

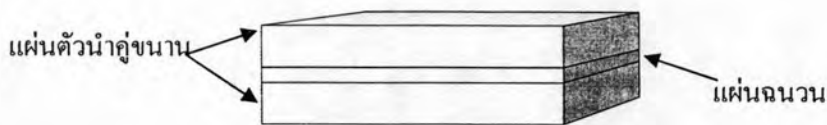
### บทที่ 3

#### การออกแบบและการทดลอง

ในบทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงการออกแบบ หน้าที่ของตัวเก็บประจุที่สัมพันธ์ต่อการใช้งานกับขนาดของตัวเก็บประจุ รวมถึงขั้นตอนการผลิต การเตรียมวัสดุ เทคโนโลยี อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ รวมถึงวิธีการวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.1 การออกแบบตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบางมีโครงสร้างที่ประกอบขึ้นจากคู่แผ่นตัวนำขนานที่ถูกกั้นแยกด้วยฉนวน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนั้นวัสดุที่นำมาใช้เป็นฉนวน ได้แก่  $BaTiO_3$ ,  $BaTiO_3$ -epoxy composite  $Ta_2O_5$  และ  $Al_2O_3$  เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วค่าของตัวเก็บประจุประเภทฟิล์มบางนี้มีค่าอยู่ระหว่าง  $77 \text{ pF/cm}^2$  –  $16,000 \text{ pF/cm}^2$  โดยค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิตและคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาเป็นฉนวน ซึ่งในงานวิจัยที่ได้ทำใช้วิธีการประดิษฐ์ด้วยการเหวี่ยงสารละลาย (Spinning) ในการเคลือบสารไดอิเล็กทริก และการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Vacuum evaporation)



รูปที่ 3.1 รูปโครงสร้างตัวเก็บประจุ

ค่าตัวเก็บประจุที่ได้เป็นฟังก์ชันของค่าความหนาชั้น ไดอิเล็กทริก ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก และพื้นที่ของขั้ว โดยค่าที่ได้มีค่าตามสมการ

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (3.1)$$

โดย  $\epsilon_r$  = ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของสาร

$\epsilon_0$  = ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของ free space ( $8.84 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ )

$A$  = พื้นที่

$d$  = ความหนาชั้นไดอิเล็กทริก

ซึ่งหลักการในการออกแบบสำหรับตัวเก็บประจุนั้นมีข้อที่ควรคำนึงถึงดังนี้

1. ควรมีค่าความเหนี่ยวนำน้อยที่สุด โดยตัวเก็บประจุนั้นควรวางในตำแหน่งใกล้กับอุปกรณ์สวิชชิง
2. จำนวนของตัวเก็บประจุที่ใช้ควรเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับอุปกรณ์สวิชชิงที่ใช้ในวงจร
3. ค่าของตัวเก็บประจุต้องสัมพันธ์กับเวลาขาขึ้น (ความถี่) ของอุปกรณ์สวิชชิงในวงจร

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างหน้าที่ (Function) ของตัวเก็บประจุในวงจรไฟฟ้า

ค่าเก็บประจุ	ชนิดของตัวเก็บประจุ	หน้าที่ของค่าเก็บประจุ
$<0.01\mu\text{F}$	ตัวเก็บประจุสำหรับการสวิชชิง ทรานเซียนต์ (Switching transient capacitance)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ให้พลังงานเพื่อการประจุส่วนขาออกของอุปกรณ์ระหว่างสวิชชิง</li> <li>● เป็น decoupling ย่านความถี่สูง</li> </ul>
$0.01\mu\text{F} < C < 0.1\mu\text{F}$	ตัวเก็บประจุสำหรับการประจุไฟฟ้า ในสาย (Line-charging capacitance)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ให้พลังงานเพื่อการประจุในสายและโหลดขาเข้า</li> <li>● เป็น decoupling ย่านความถี่ปานกลาง</li> </ul>
$>0.1\mu\text{F}$	ค่าตัวเก็บประจุที่มีค่ามาก (Bulk capacitance)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ให้พลังงานเพื่อชดเชยการประจุในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power planes) และตัวเก็บประจุค่าที่ต่ำกว่า</li> <li>● เป็น decoupling ย่านความถี่ต่ำ</li> </ul>

### 3.2 การเตรียมวัสดุและขั้นตอนการประดิษฐ์

#### 3.2.1 การเตรียมสารละลายสำหรับชั้นฟิล์มฉนวน

ในขั้นตอนการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบางนั้น โพลีเมอร์ที่ใช้เป็นเมตริก (Matrix) ยึดสาร  $\text{BaTiO}_3$  ไว้เป็นฉนวนฟิล์มบางในงานวิจัยนี้ได้ใช้ด้วยกัน 3 ชนิดได้แก่ โพลีอะคริลิกแอซิดโซเดียมซอลท์ (Polyacrylic acid sodium salt, PAAS) โพลีอะคริลิกแอซิด (Polyacrylic acid, PAA) และ โพลีอิไมด์ (Polyimide, PI) ซึ่งในขั้นตอนการเตรียมสารละลายมีขั้นตอนที่แตกต่างกันออกไปตามชนิดของโพลีเมอร์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

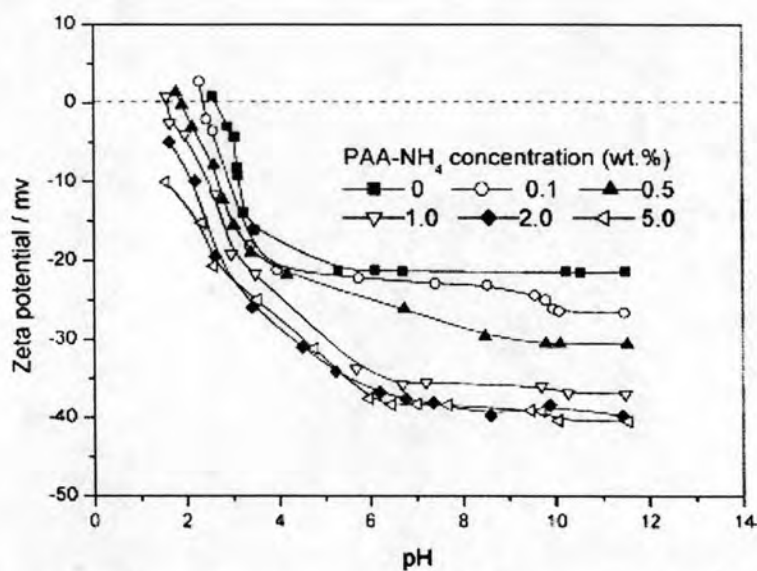
### 3.2.1.1 โพลีอะคิลิกแอซิดโซเดียมซอลท์ (PAAS)

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายมีขั้นตอนดังนี้

(ก) นำน้ำปลอดประจุ (Deionization water) เป็นตัวทำละลาย ปริมาณ  $4 \text{ cm}^3$  ผสมกับ PAAS ในปริมาณ  $0.5 \text{ cm}^3$  นำไปคนให้เข้ากัน หลังจากนั้นนำมาปรับ pH ด้วยการเติม  $\text{NH}_4\text{OH}$  จนได้ pH 11 ซึ่งสาเหตุที่ใช้ค่า pH ที่จุดนี้เนื่องจากสาร  $\text{BaTiO}_3$  นั้นมีค่า Isoelectric point ซึ่งมีค่าสัมบูรณ์ของ Zeta potential สูงสุดที่ ประมาณ pH เท่ากับ 10 [5]

โดย Isoelectric point คือ ตำแหน่งของ pH ซึ่งโมเลกุลของพาหะมีประจรวมเป็นศูนย์

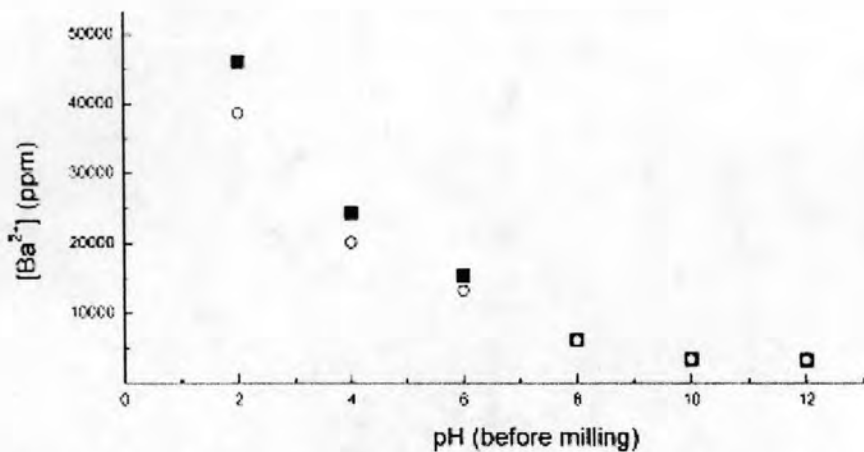
Zeta potential คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าสถิต (electrostatic potential) ที่เกิดจากประจุที่สะสมอยู่บริเวณผิวของอนุภาค (คอลลอยด์) ซึ่งถ้ามีค่าต่ำก็มีผลกระทบให้เกิดการแตกตัวของสารได้



รูปที่ 3.2 รูปกราฟของ Zeta potential เทียบกับค่า pH ของสารละลายที่มีอนุภาค  $\text{BaTiO}_3$  โดยมีการเปลี่ยนความเข้มข้น [5]

(ข) นำสารละลายที่ได้จากข้อ(ก)มาผสมเข้ากับ  $\text{BaTiO}_3$  โดยใช้น้ำสารละลายมาใช้เพียง  $1 \text{ cm}^3$  มาผสมกับ BYK-W9010 ในปริมาณ 3 หยด โดยในงานวิจัยที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของปริมาณและขนาดของอนุภาค  $\text{BaTiO}_3$  ดังนี้ ขนาดอนุภาคที่นำมาทดลองได้แก่ ขนาด 100 nm 200 nm และ 400 nm ปริมาณความเข้มข้นดังนี้คือ 1.7% 3.3% 6.4% และ 12.03% โดยปริมาตร

(ค) นำไปกวนให้เข้ากันด้วย Magnetic stirrer เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นนำสารละลาย g-เข้าเครื่อง ultrasonic อีก 30 นาที จนได้สารละลายที่มีลักษณะเป็น colloidal แล้วนำสารละลายที่ได้ไปเคลือบลงบนแผ่นฐานที่เตรียมไว้ต่อไป



รูปที่ 3.3 รูปกราฟพล็อตระหว่างค่า pH ก่อนกวนกับความเข้มข้นของ  $Ba^{2+}$  ในหน่วย ppm [5]

### 3.2.1.2 โพลีอะคิลิกแอซิด (PAA)

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายสำหรับ PAA นั้น เหมือนกับการเตรียมสารละลาย PAAS แต่เปลี่ยนจากตัวละลาย PAAS เป็น PAA

### 3.2.1.3 โพลีอิมิด (PI)

ในการเตรียมสารละลาย PI นั้นแตกต่างจาก 2 ขั้นตอนแรก โดยมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและยุ่งยากกว่า เนื่องจากสารตั้งต้นไม่ใช่ตัว PI แต่แปรสภาพมาจากสารอื่น โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

(ก) ผสม N-methyl pyrrolidone ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายปริมาตร  $3.87 \text{ cm}^3$  และตัวโคโพลิเมอร์ เพื่อช่วยในการละลาย BYK-W9010 ปริมาณ 3 หยด หลังจากนั้นนำไปคนให้เข้ากันด้วย Magnetic stirrer เป็นเวลา 30 นาที

(ข) นำสารละลายที่ได้และเติม  $BaTiO_3$  มาผสมกวนด้วยเครื่อง Powder milling ที่อัตราเร็วในการกวนต่ำที่สุดต่อเนื่อง เป็นเวลา 15 ชั่วโมง

(ค) หลังจากนั้นนำสารละลายที่ผสม  $BaTiO_3$  แล้วมาผสมกับ Polyamic acid โดยคนด้วย Magnetic stirrer ไว้ที่ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไป Ultrasonic อีก 15 นาทีซึ่งในขั้นตอนนี้ได้มีการเปลี่ยนเงื่อนไขในการทำสารละลายดังนี้คือใช้อัตราส่วนของ  $BaTiO_3$  : Polyamic acid เท่ากับ 30:70 35:65 40:60 และ 45:55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

(ง) นำสารละลายที่ได้ไป degas ในเตาอบสุญญากาศ (Vacuum oven) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปทำฟิล์มลงบนแผ่นฐาน

(จ) หลังจากได้ฟิล์มแล้วนำไปอบ (เพื่อทำ Thermal curing ให้ Polyamic acid เปลี่ยนไปเป็น PI) ตามขั้นตอนดังนี้

(ก) อบในเตาอบสุญญากาศให้อุณหภูมิห้องเพิ่มจาก 100°C และคงที่ค่าไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

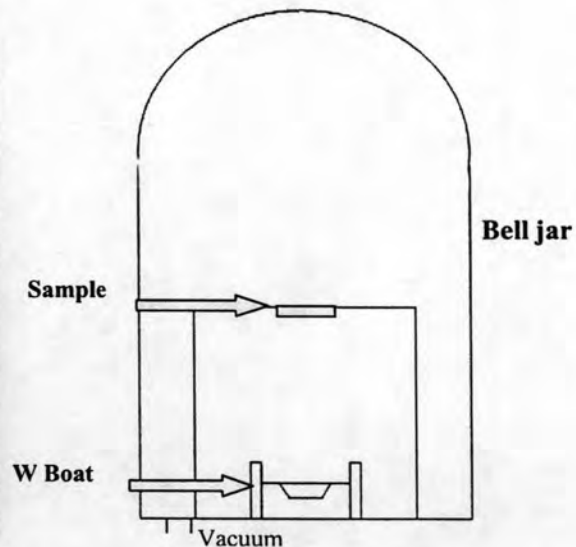
(ข) อบในเตาอบธรรมดาโดยเพิ่มจาก 100°C ไปเป็น 200°C และคงที่ค่าไว้อีก 1 ชั่วโมง

(ค) หลังจากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิ จาก 200°C เป็น 300°C และทิ้งไว้อีก 1 ชั่วโมง เพื่อให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

### 3.2.2 การประดิษฐ์ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบาง

ในขั้นตอนการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบางนั้นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(ก) เริ่มต้นจากแผ่นแก้วสไลด์ขนาด 18x18 mm<sup>2</sup> โดยนำแผ่นแก้วมาทำความสะอาดในขั้นต้นเพื่อล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรกออกก่อน โดยการล้างด้วย Acetone โดยใช้เครื่อง Ultrasonic เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นล้างด้วย Methyl Alcohol และ น้ำปอลอดประจุแล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซ N<sub>2</sub> แล้วนำไปทำขั้วด้านล่างโดยใช้โลหะนิกเกิลเคลือบด้วยความหนา 0.1 μm หลังจากนั้นเคลือบทับด้วยโลหะทองด้วยความหนาเท่าเดียวกัน ซึ่งการเคลือบโลหะลงบนแผ่นฐานเคลือบด้วยเครื่อง Metallic Evaporator ของ Alcatel ดังในรูปที่ 3.4

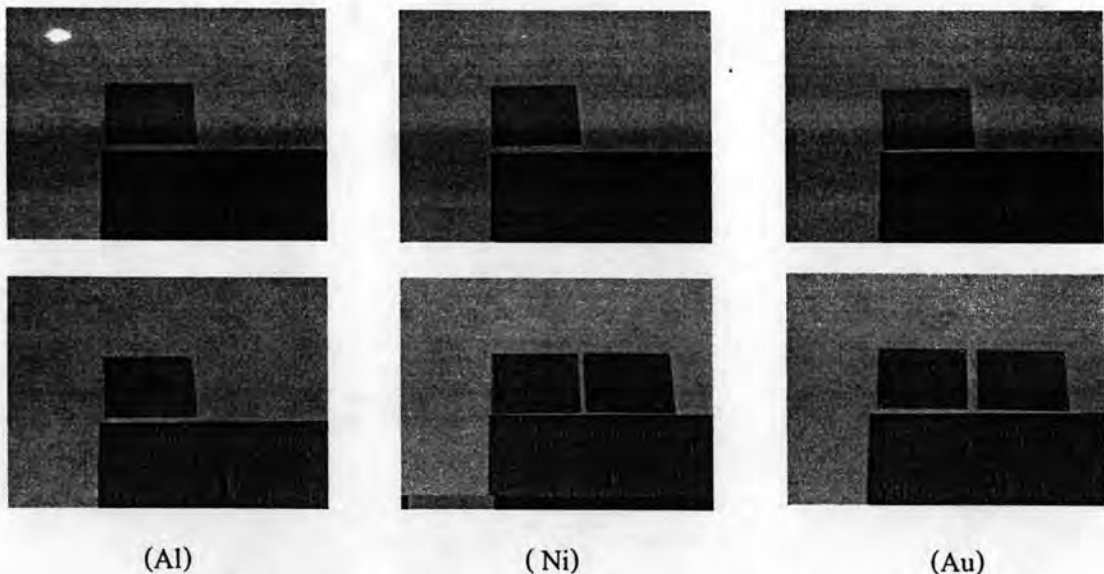


รูปที่ 3.4 รูปเครื่อง Evaporator และ รูปจำลองภายใน Bell jar

ซึ่งหลักการของเครื่อง Evaporator มีหลักการดังนี้ [9] คือ โลหะที่ถูกใช้เป็นตัวระเหิด (Evaporant source) จะถูกเตรียมใส่ไว้ในถังสแตนโบท (W Boat) หลังจากนั้นนำแผ่นฐาน (Sample) มาติด ขั้วด้านบน

ของกล่อง ซึ่งทั้ง W Boat Evaporant Source และกล่องเพื่อยึดแผ่นฐานอยู่ใน Bell jar ที่ถูกดูดอากาศออกด้วยปั๊มสุญญากาศ โดยเริ่มต้นดูดอากาศด้วย Rotary Pump จนได้ความดัน  $10^{-1}$  Torr หลังจากนั้นใช้ Oil Diffusion Pump ดูจนได้ความดันประมาณ  $10^{-6}$  Torr หลังจากนั้นจึงทำการให้กระแสไฟฟ้าค่าสูงผ่าน W Boat จนอุณหภูมิของ W Boat สูงกว่าจุดที่กลายเป็นไอของโลหะที่เป็น Evaporant Source ที่ความดันค่าดังกล่าว โลหะภายใน W Boat เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอพุ่งออกไปด้วยพลังงานจลน์ไปเกาะบนแผ่นฐานที่อยู่ด้านบน ซึ่งโดยทั่วไปเราใช้ Shutter กั้นระหว่าง Evaporant Source กับแผ่นฐาน และมี Detector เพื่อวัดความหนาของชั้นโลหะที่เคลือบอยู่ได้เพื่อใช้ในการควบคุมการระเหยอีกด้วย

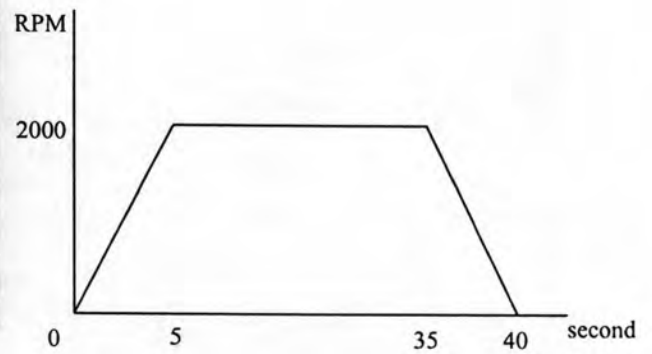
ซึ่งเหตุผลที่ใช้ निकเกิ้ลเคลือบลงไปก่อนแล้วตามด้วยทอง เนื่องจากการทดสอบเริ่มแรกได้มีการทดลองตัวสารละลายกับโลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วสำหรับโลหะที่เลือกใช้ได้แก่ อะลูมิเนียม निकเกิ้ล และทอง โดยทดลองหยดสารละลายก่อนเพื่อทดสอบการยึดเกาะของสารละลาย และทดสอบว่าปฏิกิริยาระหว่างโลหะที่ใช้ทำขั้วและสารละลายด้วยการสปิน ซึ่งได้ผลเป็นดังนี้คือ ค่าความเร็วรอบในการสปินที่ได้จากการทดลองที่เหมาะสมคือที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที โลหะที่เหมาะสมกับการทำขั้วต่อสำหรับสารละลายคือทอง เนื่องจากโลหะที่นำมาทำการทดลองซึ่งได้แก่ निकเกิ้ล และอะลูมิเนียมนั้น ไม่สามารถทนต่อสภาพความเป็นเบสของสารละลายและถูกสารละลายกัด แต่เนื่องจาก निकเกิ้ลมีความสามารถในการยึดเกาะกระจกได้ดีกว่าทองมาก และยังสามารถยึดเกาะกับทองได้ในระดับหนึ่งจึงใช้ निकเกิ้ลเคลือบก่อนเคลือบทองซึ่งเป็นขั้วด้านล่างและตัวอย่างของผิวหน้าโลหะมีผลดังรูปที่ 3.5



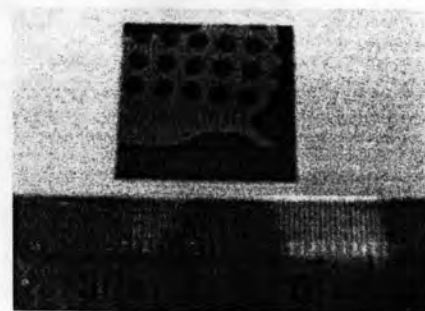
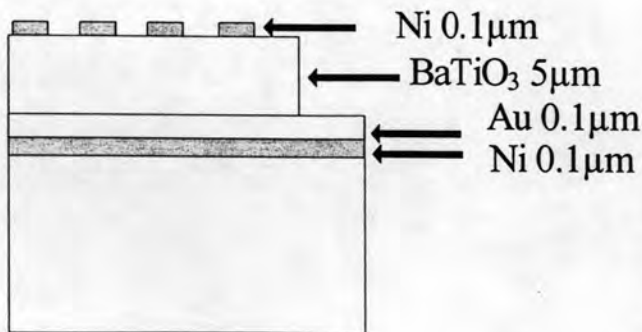
รูปที่ 3.5 รูปของโลหะที่ใช้ทำขั้วก่อนและหลังหยดสารละลายเพื่อทดสอบ

เมื่อได้แผ่นฐานที่เคลือบด้วยโลหะนิกเกิล และทองด้วยความหนา 0.1  $\mu\text{m}$  เรียบร้อยแล้ว นำมาสปีนด้วยสารละลายที่เตรียมไว้ข้างต้นด้วยความเร็วรอบในการสปีนที่ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้น นำตัวอย่างที่เคลือบโพลีเมอร์ไปประเหยสารที่เป็นตัวทำละลายออก โดยสารละลายที่มี PAA และ PAAS มีน้ำเป็นตัวทำละลายระเหยโดยการทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง ส่วนสารละลายสำหรับPI นั้นใช้ N-methyl pyrrolidone เป็นตัวทำละลายนั้นนำไปอบเพื่อทำ Thermal curing ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

หลังจากนั้นนำแผ่นฐานซึ่งเคลือบฟิล์มของ  $\text{BaTiO}_3$  แล้วนำมาทำขั้วโลหะชั้นบนอีกครั้งด้วยโลหะนิกเกิล ที่ความหนา 0.1 $\mu\text{m}$  ด้วยการใช้ Metallic mask กันในการทำขั้วให้มีรูปร่างเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ตัวอย่างที่ได้สร้างขึ้นมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 3.7 (ก) และมีลักษณะดังรูปที่ 3.7 (ข)



รูปที่ 3.6 รูปเครื่อง spin และแผนภาพเวลาต่อความเร็วรอบที่ใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.7 (ก)แผนภาพ โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบาง (ข) ตัวอย่างที่ประดิษฐ์

### 3.3 การวัดทดสอบตัวอย่าง

หลังจากการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุแบบฟิล์มบางแล้ว ได้นำตัวอย่างมาทดสอบที่สภาวะต่างๆ ด้วยเครื่องวัด RLC ของยี่ห้อ HP รุ่น HP4274 Multi-Frequency LCR meter ซึ่งมีโหมดต่างๆ ในการใช้งานดังนี้ คือ โหมดในการวัดเป็น ค่าต้านทาน (Resistance, R) ค่าเก็บประจุ (Capacitance, C) ค่าขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductance, L) และค่าสัมบูรณ์อิมพีแดนซ์รวม (Absolute impedance,  $|Z|$ ) เป็นโหมดหลักที่แสดงบน Display A โดยสามารถวัดเทียบกับค่าต่างๆ ได้ คือ ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss, D) ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) ค่าความนำไฟฟ้า (Conductance, G) ค่าอิมพีแดนซ์ และมุม  $\theta$  ระหว่างแกนจริงและจินตภาพซึ่งเป็นค่าแฝงภายในของอุปกรณ์ โดยแสดงค่าบน Display B

สำหรับโหมดของการวัดหลักนั้น ไม่ได้วัดเทียบค่ากับทุกตัวแปรได้ทั้งหมด โดยโหมดของค่าเก็บประจุและค่าขดลวดเหนี่ยวนำสามารถวัดเทียบค่าได้กับค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ค่าตัวประกอบคุณภาพและค่าความนำไฟฟ้า ในโหมดของค่าความต้านทานวัดเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ และในโหมดของค่าสัมบูรณ์อิมพีแดนซ์รวมวัดเทียบกับมุม  $\theta$  และในการแสดงของ Display A และ Display B ยังสามารถกำหนดให้วัดเทียบกันเป็นลักษณะวงจรรอนุกรม หรือขนานได้อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือวัด RLC นำมาวัดค่าเก็บประจุและค่าแฝง โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันที่จ่ายเป็นสนามไฟฟ้าเพื่อผลที่ตอบสนองต่อความถี่และผลของค่าเก็บประจุที่ได้ต่อความถี่ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดด้วยการใช้ค่าแรงดัน 10 mV 100 mV และ 1 V และวัดที่ค่าความถี่ ตั้งแต่ 100 Hz ถึง 100 kHz



รูปที่ 3.8 รูปเครื่องวัด LCR meter HP4274 Multi-Frequency LCR meter





รูปที่ 3.9 รูปขั้ววัดที่ใช้วัดในร่วมกับเครื่องวัด LCR ในงานวิจัย

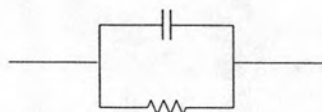
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดความหนาของชั้นฟิล์มและสังเกตผิวหน้าด้วยเครื่อง Confocal laser microscope ซึ่งสามารถทำงานได้ในโหมดต่างๆ คือ ใช้ในโหมด Microscope ปกติ และใช้ในโหมดของ Confocal laser microscope ซึ่งในโหมดนี้สามารถถ่ายและแสดงภาพผิวหน้าได้ทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ



รูปที่ 3.10 รูปเครื่อง Confocal laser microscope

### 3.4 แบบจำลองในการวัดคุณสมบัติตัวเก็บประจุ

ในการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุโครงสร้างโพลิเมอร์/BaTiO<sub>3</sub> โดยใช้โพลิเมอร์ต่างๆ ได้แก่ PAAS PAA และ PI นั้นได้ทำการเก็บข้อมูลค่าเก็บประจุและค่าความสูญเสียของไดอิเล็กทริก ซึ่งทำการวัดผลที่ความถี่ 100 Hz ถึง 100 kHz ที่แรงดัน 1 V สำหรับวงจรสมมูลในการวัดนี้เป็นวงจรแบบขนานดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 รูปของวงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์