

บทที่ 2

เปียโซอิเล็กทริก และเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์

2.1 บทนำ

เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างมาจากสารเซรามิก เช่น ควอตซ์(Quartz) ลิเทียมไนโอเบท(LithiumNiobate) และ PZT (Lead Zirconate Titanate) มีหลักการทำงาน โดยอาศัยการสั่นสะเทือนเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงานและ มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ขนาดบาง, น้ำหนักเบา, ทำงานโดยไม่ใช้การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กเพื่อส่งถ่ายพลังงาน, ประสิทธิภาพสูงและมีพิสัยการทำงานที่ความถี่สูง คุณสมบัติต่างๆ นี้จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายพลังงานในแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีข้อจำกัดที่ขนาดความสูง และพื้นที่ใช้งาน

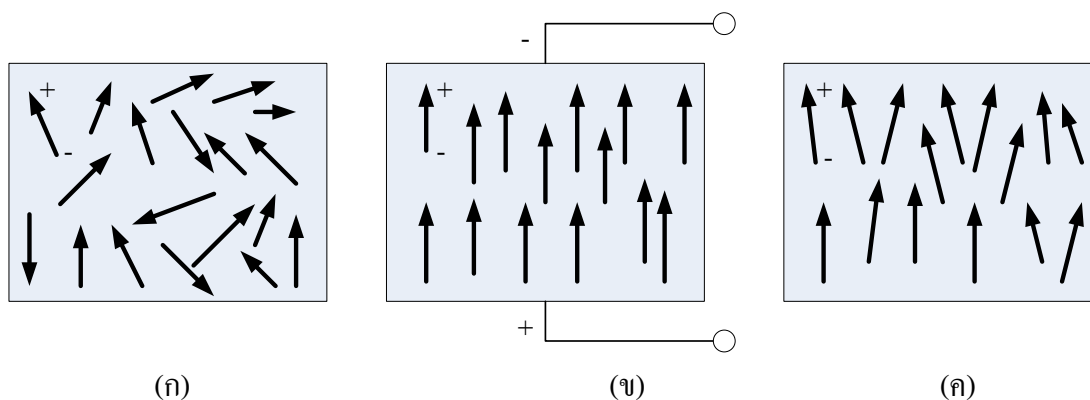
โครงสร้างและการทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ มีการประยุกต์มาจากหลักการทำงานของเปียโซอิเล็กทริก โดยการนำเปียโซอิเล็กทริกสองชั้นมาเชื่อมต่อกันโดยชั้นแรกทำหน้าที่เป็นแอคชูเอเตอร์ (Piezoelectric Actuators) และชั้นที่สองทำหน้าที่เป็นทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducers) เมื่อทั้งนำสองชั้นมาเชื่อมต่อกันก็กลายเป็นเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ปัจจุบันเทคโนโลยีส่วนใหญ่มีแนวทางในการพัฒนาที่จะให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดที่บาง ซึ่งตรงกับคุณสมบัติเปียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดที่บาง จึงมีการนำเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น Inverter, AC adapter , Battery Charger, Signal Isolation และ DC/DC Converter เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 1880 มีการค้นพบคุณสมบัติของเปียโซอิเล็กทริก โดย Jacques และ Pierre CURIE ซึ่งพบว่าเมื่อมีการกดหรือดึงโครงสร้างของ Crystals จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเรียกคุณสมบัตินี้ว่า Piezoelectric effect และในทางกลับกันถ้าให้กำลังสนามแม่เหล็กกับโครงสร้างของ Crystals จะทำให้เกิดการยืดหรือหดตัวของโครงสร้างของ Crystals เรียกคุณสมบัตินี้ว่า Inverse Piezoelectric effect [1]

ในศตวรรษที่ 20 ก็มีการวิจัยและสร้างเปียโซอิเล็กทริกจากสารเซรามิก (Ceramics) ขึ้น ผลการวิจัยนี้ได้พัฒนาให้สามารถกำหนดคุณสมบัติของเปียโซอิเล็กทริกได้ด้วย จึงทำให้สามารถนำเปียโซอิเล็กทริกไปใช้พัฒนางานต่างๆ ได้มากมาย เช่น Receivers, Actuators และ เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ การสร้างเปียโซอิเล็กทริกต้องนำอะตอมของธาตุที่ต่างชนิดกันสองธาตุ และมีคุณสมบัติเป็นไอออนบวกกับไอออนลบมาผสมกัน จากนั้นทำให้วัสดุผสมที่เกิดขึ้นคุณสมบัติที่มีขั้วปรากฏขึ้นด้วยกระบวนการทำให้มีขั้ว เรียกว่าการโพลิ่ง (Poling) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป[1]

2.2 กระบวนการทำให้มีขั้ว (โพลลิง, Poling)

วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริกมีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นแบบลูกบาศก์ที่มีธาตุผสมกันอยู่สามธาตุซึ่งมีสูตรว่า $(A^2 + B^1 + O^2)_3$, A คือธาตุที่มีไอออนขนาดใหญ่และเป็นธาตุโลหะนิยมใช้ธาตุ Barium, ส่วน B คือธาตุโลหะที่มีขนาดเล็กนิยมใช้ Titanium หรือ Zirconium โดยปกติโครงสร้างของโมเลกุลจะอยู่ในสถานะสมดุลเมื่อมีธาตุ B (Titanium หรือ Zirconium) อยู่ตรงกลางของโมเลกุลพอดี แต่หลังจากวัสดุดังกล่าวได้รับอุณหภูมิถึงจุด Curie point แล้วโมเลกุลจะไม่อยู่ในสถานะสมดุลทำให้โมเลกุลเกิดมีขั้วขึ้น แต่ขั้วของโมเลกุลยังมีทิศที่ไม่เป็นแนวเดียวกัน



รูปที่ 2.1 การทำโพลลิง (ก) ขั้วของโมเลกุลยังมีทิศที่ไม่เป็นแนวเดียวกัน, (ข) เมื่อมีการให้ สนามแม่เหล็ก (ค) ขั้วของโมเลกุลที่สถานะคงตัว

หลังจากที่วัสดุได้รับอุณหภูมิถึงจุด Curie point ทำให้โมเลกุลแสดงขั้วขึ้น แต่ขั้วยังมีทิศทางที่ไม่เป็นแนวเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก) สังเกตว่าทิศทางของขั้วจะมีทิศทางไม่ไปตามแนวเดียวกัน ซึ่งสามารถทำให้ขั้วมีทิศทางไปในแนวเดียวกันได้โดยนำสนามแม่เหล็กที่เป็นมีทิศทางของสนามแม่เหล็กชนิดทางเดียวและความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กสูง มาต่อระหว่างวัสดุเพื่อให้ขั้วของโมเลกุลเป็นไปในแนวเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) สังเกตว่าขั้วของโมเลกุลมีทิศทางไปในแนวเดียวกันหมดหลังจากนั้นก็ค่อยๆ ลดสนามแม่เหล็กลงพร้อมกับอุณหภูมิ ทำให้ขั้วของวัสดุเข้าสู่สถานะที่ขั้วส่วนใหญ่มีทิศทางไปในแนวเดียวกันซึ่งเรียกว่าสถานะคงตัว ดังแสดงในรูป 2.1(ค) ซึ่งจะวัสดุที่ได้จะแสดงคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริก คือถ้ามีการกดหรือการดึงที่วัสดุดังกล่าวจะทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น และถ้าให้แรงดันไฟฟ้าที่วัสดุดังกล่าวจะทำให้วัสดุยืดหดได้ คุณสมบัตินี้สามารถไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้ [1]

2.3 เปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก

อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์หลายชนิดที่มีการผลิตขึ้นมาโดยใช้วัสดุประเภทเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก เพราะมีการผลิตที่ทำได้ง่าย มีประสิทธิภาพสูง และยังสามารถลดขนาดน้ำหนักของอุปกรณ์ลงได้มาก อุปกรณ์ที่ผลิตจากสารเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก เช่น รีซีฟเวอร์ (Receivers), แอ็กชูเอเตอร์ (Actuators), อัลตราโซนิคมอเตอร์ (Ultrasonic motor), ทรานส์ฟอร์มเมอร์ (transformers) เป็นต้น [2]

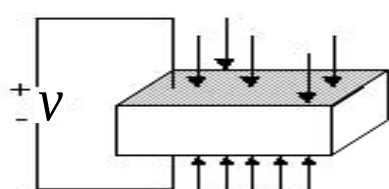
2.4 หลักการทำงานของสารเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก

เปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก คือสารเซรามิกที่มีคุณสมบัติของการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า มีหลักการทำงานโดยอาศัยการเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริก แล้วทำให้เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุนั้น หรือมีการเปลี่ยนรูปจากพลังงานกลเป็นพลังงานทางไฟฟ้า โดยเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริก แล้วทำให้เกิดการยืดและหดตัวของวัตถุ [2]

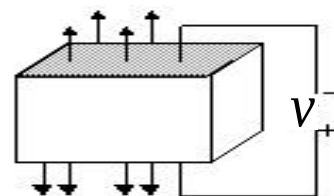
คุณสมบัติในการทำงานของสารเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก ประกอบด้วยคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางกลของสารเปียโซอิเล็กทริกประกอบด้วย ความเครียด Stress (T), ความเค้น Strain (S) และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารเปียโซอิเล็กทริกประกอบด้วย Electric field (E), Polarization (P) และมีการทำงานสองลักษณะด้วยกันดังนี้ [2]

1) การทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducers) คือแรงที่มากระทำกับวัตถุที่เป็นเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิกในลักษณะของแรงดึงหรือแรงกดแล้วมีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวัตถุนั้น (Direct effect) ทิศทางของแรงดันไฟฟ้าแปรตามลักษณะลักษณะการกดหรือการดึง ดังรูปที่ 2.2 (ก) การทำงานประเภทนี้นิยมใช้ในงานวัดค่าปริมาณต่างๆ เช่น วัดความดันอากาศ, วัดความเครียดภายในชิ้นส่วนของวัสดุ เป็นต้น [2]

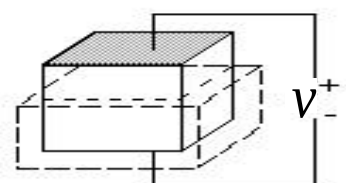
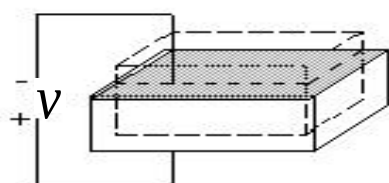
2) การทำงานของเปียโซอิเล็กทริกแอ็กชูเอเตอร์ (Piezoelectric Actuators) คือวัตถุที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก ที่มีลักษณะการยืดหรือหดได้ว่า Inverse effect เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวัตถุนั้น ถ้ามีการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่แบบสลับขั้วอย่างต่อเนื่องก็จะทำให้วัตถุนั้นเกิดการสั่นได้ดังรูปที่ 2.2 (ข) การทำงานประเภทนี้มักใช้กับหัวเครื่องพิมพ์ชนิดพ่นหมึก (Ink jet printer) เป็นต้น [2]



(ก)



(ข)

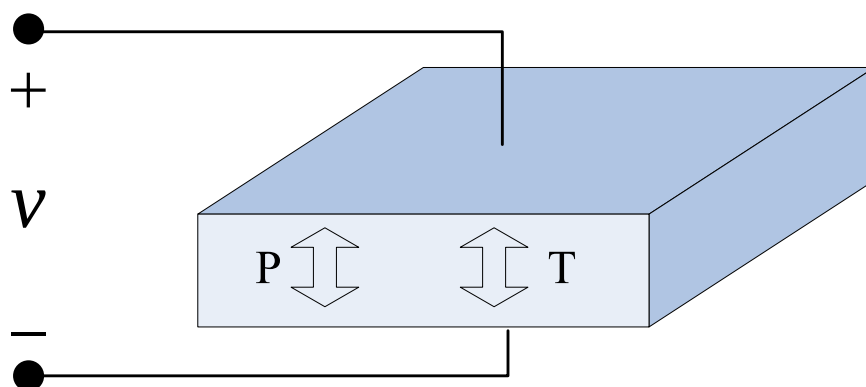


รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นสาร piezoelectric ชนิดเซรามิก (ก) piezoelectric ทรานสดิวเซอร์ (ข) piezoelectric แอคชูเอเตอร์

2.5 รูปแบบการทำงานของ piezoelectric ชนิดเซรามิก

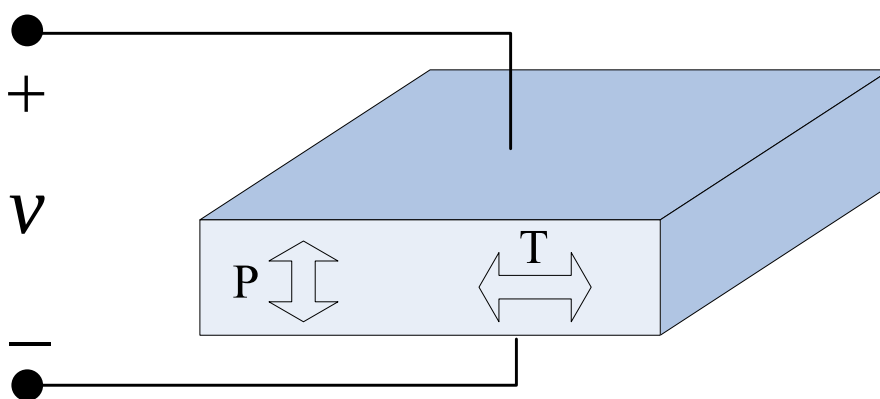
piezoelectric ชนิดเซรามิกมีรูปแบบการทำงานอยู่สองรูปแบบด้วยกันคือ การทำงานในรูปแบบของ Longitudinal Mode และ Transverse Mode [3]

1) การทำงานในรูปแบบของ Longitudinal Mode เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวัสดุที่เป็น piezoelectric เซรามิก แล้วทำให้วัตถุนั้นเกิดการยืดหรือหดในแนวทิศทางเดียวกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวัตถุนั้น ตามรูปที่ 2.3 [3]



รูปที่ 2.3 รูปแบบการทำงานของ Longitudinal Mode

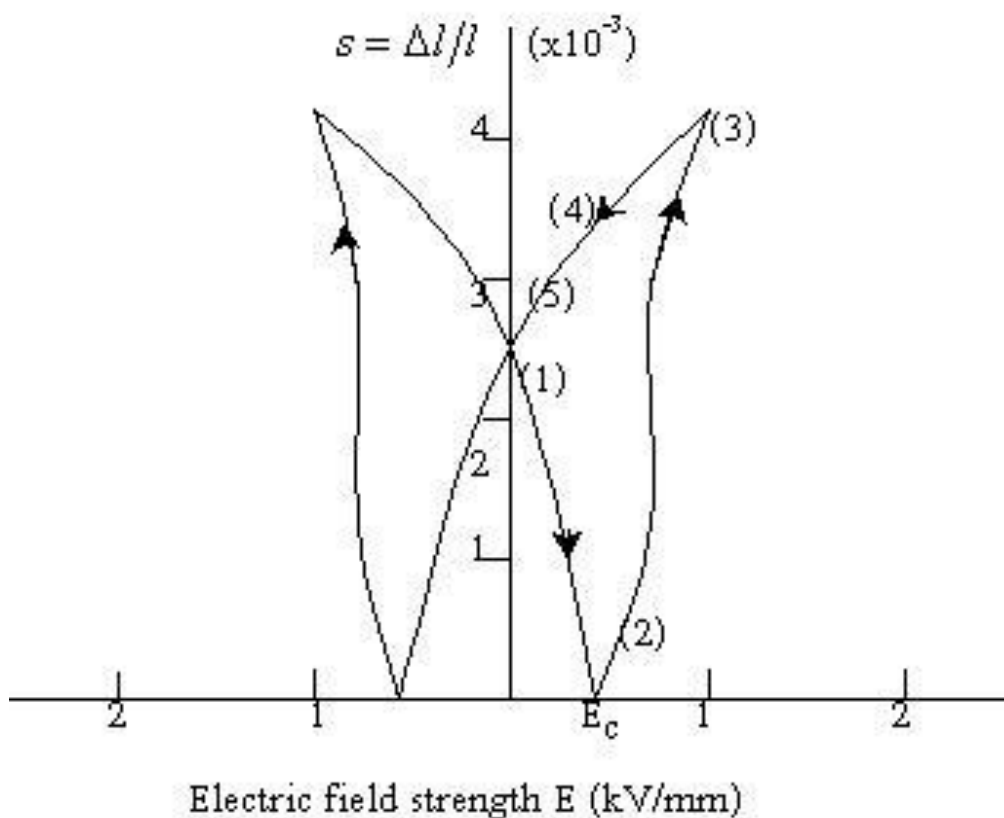
2) การทำงานในลักษณะของ Transverse Mode เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวัตถุที่เป็น piezoelectric ทรานซิสเตอร์เซรามิกแล้ว ทำให้วัตถุนั้นเกิดการยืดหรือหดตั้งฉากกับทิศทางของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวัตถุนั้น ตามรูปที่ 2.4 [3]



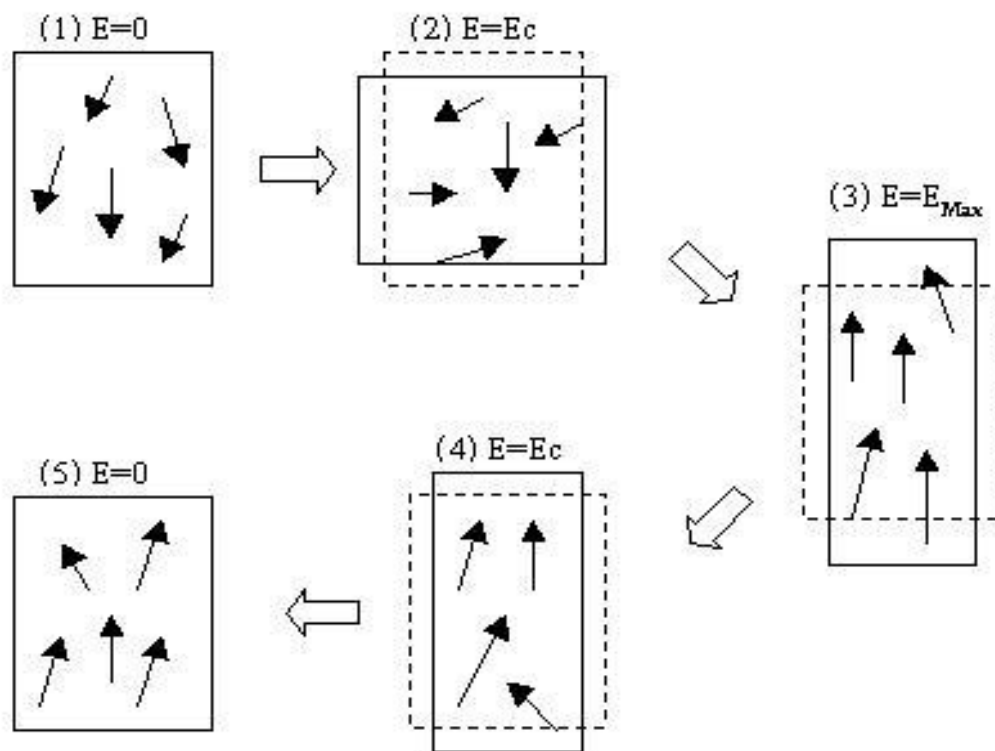
รูปที่ 2.4 รูปแบบการทำงาน Transverse Mode

2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก

ลักษณะการทำงานทางไฟฟ้าและทางกลของวัตถุที่เป็นเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิกแสดงตามรูปที่ 2.5 เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า ($E=0$) วัตถุที่เป็นเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก มีขนาดคงที่ เมื่อมีสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง ($E=E_c$) วัตถุที่เป็นเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิกมีการยืดตัว (2→3, ตามรูปที่ 2.5) และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง ($E=E_{Max}$) วัตถุเกิดการยืดตัวมากที่สุด (3, ตามรูปที่ 2.5) และสนามไฟฟ้ากลับมาที่ตำแหน่ง ($E=E_c$) (3→4, ตามรูปที่ 2.5) วัตถุจะหดตัวจากตำแหน่งที่ยืดตัวสูงสุดเล็กน้อย และที่สนามไฟฟ้า ($E=0$) (5, ตามรูปที่ 2.5) วัตถุมีขนาดคงที่ แต่ทิศทางของขั้วของเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิกมีทิศทางตรงข้ามกับตำแหน่งเมื่อตอนแรกดังแสดงตามรูปที่ 2.6 และเมื่อมีสนามไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งอีกครั้งในทิศทางตรงข้าม การยืด/หดของวัตถุจะเป็นไปตามลักษณะตามรูปที่ 2.5 และตามรูปที่ 2.6 ผลที่ได้ขั้วของเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิกก็จะกลับมามีทิศทางเดิมของตำแหน่งเริ่มต้น [2]



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก



รูปที่ 2.6 ลักษณะการการยืด/หดของวัตถุที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก

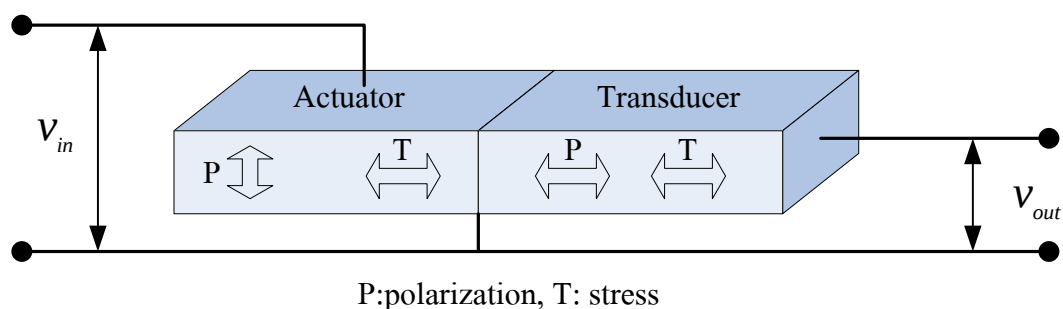
2.7 ชนิดของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์

โดยส่วนมากจะมีการแบ่งชนิดของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ออกเป็นสามแบบ ตามลักษณะของโหมดการทำงานดังต่อไปนี้

2.7.1 Reson-type เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์

ในแบบ Reson-type เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ส่วนแรกมีลักษณะการทำงานในรูปแบบของ transverse mode แสดงออกในรูปแบบของ Actuator ส่วนที่สองมีลักษณะการทำงานในรูปแบบของ longitudinal mode แสดงออกในรูปแบบของ Transducer นำไปใช้งานกับโหลดที่มี

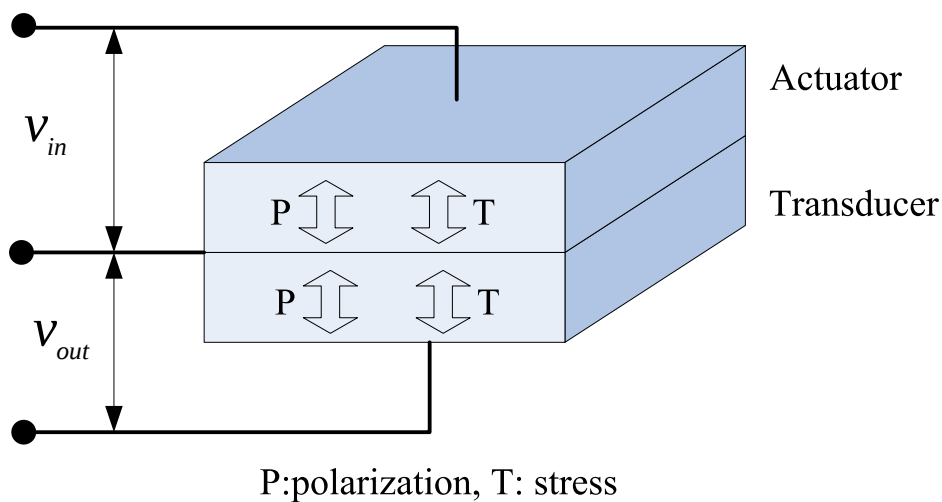
ค่าสูง (ประมาณ $100\text{K } \Omega$) และต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงจึงจะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูง เช่นการนำไปใช้ทำ Black-light ในจอคอมพิวเตอร์ Notebook เป็นต้น [3]



รูปที่ 2.7 Reson-type เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

2.7.2 Thickness Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

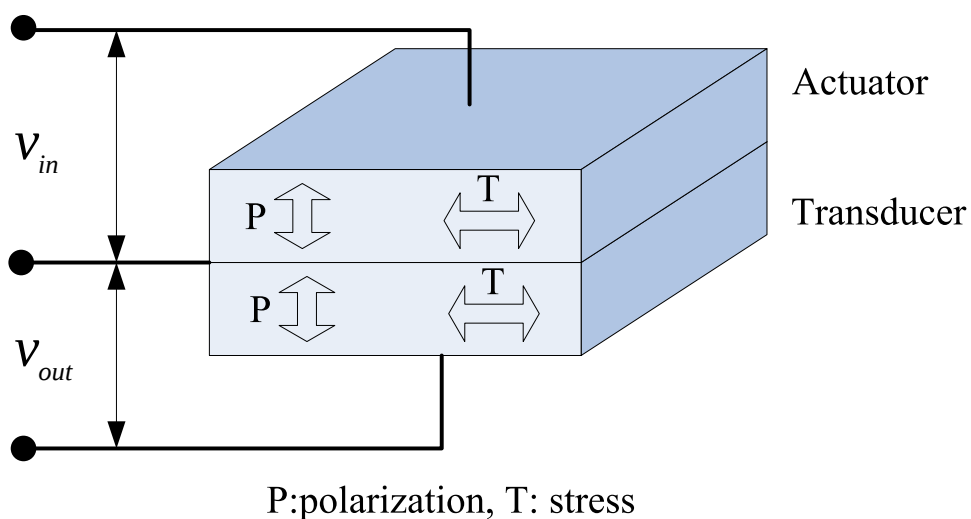
ในแบบ Thickness Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ ส่วนบนมีลักษณะการทำงานในรูปแบบ longitudinal mode แสดงออกในรูปแบบ Actuator ส่วนล่างมีลักษณะการทำงานในรูปแบบของ longitudinal mode แสดงออกในรูปแบบของ Transducer นำไปใช้งานกับโหลดที่มีต่ำ (ประมาณ $10\text{ } \Omega$) และความแรงดันไฟฟ้าต่ำจึงจะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูง เช่นนำไปใช้ทำ DC/DC converter และ Battery Charger เป็นต้น [3]



รูปที่ 2.8 Thickness Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

2.7.3 Radial Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

ในแบบ Radial Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ ส่วนแรกมีลักษณะการทำงานในรูปแบบของ transverse mode แสดงออกในรูปแบบของ Actuator ส่วนที่สองมีลักษณะการทำงานในรูปแบบของ transverse mode แสดงออกในรูปแบบของ Transducer [3]



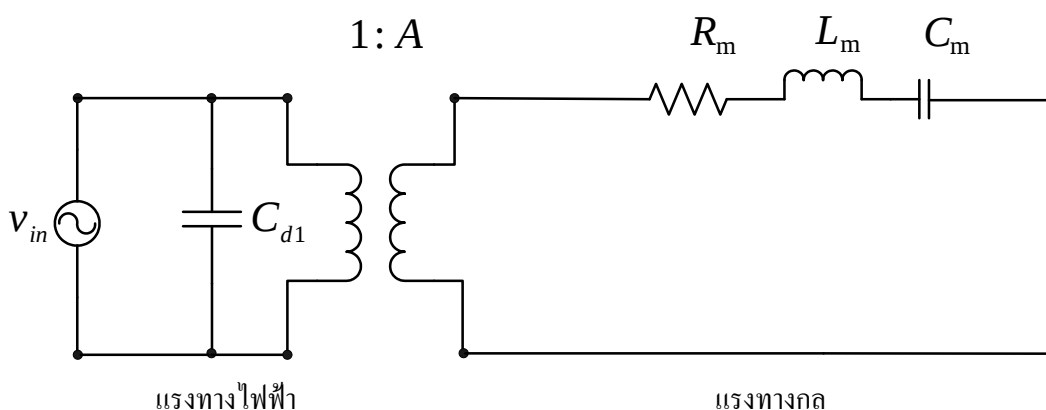
รูปที่ 2.9 Radial Vibration Mode เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

2.8 วงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก

การจำลองวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกคือการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบทางไฟฟ้ากับระบบทางกล ของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า[4]

ในการจำลองวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสามารถทำได้สองทางคือการคำนวณจากสมการพื้นฐานซึ่งจะยุ่งยากมาก และทางที่สองใช้หลักการความสัมพันธ์ทางไฟฟ้ากับทางกลโดยจะมองทั้งทางไฟฟ้าและทางกล ทางไฟฟ้าก็จะเริ่มจากค่าความแรงดันไฟฟ้าและค่าของตัวเก็บประจุด้านทางเข้า (C_{d1}) ที่เกิดจากการที่นำแรงดันไฟฟ้ามาต่อคร่อมกับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ส่วนค่าที่เกิดจากทางกลจะเป็นค่าที่ได้จากการสั่นสะเทือนทางกล เช่นมวล (M), spring (K) และความหน่วง (b) ซึ่งสามารถแปลงค่าเหล่านี้ไปเป็นค่าทางไฟฟ้าได้ โดยค่าของมวล (M) สามารถจำลองเป็นค่าทางไฟฟ้าคือ ค่าความเหนี่ยวนำ (L), ค่าความหน่วง (b) สามารถจำลองเป็นค่าทางไฟฟ้าคือ ค่าความต้านทาน (R), ค่าของ Spring (K) สามารถจำลองเป็นค่าทางไฟฟ้าคือค่าของตัวเก็บประจุ (C) หลังจากที่ได้แปลงค่าต่างๆมาเป็นค่าทางไฟฟ้า ก็สามารถใช้หลักการของไฟฟ้าในการแก้ปัญหาได้

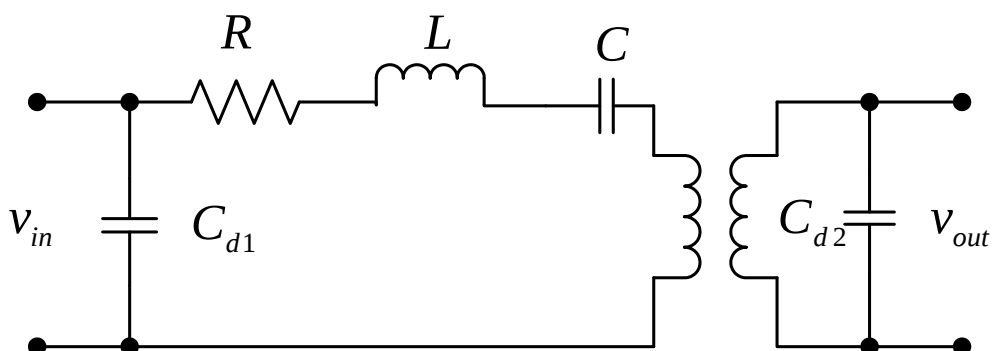
โดยที่พารามิเตอร์ R_m , L_m และ C_m จะอยู่ในส่วนของการทำงานทางกลที่จำลองเป็นค่าทางไฟฟ้า ส่วน C_{d1} , C_{d2} เป็นค่าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก และ A คือค่าอัตราการแปลงพลังงานจากไฟฟ้ามาเป็นพลังงานทางกล[2] [4]



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกขณะไม่มีโหลด

2.9 วงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

วงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ใช้หลักการของการจำลองโดยนำวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (หัวข้อที่ 2.8) สองวงจรมาเชื่อมต่อแบบกลับด้านกัน (ระบบทางไฟฟ้า->ระบบทางกล->ระบบทางกล->ระบบทางไฟฟ้า) เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์นี้มีทั้งคุณสมบัติความเป็นไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกล ในส่วนของคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ การที่นำแรงดันไฟฟ้ามาต่อคร่อมที่ เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ จะสังเกตเห็นเสมือนมีตัวเก็บประจุด้านทางเข้า (C_{d1}) และที่ทางด้านออกจะสังเกตเห็นเสมือนมีตัวเก็บประจุด้านทางเข้า (C_{d2}) ส่วนของทรานส์ฟอร์มเมอร์เป็นการจำลองอัตราการแปลงพลังงานทางกลมาเป็นพลังงานทางไฟฟ้าโดยรวม หรือ อัตราการแปลงพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลโดยรวม ซึ่งอัตราการแปลงพลังงานจะแทนด้วย N และวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถแทนได้โดยรูปที่ 3.1 [2]



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์โดยทั่วไป

2.10 สรุป

เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ได้จากการรวมเอาเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสองรูปแบบการทำงานเข้าด้วยกันคือ รูปแบบการทำงานแบบ Actuator และ Transducer ตามลำดับ โดยที่รูปแบบการทำงานแบบ Actuator ทำหน้าที่แปลงพลังงานทางไฟฟ้าที่ทางเข้าเป็นพลังงานทางกลแบบการสั่นสะเทือนที่ด้านทางออก ส่วนรูปแบบการทำงานแบบ Transducer ทำหน้าที่แปลงพลังงานทางกลแบบสั่นสะเทือนเป็นพลังงานทางไฟฟ้าที่ด้านทางออก เมื่อรวมรูปแบบการทำงานสองรูปแบบ

เข้าด้วยกันเรียกเป็ยโซอิล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันทางไฟฟ้าจากระดับหนึ่งที่ด้านทางเข้าไปเป็นแรงดันทางไฟฟ้าอีกระดับหนึ่งที่ด้านทางออก ซึ่งมีวงจรสมมูลตามรูปที่ 2.15