไฟฟ้าเพื่อประเมินศักยภาพของเซรามิกที่จะนำมาใช้งานได้

วัสดุไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์ได้รับความสนใจและมีการพัฒนามาเป็นระยะเวลาานาน ซึ่งส่วนใหญ่วัสดุเหล่านี้จะมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ประมาณ 20-90 โดยวัสดุบางตัวจะให้ค่าตัวประกอบคุณภาพ (QF) ที่สูงมาก และมีอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ แต่โดยทั่วไปวัสดุพวกนี้จะมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ต่ำและมีค่าตัวประกอบคุณภาพสูง ตัวอย่างของวัสดุไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์ทางการค้าพร้อมกับสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญได้แสดงไว้แล้วในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงวัสดุในกลุ่มไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์ที่ใช้ในทางการค้า[1]

ชนิดวัสดุ	ϵ_r	QF (GHz)	f (ppm/ $^{\circ}$ C)
MgTiO ₃ -CaTiO ₃	21	55,000	0
Ba(Sn,Mg,Ta)O ₈	25	200,000	0
Ba(Zn,Nb)O ₃ – Ba(Zn,Ta)O ₃	30	120,000	0
Ba(Zr,Zn,Ta)O ₃	30	100,000	0
(Zr,Sn)TiO ₄	38	50,000	0
Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀	40	35,000	0
BaO-PbO-Nd ₂ O ₃ -TiO ₂	90	5,000	0

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า เซอร์โคเนียมดีททาเนต (Zr,Sn)TiO₄ ที่เจือด้วยดีบุก(Sn) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบ ABO₄ ก็เป็นหนึ่งในวัสดุไดอิเล็กตริกที่น่าสนใจและมีองค์ประกอบของ เซอร์โคเนียมและดีททาเนียมในสูตรโมเลกุลดังกล่าว ซึ่งให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ค่อนข้างสูงแต่มีค่าตัวประกอบคุณภาพที่ต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุในกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นแบบ perovskites (ABO₃)

2.1 ความเป็นมาของสารเซอร์โคเนียมดีททาเนต

เซอร์โคเนียมดีททาเนต (Zr_xTi_{2-x}O₄) เป็นหนึ่งในวัสดุที่ได้รับความสนใจในการศึกษาและพัฒนาอย่างมากพอสมควร เนื่องจากเป็นเซรามิกพื้นฐานที่มักใช้ร่วมกับสารอื่นๆ เช่น ตะกั่วโดยจะอยู่ในรูปของเลดเซอร์โคเนียมดีททาเนต (Pb(Zr,Ti)O₃ หรือ PZT) หรือ แบเรียมโดยจะอยู่ในรูปของแบเรียมเซอร์โคเนียมดีททาเนต (Ba(Zr,Ti)O₃ หรือ BZT) ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ perovskite เป็นต้น[2] จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่า ได้เริ่มมีการศึกษาลักษณะโครงสร้างของ เซอร์โคเนียมดีททาเนตที่มีสูตรโมเลกุลเป็น ZrTiO₄ หรือ ZT มาตั้งแต่ปี ค.ศ.1954 แล้ว โดย Coughanour และ De Presse[2] ได้พบว่าเมื่อมีการลดลงของอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะทำให้ได้ เซอร์โคเนียมดีททาเนตที่มีค่าแลกทิสแตกต่างกันด้วย ต่อมาเมื่อ ค.ศ. 1965 Cocco และ Torriano ได้อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวว่าน่าจะเกิดจากการเรียงตัวของไอออนแบบที่เป็นระเบียบสลับกับแบบที่ไม่เป็นระเบียบ[2]

ต่อมาอีก 2 ปี Newnham และคณะ[2] ได้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของ เซอร์โคเนียมดีททาเนตโดยเฉพาะและพบว่าการลดอุณหภูมิของเซอร์โคเนียมดีททาเนตที่กำลังถูกเผาอยู่ลงอย่างรวดเร็วจะทำให้ได้เซอร์โคเนียมดีททาเนตที่มีโครงสร้างเป็นแบบ α -PbO₂ ในกลุ่มสเปสแบบ *Pbcn* โดยมีการเรียงตัวของอะตอมเซอร์โคเนียมและดีททาเนียมอย่างไม่เป็นระเบียบโดย ไอออนบวกจะถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนจนมีรูปร่างเป็นแบบ ออกตะฮีดรอล (octahedral) ซึ่งได้รับการยืนยันจากงานวิจัยของ Harari และคณะ[3] ในปีถัดมาเช่นกัน และต่อมาก็ได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อยืนยันสมมติฐานดังกล่าวอีกหลายครั้ง

จนกระทั่งถึงปี ค.ศ. 1988 Ikawa และคณะ[4] ก็ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมในการก่อเกิดเฟสของเซอร์โคเนียมดีททาเนตที่อุณหภูมิต่ำ โดยได้ทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ และพบว่า เซอร์โคเนียมดีททาเนตจะเกิดการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในอัตราส่วนที่เหมาะสมในแนวแกน *a'* ของเซลล์หน่วย ในขณะที่เมื่อพิจารณาตามแนวแกน *b* ของเซลล์หน่วยจะพบการ

บิดเบี้ยวของแนวการจัดเรียงอะตอมโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ความผิดปกติที่เกิดขึ้นยังไม่สามารถอธิบายได้โดยใช้ความรู้พื้นฐานทางโครงสร้างเคมี

ดังนั้นเพื่อเป็นการสร้างความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของผลึกที่มีลักษณะเป็นแบบนี้ Yamada และคณะ[4] จึงได้พยายามทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการแปลงโครงสร้างผลึกแล้วคำนวณกลับมาเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และพบว่าการจัดเรียงตัวของอะตอมเซอร์โคเนียมกับอะตอมของิตาเนียมจะเป็นแบบ Zr-Zr-Ti-Ti โดยมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ที่อยู่ในกลุ่มสเปสแบบ $P_{\overline{1}11}^{bc21}$ โดยจะพบความไม่เป็นระเบียบของการจัดเรียงอะตอมเกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรน (grain boundaries) จึงได้ตั้งสมมติฐานว่าอะตอมของิตาเนียมน่าจะมีพันธะกับออกซิเจนได้ถึง 6 อะตอม ในขณะที่อะตอมของเซอร์โคเนียมจะมีพันธะกับออกซิเจนได้ถึง 8 อะตอม และต่อมาก็ได้มีการใช้วิธี X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียมิตาเนตในรายละเอียดและพบว่า เซอร์โคเนียมิตาเนตที่เกิด ณ อุณหภูมิสูงจะมีความแตกต่างกับเซอร์โคเนียมิตาเนตที่เกิด ณ อุณหภูมิต่ำอย่างสิ้นเชิง โดยจะสามารถสังเกตได้จากพีคที่แสดงเส้นสเปกตรัมของออกซิเจนในชั้น 1s[5]

ในปี ค.ศ.1992 กระบวนการเตรียมเซอร์โคเนียมิตาเนตด้วยวิธีทางเคมีเริ่มได้รับความสนใจมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นวิธีการตกตะกอนร่วม หรือวิธีโซล-เจล[6] ซึ่งจะทำให้ได้เซอร์โคเนียมิตาเนตที่มีความบริสุทธิ์สูง มีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ (ประมาณ 10-15 μm) และใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ที่ต่ำ (ประมาณ 650 $^{\circ}\text{C}$) ในขณะที่การเตรียมเซอร์โคเนียมิตาเนตด้วยวิธีมิกซ์ออกไซด์แบบดั้งเดิมนั้นจำเป็นต้องเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1200 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 1600 $^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ได้ผงเซอร์โคเนียมิตาเนตคุณภาพดีและยังได้ศึกษาถึงจลนพลศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยาของเซอร์โคเนียมิตาเนตโดยใช้พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของ Avrami(n) ที่ได้จากเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล เทอร์มอล อนาไลซิส (Differential thermal analysis หรือ DTA) และพบว่าสามารถใช้สมการลำดับที่ 1 ได้พอดีเพราะสอดคล้องกับภาพถ่ายที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ศึกษาโดย Navio และคณะ[7-8]

ในปีเดียวกันนี้ Khairulla และคณะ[9] ได้ทำการเตรียมผงเซอร์โคเนียมิตาเนตด้วยการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 $^{\circ}\text{C}$ แล้วจึงเตรียมเป็นเซรามิกด้วยการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ

1550 °C โดยใช้ระยะเวลาเผาแช่นาน 4 ชั่วโมง และพบว่าจะได้เซรามิกที่มีความหนาแน่นประมาณร้อยละ 62-65 ของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี และยังสามารถตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งพบว่ามีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์อยู่ในช่วงประมาณ 14-21 โดยมีค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกน้อยกว่า 1×10^{-4} และเมื่อเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียม-ติตานิเตดด้วยวิธีมิกซ์ออกไซด์และตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 1.5 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่ามีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ประมาณ 26 โดยมีค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกประมาณ 2.5×10^{-3} ในขณะเดียวกัน Christoffersen และ Davies[15] ก็ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียมติตานิเตดที่มีอัตราส่วนของเซอร์โคเนียมต่อติตานิเยมเป็นแบบ 1:1 และ 5:7 โดยพบว่าการจัดเรียงตัวของอะตอมเซอร์โคเนียมและติตานิเยมในแนวแกน a ของเซลล์หน่วยจะเป็นแบบ ZTTZTT ตามลำดับ

เมื่อปี ค.ศ.1993 Azough และคณะ[11] ได้ทำการเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียมติตานิเตดที่มีอัตราส่วนของเซอร์โคเนียมต่อติตานิเยมเป็นแบบ 1:1 ($ZrTiO_4$) เปรียบเทียบกับเซรามิกของเซอร์โคเนียมติตานิเตดที่มีอัตราส่วนของเซอร์โคเนียมต่อติตานิเยมเป็นแบบ 5:7 ($Zr_5Ti_7O_{24}$) ด้วยการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1400 °C โดยมีระยะเวลาเผาแช่นาน 1 ชั่วโมงและทำการเปลี่ยนแปลงอัตราขึ้น-ลงของอุณหภูมิเพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยดังกล่าวด้วยการใช้วิธีรามานสเปกตรัม (Raman Spectrum) และได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่าความแตกต่างของเส้นสเปกตรัมที่ตรวจพบนั้นเกิดจากไอออนของ Zr^{4+} และ Ti^{4+} ที่มีการกระจายตัวของไอออนแบบสุ่ม (random distribution) เพราะมีตำแหน่งของไอออนและการสั่นของแลตทิซที่ต่างกัน ในปีเดียวกันนี้ Kudesia[10] ได้นำผลการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) ของเส้นสเปกตรัมในย่านอินฟราเรดมาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแบบคราเมอร์-โครนิค (Kramers-Kronig analysis) และพบว่าเส้นสเปกตรัมที่ได้จะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซอร์โคเนียมติตานิเตด

ในปี ค.ศ. 1994 Zhang และคณะ[12] ได้ทำการศึกษาถึงความเสถียรของโครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียมติตานิเตดที่เจือด้วยอลูมิเนียมแทนทาลัมออกไซด์ ($AlTaO_2$) และพบว่าอลูมิเนียมแทนทาลัมออกไซด์สามารถจะเข้าไปแทนที่ยังตำแหน่งอะตอมของติตานิเยมได้โดยที่ $ZrTiO_4$ จะมีสูตรโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไปเป็น $Zr_x(Al_{0.5}Ta_{0.5})_{2-x}O_4$ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรมาก ณ อุณหภูมิสูงโดยในกรณีที่ x มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.375 ถึง 1.03 เซอร์โคเนียมติตานิเตดจะมีโครงสร้างเป็นแบบ $\alpha-PbO_2$ ที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบ ส่วนในกรณีที่ x มี

ค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.67 ถึง 1.03 เซอร์โคเนียมดีททาเนตจะมีการจัดเรียงตัวของไอออนบวกอย่างเป็นระเบียบแบบสองชั้น (double) ในแนวแกน b ของเซลล์หน่วย ในปีเดียวกันนี้ Christoffersen [14 -17] ได้ทดลองเจือดีบุก (Sn) ลงไปในเซอร์โคเนียมดีททาเนตให้ได้สูตรโมเลกุลเป็น $Zr_{0.85}Sn_{0.15}TiO_4$ และพบว่าจะมีเฟสของดีบุกปรากฏอยู่ที่บริเวณขอบเกรนและทำให้ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของสารดังกล่าวมีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่าในกรณีของเซอร์โคเนียมดีททาเนตบริสุทธิ์ ต่อมา Bhattacharya และคณะ[18] ได้ทำการเตรียมผงเซอร์โคเนียมดีททาเนตโดยการใช้อุณหภูมิสูง-เจด ด้วยการใช้อุณหภูมิเผาแคลไซน์ที่ 400°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดเท่าที่มีการรายงานมา แล้วตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เตรียมได้ด้วยการใช้เทคนิค DTA และกล้อง SEM เพื่อยืนยันผลการทดลองดังกล่าว

ในปี ค.ศ. 1995 Park และคณะ[21-22] ได้ทำการทดลองเจือดีบุก (Sn) ลงไปในเซอร์โคเนียมดีททาเนต เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะโครงสร้างของเซอร์โคเนียมดีททาเนตกับสมบัติไดอิเล็กตริกและพบว่าเมื่อค่าสภาพยอมสัมพันธ์กับค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น ความยาวตามแนวแกน c ของเซลล์หน่วยก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้าม เมื่ออุณหภูมิลดลงความยาวตามแนวแกน c กลับมีค่าเพิ่มขึ้น ณ ความถี่ที่สารตัวอย่างเกิดการสั่นพ้องพอดี ในปีเดียวกัน Chang และคณะ[19-20] ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของเซอร์โคเนียมดีททาเนตบนแผ่นซิลิกอนชนิดพี โดยใช้อุณหภูมิวิทยุ (radio-frequency) ณ อุณหภูมิห้องและทำการศึกษาถึงผลของอัตราส่วนของ O_2/Ar ที่มีต่อสมบัติของ $Al/ZrTiO_4/Si$ และพบว่า ค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้นี้มีค่าประมาณ 2.34-2.26 และมีค่าสภาพยอมสัมพันธ์อยู่ในช่วง 20-16 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าลักษณะผลึกเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะมีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นของประจุที่อยู่ในบริเวณกึ่งกลางแผ่นฟิล์มมากกว่าผลกระทบที่เกิดจากอะตอมของออกซิเจนและยังเป็นตัวกำหนดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่รั่วไหลในวัสดุอีกด้วย

ในปี ค.ศ. 1996 Azough และคณะ[23] สามารถเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียมดีททาเนตที่มีความหนาแน่นสูงถึงร้อยละ 93 ของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีได้ โดยพบว่าเซรามิกที่ได้มีค่าสภาพยอมสัมพันธ์ที่สูงถึง 2000 ณ ความถี่ 5 จิกะเฮิรตซ์ และสรุปว่าค่าดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการเตรียมและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงเซอร์โคเนียมดีททาเนตที่นำมาใช้เป็นสำคัญ ต่อมา Bhattachaya และคณะ[24-25] ได้ทำการเตรียมผงเซอร์โคเนียมดีททาเนตโดยวิธีไฮล-เจดแบบที่เตรียมจากเจดของเซอร์โคเนียมและเจดของดีททาเนียมที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C

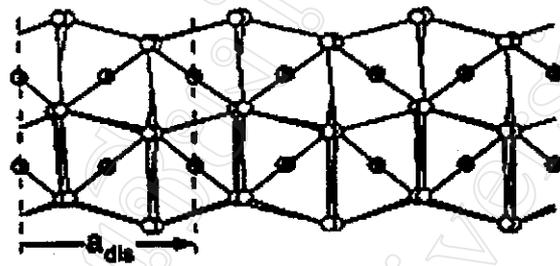
ตามลำดับซึ่งผงที่เตรียมได้จะมีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 ถึง 50 ไมโครเมตร จากนั้นจึงทำการเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียมดีตาเนตที่มีรูปร่างเป็นแบบแท่งกลมทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2 ถึง 1.2 มิลลิเมตร ด้วยการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100. °ซ ในปีเดียวกัน Park และคณะ [26-28] ได้ทำการเตรียมเซอร์โคเนียมดีตาเนตจากวิธีการมิกซ์ออกไซด์และพบว่า เซอร์โคเนียมดีตาเนตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเมื่อทำการเผาแคลไซน์ซ้ำกันหลายๆ ครั้ง โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงจากคิวบิกไปเป็นแบบเตตระโกนอล และออร์โธโรอมิก โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความยาวตามแนวแกน c ของเซลล์หน่วยตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 1997 Yung และคณะ[29-31] ได้ทำการศึกษาถึงผลของความดันและสนามไฟฟ้าที่มีต่อลักษณะโครงสร้างของเซอร์โคเนียมดีตาเนตโดยการใช้เทคนิค XRD เพื่อศึกษาธรรมชาติของโครงสร้างแบบที่ไม่ได้สัดส่วน และพบว่าไม่เฉพาะความดันและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเท่านั้นที่มีผล การเพิ่มสนามไฟฟ้ากระแสตรง (d.c.) ก็สามารถทำให้เซอร์โคเนียมดีตาเนตมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากโครงสร้างผลึกแบบที่ไม่ได้สัดส่วน (incommensurate) ไปเป็นโครงสร้างแบบมีสัดส่วน (commensurate) ได้ เมื่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความดันมีค่าประมาณ -9.0 เคลวินต่อกิโบลาร์ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ +1.5 องศา.เซนติเมตรต่อกิโบลาร์ ในปีเดียวกัน Wang และคณะ[30,31] ก็ได้ทำการทดลองเตรียมเซรามิกเซอร์โคเนียมดีตาเนตด้วยวิธีการมิกซ์ออกไซด์และพบว่าจะมีเฟสของเซอร์โคเนียมดีตาเนตที่มีอัตราส่วนของเซอร์โคเนียมต่อดีตาเนียมเป็นแบบ 1:1 ปะปนอยู่กับเฟสของเซอร์โคเนียมดีตาเนตที่มีอัตราส่วนของเซอร์โคเนียมต่อดีตาเนียมเป็นแบบ 5:7 เมื่อทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1450 °ซ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยการใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิเป็น 6 °ซ /ชั่วโมง และ 120 °ซ /ชั่วโมง จะได้เซรามิกที่มีความหนาแน่นสูงถึงร้อยละ 95 ของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี และเมื่อใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิซินเตอร์ค่าน้อยๆ และทำการวิเคราะห์ผลจากสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์ที่ได้พบว่าจะมีฟิสิก X-ray แปลกปลอมเกิดขึ้นอยู่หลายฟิสิกโดยเซลล์หน่วยจะมีความยาวแลตทิซตามแนวแกน b ลดลง ทำให้มีโครงสร้างผลึกแบบสม่ำเสมอที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมเซอร์โคเนียมและดีตาเนียมแบบ $Zr^{II}Zr^{II}Zr_{II}Zr_{II}$ หรือ $Zr^{II}Zr_{II}Zr_{II}$ ซึ่งเซรามิกที่เตรียมได้นี้จะมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์อยู่ที่ประมาณ 400-1000 ณ ความถี่ 4 จิกะเฮิรตซ์ โดยจะพบรอยแตกเล็กๆ (microcrack) เกิดขึ้นในเซรามิกซึ่งสันนิษฐานว่าน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิกที่เตรียมได้มีค่าลดลง

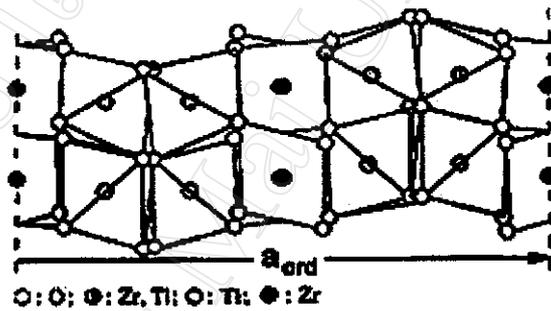
2.2 โครงสร้างของเซอร์โคเนียมดีทาทาเนต

เซอร์โคเนียมดีทาทาเนตบริสุทธิ์มีสูตรโมเลกุลเป็น $ZrTiO_4$ มีโครงสร้างแบบ α - PbO_2 ที่มีเซลล์หน่วยเป็นแบบออร์โธโรมบิก และอยู่ในกลุ่มสเปต (space group) แบบ $Pbcn$ [1] ดังรูปที่

2.1



(ก)

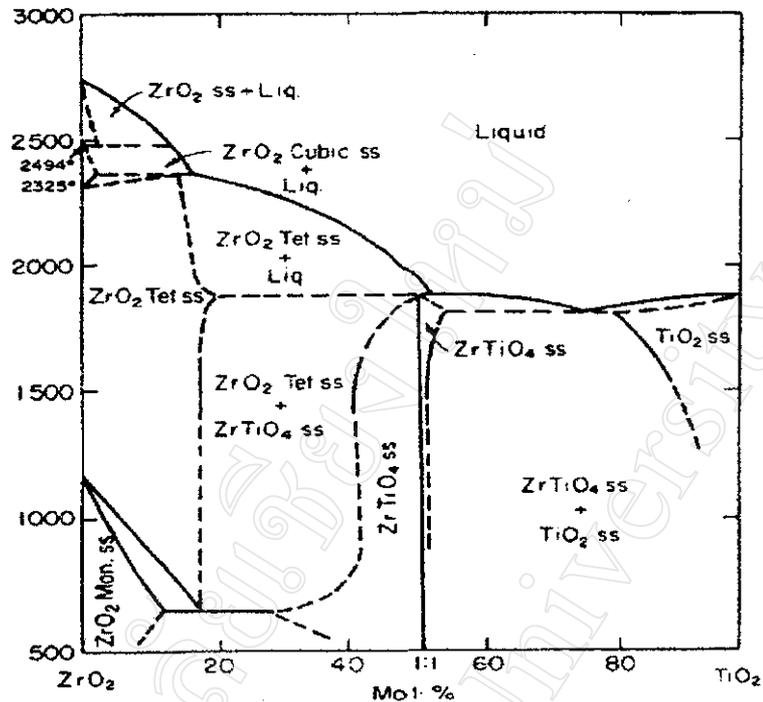


(ข)

รูปที่ 2.1 แสดงภาพฉายโครงสร้างของ $ZrTiO_4$ ในทิศทาง $[010]$ ที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบ (ก) ไม่สม่ำเสมอและ (ข) สม่ำเสมอแต่ไม่ได้สัดส่วน [13]

ที่อุณหภูมิสูงไอออนบวกของเซอร์โคเนียม (Zr^{4+}) และดีทาทาเนียม (Ti^{4+}) มีเฟสของการจัดเรียงตัวของอะตอมไม่สม่ำเสมอ (disorder) เรียกว่าเฟสปกติ (normal phase) โดยมีการกระจายตัวของอะตอมเซอร์โคเนียมและดีทาทาเนียมอยู่ในช่องว่างรูปออกตะฮีดรอล (octahedral site) เป็นแบบ α - PbO_2 ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง $1100^{\circ}C$ ถึง $1200^{\circ}C$ เซอร์โคเนียมดีทาทาเนตจะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากเฟสปกติไปเป็นเฟสที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างสม่ำเสมอ (order) แต่เป็นแบบที่ไม่ได้สัดส่วน (incommensurate)

การเตรียมเซอร์โคเนียมดีททาเนตจากการใช้เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) และ ดีททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารตั้งต้นนั้น จะมีปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงหลายประการ และมีรายงานถึงพฤติกรรมการก่อเกิดเฟสและการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารเหล่านี้เอาไว้ด้วยเฟส ไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสารตั้งต้นทั้งสองมีลักษณะการเกิดเป็นโพลิมอร์ฟ (polymorph) กล่าวคือเซอร์โคเนียมไดออกไซด์สามารถมีโครงสร้างได้หลายรูปแบบเช่น เตตระโกนอล (tetragonal หรือ Tet) คิวบิก (cubic) หรือโมโนคลินิก (monoclinic หรือ Mon) โดยที่อุณหภูมิต่ำเซอร์โคเนียมไดออกไซด์จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก และมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างผลึกจากรูปแบบโมโนคลินิกเป็นแบบเตตระโกนอลที่อุณหภูมิ 1240 °C และที่อุณหภูมิสูงประมาณ 2370 °C ลักษณะโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นแบบคิวบิก ซึ่งค่อนข้างเสถียรมากกว่ารูปแบบอื่นๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกภายในเซลล์หน่วย เซอร์โคเนียมไดออกไซด์จะเกิดสนามของความเค้นขึ้นที่บริเวณรอยต่อของเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างผลึก และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดมีรอยแตกร้าวขึ้น[1] สำหรับดีททาเนียมไดออกไซด์นั้นพบว่าสามารถมีโครงสร้างผลึกได้หลายรูปแบบเช่นกัน เช่น เตตระโกนอล (tetragonal หรือ Tet) ออร์โธโรมบิก (orthorhombic หรือ Ort) โมโนคลินิก (monoclinic หรือ Mon) หรือ เฮกซะโกนอล (Hexagonal หรือ Hex) โดยทุกๆ โครงสร้างผลึกจะมีการจัดเรียงตัวของไอออนเป็นแบบ เฮกซะโกนอล (HCP) ที่ยึดกันอย่างแน่น โดยจะมีไอออนบวกกระจายอยู่ระหว่างไอออนลบ อย่างไม่สม่ำเสมอและเกิดช่องว่างขึ้นเป็นเหตุให้ไอออนบวกของดีททาเนียมมีการเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งได้ง่าย

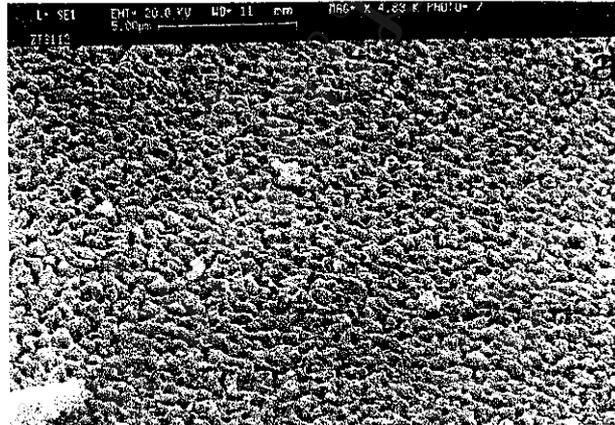


รูปที่ 2.2 แสดงเฟสไดอะแกรมระหว่างเซอร์โคเนียมไดออกไซด์กับิตาเนียมไดออกไซด์[32]

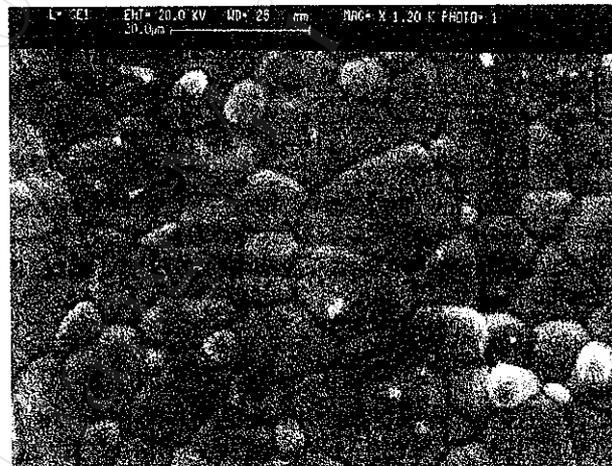
จากรูปที่ 2.2 เมื่อสารตั้งต้นเซอร์โคเนียมไดออกไซด์และิตาเนียมไดออกไซด์รวมกันด้วยอัตราส่วนจำนวนโมลที่แตกต่างกันจะเกิดเฟสของเซอร์โคเนียมิตาเนตปะปนกับสารตั้งต้นที่เป็นส่วนเกิน โดยเซอร์โคเนียมิตาเนตที่เป็นเฟสเชิงเดี่ยวจะสามารถเตรียมได้ด้วยการใช้สารตั้งต้นในอัตราส่วนจำนวนโมลแบบ 1:1 โดยการใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °ซ ขึ้นไปจนกระทั่งถึง 1800 °ซ สำหรับบริเวณอื่นๆ นั้นจะพบว่ามีส่วนของสารตั้งต้นหลงเหลือปนอยู่กับเฟสของ ZT และที่บริเวณอุณหภูมิสูงกว่า 1800 °ซ นั้นสารตั้งต้นจะเปลี่ยนสถานะไปเป็นของเหลว

ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผงและเซรามิกเซอร์โคเนียมิตาเนตที่มีปรากฏในเอกสารทางวิชาการได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผงเซอร์โคเนียมิตาเนตที่ผ่านการเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 1000 °ซ จะมีรูปร่างค่อนข้างกลมและเกาะกันเป็นกลุ่มอย่างสม่ำเสมอ ส่วนผงเซอร์โคเนียมิตาเนตเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็น green body จะมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 60 และเมื่อผ่านการเผาซินเตอร์จะมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 85 ถึง 90 ได้ รูปร่างของเกรนโดยทั่วไปของเซรามิกเซอร์โคเนียมิตาเนตจะมี

หลายเหลี่ยมและมีขนาดของเกรนตั้งแต่ 5 ไมโครเมตร จนถึง 20 ไมโครเมตร โดยจะสามารถสังเกตเห็นการกระจายตัวของรูพรุนอยู่บ้างเล็กน้อย



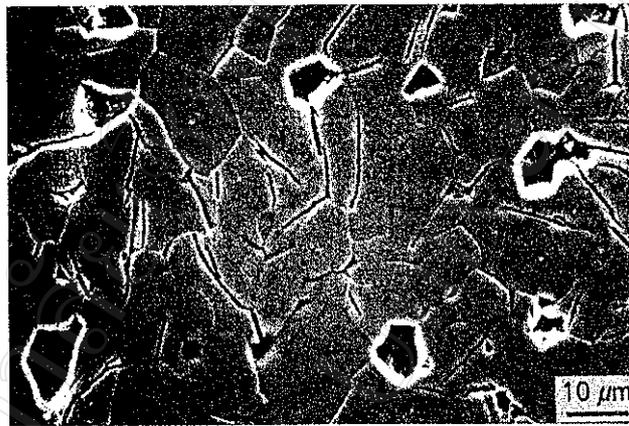
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคจากภาพถ่าย SEM ของเซอร์โคเนียมดีตาเนต (ก) ผงที่ผ่านการเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 1200 °ซ และ(ข) เซรามิกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1600 °ซ [34, 35]

เมื่อใช้กำลังขยายเพิ่มขึ้นจะสังเกตเห็นรอยแตกเล็กๆ ที่เกิดขึ้นภายในเกรนของซีเมนต์ได้อย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) และ (ข) ต่ำและยังพบอีกว่าเซรามิกที่ใช้ อัตราการลดลงของอุณหภูมิอย่างช้าๆ จะมีอนุภาคที่มีรูปร่างกลมฝังตัวอยู่ในเกรน (ที่มีลูกศรชี้) เมื่อตรวจสอบด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่าน (TEM) พบว่าเป็นอนุภาคของเซอร์โคเนียมที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอลกับแบบโมโนคลินิกอยู่ในรูปที่ 2.5



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 แสดงภาพถ่าย SEM ของเซรามิกเซอร์โคเนียมดีทานเนตเมื่อใช้อัตราการลดลงของอุณหภูมิเป็น (ก) $120^{\circ}\text{C} / \text{ชั่วโมง}$ และ (ข) $1^{\circ}\text{C} / \text{ชั่วโมง}$ [21, 30]



รูปที่ 2.5 แสดงภาพถ่าย TEM ของอนุภาคเซอร์โคเนียมที่ปนอยู่กับเซรามิกเซอร์โคเนียมดีตาเนต (สเกลในรูปถ่ายมีขนาดเท่ากับ 0.5 ไมโครเมตร)[30]

2.3 ลักษณะเฉพาะของไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์

เนื่องจากเซรามิกส่วนใหญ่ถูกจัดให้อยู่ในพวกฉนวน (Insulator) การนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแถบการนำ (conduction band) เหมือนพวกโลหะและสารกึ่งตัวนำ แต่การนำไฟฟ้าของเซรามิกเกิดจากปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน (polarisation) การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกจึงใช้วิธีการทดสอบการตอบสนองของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับของการเกิดโพลาไรเซชันซึ่งเป็นเทอมที่ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น ความถี่ อุณหภูมิ สนามไฟฟ้าภายนอก ความชื้น ลักษณะโครงสร้างผลึก และอื่นๆ สำหรับไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ดีนั้นควรมีลักษณะเฉพาะดังต่อไปนี้[33]

1. มีความถี่ของการสั่นสูงและสม่ำเสมอ และมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
2. เกิดการสั่นพ้องกับความถี่ในย่านใช้งานได้ดี และมีค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกต่ำ
3. เกิดการสั่นพ้องอย่างรวดเร็ว และใช้เวลาสั่นประมาณ 1/10 ถึง 1/100 วินาที
4. เซรามิกเรโซเนเตอร์ต้องมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา และ

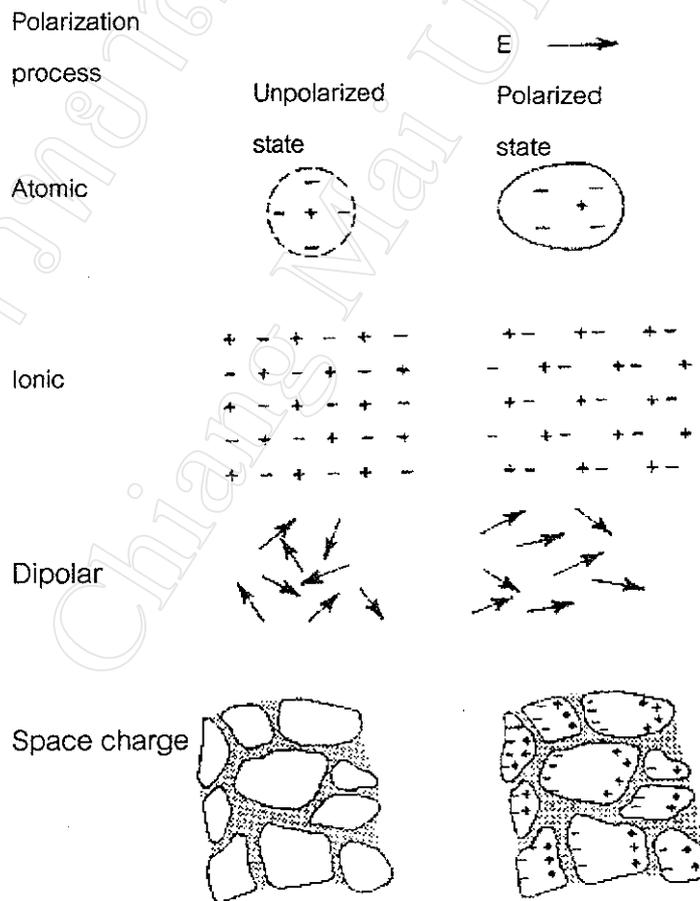
5. สามารถนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ได้ดีโดยไม่ทำให้สมบัติเฉพาะตัวเปลี่ยนไปเช่นสามารถใช้งานร่วมกับทรานซิสเตอร์หรือไอซีหลายๆ ชนิดได้

จากที่กล่าวมาแล้วว่าเซรามิกกลุ่มนี้มีสมบัติทางไดอิเล็กตริกที่เป็นฟังก์ชันขึ้นกับปัจจัยต่างๆ มากมายซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้กระบวนการเกิดโพลาริเซชันภายในเนื้อสาร กล่าวโดยปกติภายในเนื้อสารเหล่านี้จะประกอบด้วยอะตอมและโมเลกุลจำนวนมากมาย เมื่อถูกทำให้เกิดขั้ว (polarised) อะตอมและโมเลกุลเหล่านี้จะแสดงผลเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกโดยการเกิดกระบวนการโพลาริเซชันขึ้นได้หลายรูปแบบดังรูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการแบบ 1) atomic polarisation ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสเพื่อต้านสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้เกิดระยะการกระจัดขึ้นระหว่างกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสนั้น 2) กระบวนการแบบ ionic polarisation ซึ่งเป็นกระบวนการโพลาริเซชันเนื่องจากมีไอออนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำไอออนบวกจะเกิดการผลักกันกับขั้วบวกทางไฟฟ้า และไอออนลบเกิดการผลักกันกับขั้วลบทางไฟฟ้าเกิดระยะการกระจัดสุทธิขึ้นระหว่างไอออนบวกและไอออนลบภายในเนื้อ 3) dipolar polarisation เกิดการกระจัดเนื่องจากตำแหน่งที่ว่างของแลกทิตเป็นผลให้เกิดขั้วคู่หรือเกิดมีโมเมนต์ขั้วคู่อยู่ก่อนแล้ว เพียงแต่มีการจัดเรียงตัวกันอยู่อย่างไม่แน่นอน และเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าภายนอกเข้ามา ทำให้โมเมนต์ขั้วคู่นี้เกิดการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียว และ 4) space charge polarisation เป็นกระบวนการโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นบริเวณผิวรอยต่อระหว่างเกรนของวัสดุ เนื่องจากความแตกต่างของโพลาริเซชันภายในเนื้อวัสดุที่บริเวณใกล้กัน เสมือนเกิดมีตัวเก็บประจุเล็กๆ เกิดขึ้นระหว่างเกรน

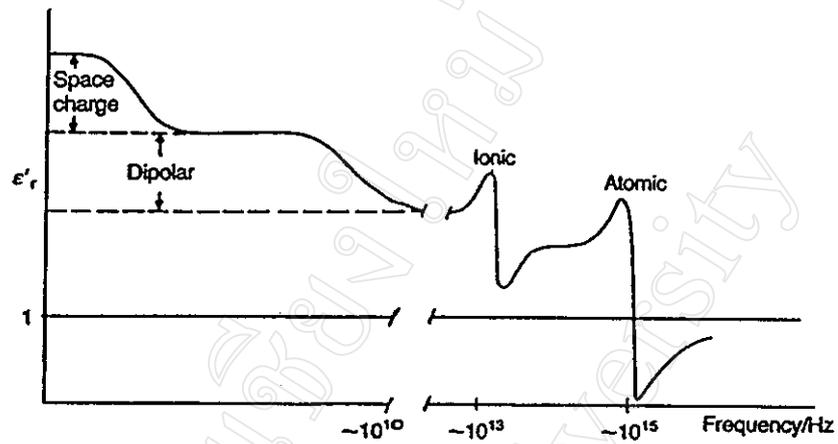
การเปลี่ยนแปลงค่าโพลาริเซชันจะมีผลโดยตรงกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ กระบวนการเกิดโพลาริเซชันแต่ละประเภทจะตอบสนองย่านความถี่ที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.7 (ก) ทุกๆ ครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงของการเกิดโพลาริเซชันจะเกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วนเพื่อช่วยให้ระบบสามารถกลับมาอยู่ในสถานะที่เสถียรได้โดย ค่านี้เรียกว่าค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ดังรูปที่ 2.7 (ข) ซึ่งสามารถเขียนแสดงด้วยรูปของความสัมพันธ์กับค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) ดังนี้

$$Q = 1 / \tan \delta \tag{2.1}$$

การตรวจวัดสมบัติการนำไฟฟ้าของสารเซรามิกมีอยู่สองเทคนิคด้วยกัน คือ การใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง และ การใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ การใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้าหรือตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องได้โดยตรงจากการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าเทียบกับความต่างศักย์เพื่อหาค่าความต้านทานของเซรามิกตามกฎของโอห์ม ขณะที่มีการผ่านสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไป แต่เนื่องจากความต้านทานของเซรามิกส่วนใหญ่มีค่าสูง ดังนั้นรูปแบบวงจรและเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องมีความแม่นยำสูง นอกจากนี้ความบกพร่องของเซรามิกและสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ต่างก็มีอิทธิพลต่อผลการวัด ปกติการใช้สัญญาณไฟฟ้าแบบกระแสสลับจะมีความสะดวกกว่าและไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีความซับซ้อนมากนัก



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดโพลาริเซชันแบบต่างๆ [45]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 แสดง (ก) ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และ (ข) ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของสารไดอิเล็กตริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่[45]

สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ (sinusoidal wave) และเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยทั่วไปสามารถเขียนแทนได้ด้วยปริมาณเชิงซ้อน ดังนี้

$$V = V_0 \cdot \exp(-j\omega t) \quad (2.2)$$

และ

$$I = I_0 \cdot \exp(-j\omega t + j\phi) \quad (2.3)$$

เมื่อ V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์

I คือ กระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็นแอมแปร์

ω คือ ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ และ

ϕ คือ มุมเฟส หรือความต่างเฟสระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์

โดยกฎของโอห์มสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

$$V = I \cdot Z \quad (2.4)$$

เมื่อ Z คือค่าความต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับมีหน่วยเป็นโอห์ม และนิยมเรียกว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อน(impedance) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของปริมาณเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$Z = Z \cdot \exp(-j\phi) \quad (2.5)$$

หรือ

$$Z = Z' - jZ'' \quad (2.6)$$

เมื่อ Z' และ Z'' คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าความต้านทานเชิงซ้อน ตามลำดับ ส่วนกลับของค่า Z ก็คือค่าความนำเชิงซ้อน (admittance) โดยทั่วไปจะเขียนแทนด้วย

$$Y = 1/Z = Y' + jY'' \quad \text{หรือ} \quad Y = G + jB \quad (2.7)$$

เมื่อ G คือ ค่าความนำ(conductance) และ B คือ ค่าความนำจินตภาพ (susceptance) ในเซรามิกที่มีความหนา d และพื้นที่หน้าตัด A จะได้ความสัมพันธ์ที่ว่า

$$G = \sigma \cdot A/d \quad \text{เมื่อ} \quad B = \omega C \quad \text{และ} \quad C = \epsilon' \cdot A/d \quad (2.8)$$

โดยที่ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า (conductivity)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) และ

ϵ' คือ ส่วนจริงของค่าสภาพยอมเชิงซ้อน (complex permittivity, ϵ) ซึ่ง

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'' \text{ และ } \epsilon' = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.9)$$

เมื่อ ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) หรือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) และ ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-14} ฟารัดต่อเซนติเมตร

ในทางอุดมคติ เมื่อผ่านสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้กับสารเซรามิก ความต่างเฟส (ϕ) ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ 90 องศาพอดี แต่ในความเป็นจริง ขณะที่มีการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะมีการสูญเสียพลังงานตามมาด้วย จึงส่งผลให้ความต่างเฟสดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 90 องศา และเทอมที่อธิบายการสูญเสียพลังงานนี้จะเขียนแทนด้วยสมการ 2.10

$$\tan \delta = \epsilon''/\epsilon' \quad (\delta = 90 - \phi) \quad (2.10)$$

และเรียกสมการ (2.10) ว่าค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (loss tangent หรือ loss factor หรือ dissipation factor หรือ D) นอกจากเทอมต่าง ๆ ในสมการที่ 2.10 แล้ว ยังมีเทอมอีกเทอมหนึ่งคือ ค่าอิเล็กตริกมอดุลัส (electric modulus), M ซึ่งนิยามด้วย

$$M = 1/\epsilon \quad \text{หรือ} \quad M = j\omega Z \quad (2.11)$$

ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้เพื่ออธิบายเวลาในการผ่อนคลาย (relaxation time) ของการเกิดโพลาริเซชันในเซรามิก

ในการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกโดยใช้เทคนิคของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับนั้น สามารถทำได้โดยการวัดเทอมใดเทอมหนึ่งจากสมการที่ 2.8 ในช่วงความถี่หนึ่งที่อุณหภูมิค่าหนึ่งหรือช่วงหนึ่ง แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ผลและคำนวณหาปริมาณที่ต้องการต่อไป โดยทั่วไปจะเลือกวิธีใดวิธีหนึ่งระหว่าง การวัดหาค่าความต้านทานเชิงซ้อน ค่าความนำเชิงซ้อน หรือ ค่าความจุไฟฟ้ากับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก แล้วใช้ความสัมพันธ์จากสมการข้างต้นในการคำนวณและวิเคราะห์ผล สำหรับเทคนิคที่นิยมนำมาใช้เพื่อการวิเคราะห์ผลเหล่านี้ก็คือการเขียนกราฟระหว่างสเปกตรัมของค่าความต้านทานเชิงซ้อน ค่าความนำเชิงซ้อน หรือ

ค่าสภาพยอมล้มพัทธ์ และการใช้ระนาบเชิงซ้อน (การเขียนกราฟระหว่างส่วนจินตภาพกับส่วนจริง โดยให้ส่วนจริงเป็นแกน x) ของปริมาณข้างต้น และจากการพิจารณากราฟดังกล่าวนี้จะทำให้สามารถบ่งบอกการตอบสนองของเซรามิกต่อสัญญาณกระแสลับในรูปของวงจรเทียบเท่า (equivalent circuit) โดยการเปรียบเทียบกับวงจรกระแสลับอย่างง่ายที่มีองค์ประกอบของตัวต้านทานที่มีความต้านทานทางไฟฟ้า R และ ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้า C

เซรามิกเซอร์โคเนียมติทานเตมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่ดีในย่านความถี่ไมโครเวฟ ค่าสภาพยอมล้มพัทธ์และค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของเซรามิกแสดงดังตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าค่าสภาพยอมล้มพัทธ์ของเซรามิก ณ ความถี่หนึ่งๆ จะให้ค่าตัวประกอบคุณภาพที่แตกต่างกัน ค่านี้เป็นค่าที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบและบ่งบอกถึงคุณภาพของเซรามิกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

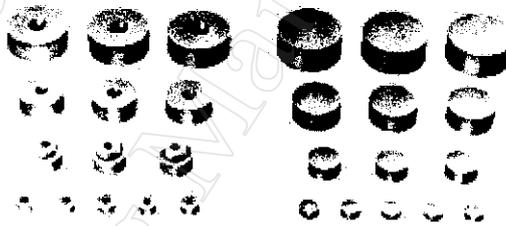
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสภาพยอมล้มพัทธ์และค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของเซรามิกเซอร์โคเนียมติทานเตที่ย่านความถี่ต่างๆ [21]

ความถี่(จิกะเฮิรตซ์)	Q	QF	ϵ_r
2.2	9000	19800	42
4.950	6000	29700	35
5	2000	10000	40.5
5	4500	22500	39.8
5	4500	22500	38.5
5	2200	11000	34.9
5.267	5640	29705	36
6	3700	22200	39
7	4000	28000	42
8.3	3079	25556	42.4
8.7	2280	19836	38.3
10	2700	27000	46

ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะมากหรือน้อยยังขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของไอออนบวกและความเป็นเนื้อเดียวกันของเซรามิก และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ก็ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น วิธีการเตรียม สิ่งเจือปน การจัดเรียงตัวของไอออนบวก ความหนาแน่น และขนาดเกรน เป็นต้น ดังนั้นข้อมูลในตารางที่ 2.2 จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้แต่สามารถบอกได้ว่าเซรามิกเซอร์โคเนียมดีทาลานาที่มีความถี่ตั้งแต่ 2 ถึง 10 จิกะเฮิรตซ์ ให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 35 ถึง 46

2.4 ตัวอย่างการนำเซรามิกไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์ประยุกต์ใช้งาน

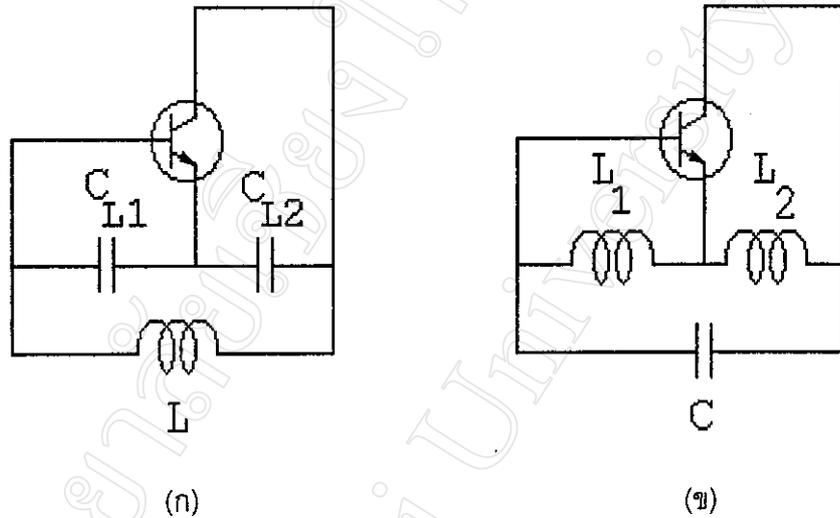
ในปัจจุบันได้มีการนำเซรามิกพวกไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์มาใช้งานเป็นส่วนประกอบของตัวกรองสัญญาณความถี่ในเครื่องรับสัญญาณโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ย่านไมโครเวฟซึ่งมีลักษณะทั่วไปดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของไดอิเล็กตริกเรโซเนเตอร์[1]

หลังจากทำการศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้าและหาวงจรมูลในย่านการเกิดเรโซแนนท์ของเซรามิกที่จะนำมาใช้งานได้แล้วนั้น จึงนำไปใช้ในวงจรเลือกสัญญาณความถี่ ซึ่งตัวอย่างของวงจรเลือกสัญญาณความถี่จะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุ และขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเลือกสัญญาณเนื่องจากการเกิดสั้นพ้องกับโพรงของขดลวดดังรูปที่ 2.9 สำหรับการประยุกต์ใช้งานเซรามิกในการเลือกย่านความถี่ที่เกิดการสั้นพ้องนั้นจะทำได้โดยการนำเซรามิกมาใส่แทนตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำในวงจรดังกล่าว เหตุที่เลือกใช้เซรามิกดังกล่าวนี้ก็เนื่องมาจากว่าเซรามิกเรโซเนเตอร์มีข้อดีกว่าการใช้ขดลวด เพราะจะสามารถทำให้เซรามิกเกิดการสั้นพ้องได้ที่ความถี่สูงๆ อย่างแม่นยำกว่าและนอกจากนี้ยังมีช่วงของการเกิดสั้นพ้องที่กว้าง และค่อนข้าง

คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากกว่า ในขณะที่ขดลวดจะมีขีดจำกัดค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในเรื่องของความไม่แน่นอนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดขึ้น เนื่องจากการนำไฟฟ้าและสมบัติของการสั่นพ้องของขดลวดเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นไปจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากนั่นเอง[1]



รูปที่ 2.9 แสดงวงจร oscillation แบบ (น) Colpitts circuit และ (ข) Hertly circuit[1]

วงจรที่แสดงในรูปที่ 2.9 เป็นวงจรที่แสดงถึงหลักการทำงานอย่างง่ายของอุปกรณ์ที่ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ในเครื่องรับสัญญาณในโทรทัศน์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ เครื่องรับสัญญาณระบบคลื่น AM และ FM ในรถยนต์ หรือ เครื่องควบคุมระยะไกล เป็นต้น