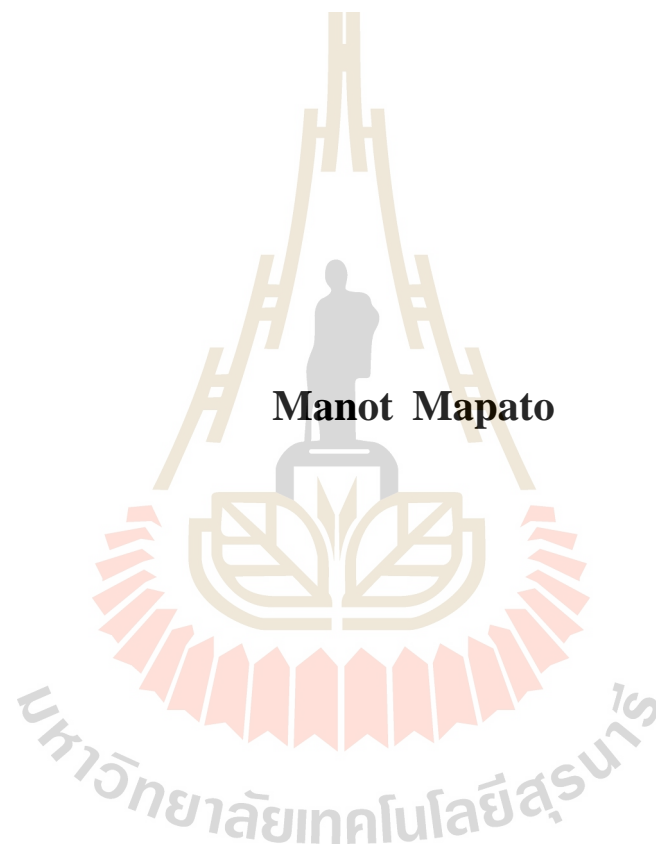


การประยุกต์ใช้กระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอกซ์  
ในการสร้างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2556

**APPLICATIONS OF X-RAY LITHOGRAPHY  
IN FABRICATION OF INDUCTORS  
AND CAPACITORS**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2013**


การประยุกต์ใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์  
ในการสร้างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปริญญาตรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



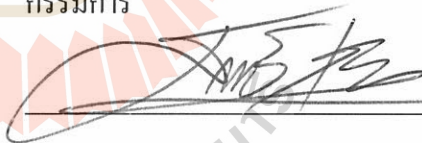
(รศ. ดร.กิติติ อัดถกิจมงคล)  
ประธานกรรมการ



(อ. ดร.นิमित ชมนาวัง)  
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ดร.ประพงษ์ คล้ายสุวรรณ)  
กรรมการ



(รศ. ดร.ธนัชชัย กุลารวานิชพงษ์)  
กรรมการ



(ผศ. ดร.อนันท์ อุ่นศิริไธย์)  
กรรมการ



(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิงานงค์)  
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)  
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มานิตย์ มาปะโท : การประยุกต์ใช้กระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ในการสร้าง  
ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (APPLICATIONS OF X-RAY LITHOGRAPHY IN  
FABRICATION OF INDUCTORS AND CAPACITORS) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์  
ดร.นิमित ชมนาวัง, 170 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคโดยกระบวนการลิโทกราฟี  
ด้วยรังสีเอกซ์ โครงสร้างที่ได้จะไม่ยึดติดกับฐานเหมือนกระบวนการทั่วไป แต่มีลักษณะเป็นโลหะ  
ฝังอยู่ในแผ่นพอลิเมอร์ SU-8 ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายนำไปติดตั้งใช้งานบนวงจรรวม หรือนำไปสร้าง  
โครงสร้างเพิ่มเติมได้ทั้งสองด้าน กระบวนการนี้ได้นำไปประยุกต์สร้างเป็นตัวเก็บประจุสำหรับ  
ใช้งานย่านความถี่วิทยุ และตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรลดแรงดันกระแสตรง ซึ่งในส่วนของตัวเก็บประจุ  
มีโครงสร้างเป็นชิป มีอิเล็กโทรดฝังอยู่ภายใน มีความสูง 350  $\mu\text{m}$  ความหนาไดอิเล็กตริก 25  $\mu\text{m}$   
โครงสร้างมีสองแบบ คือ SUT-CS ซึ่งมีไดอิเล็กตริก เป็น SU-8 จากการทดสอบได้ค่าตัวประกอบ  
คุณภาพสูงสุดที่ความถี่ 0.8 GHz เท่ากับ 2 ค่าความจุไฟฟ้า 4 pF และมี self-resonant frequency ที่  
1.8 GHz ส่วนตัวเก็บประจุ SUT-CA ซึ่งมีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศ มีค่าตัวประกอบคุณภาพสูงสุดที่  
ความถี่ 0.8 GHz เท่ากับ 4 ได้ค่าความจุไฟฟ้า 2 pF และมี self-resonant frequency ที่ 2.2 GHz

สำหรับตัวเหนี่ยวนำ มีโครงสร้างของขดลวดเป็นแบบขดสปริงรูปสี่เหลี่ยม แบ่งเป็นสอง  
โครงสร้าง แบบแรก คือ SUT-L1 เป็นตัวเหนี่ยวนำแกน E-I แบบ 5.5 รอบ และ 3.5 รอบ ใช้วัสดุ  
 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  เป็นแกน มีค่าสภาพซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์เท่ากับ 400 มีช่องอากาศ 60  $\mu\text{m}$  ตัวนำกว้าง  
65  $\mu\text{m}$  มีพื้นที่ 8.3  $\text{mm}^2$  วัดค่าความต้านทานกระแสตรงได้ 21 m $\Omega$  และ 25 m $\Omega$  ค่าความเหนี่ยวนำ  
เปลี่ยนไปตามความถี่ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 120 nH ถึง 60 nH และ 65 nH ถึง 48 nH ที่ความถี่ 30 kHz  
ถึง 20 MHz และตัวเหนี่ยวนำยังไม่เกิดการอิ่มตัวที่กระแสพิคก 1 A ในส่วนของตัวเหนี่ยวนำชนิด  
ที่สอง คือ SUT-L2 มีโครงสร้างเป็นตัวเหนี่ยวนำแบบแกนชนิดพอด มีจำนวนรอบ 3 รอบ ถึง 16 รอบ  
มีพื้นที่ 1.8  $\text{mm}^2$  ถึง 9.5  $\text{mm}^2$  เส้นตัวนำกว้าง 25  $\mu\text{m}$  โครงสร้างมีความสูงประมาณ 360  $\mu\text{m}$  ประกอบ  
ไปด้วย แกนหนา 8  $\mu\text{m}$  ล้อมรอบขดลวด ซึ่งหนา 250  $\mu\text{m}$  และฉนวน 50  $\mu\text{m}$  วัดความต้านทาน  
กระแสตรงได้ 30 m $\Omega$  ถึง 335 m $\Omega$  มีค่าความเหนี่ยวนำที่ 1 MHz เท่ากับ 75 nH ถึง 1.33  $\mu\text{H}$  และ  
มีกระแสอิ่มตัวที่ 420 mA ถึง 150 mA

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา อภิรักษ์ อังโกล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา นิรุตติ เวชกุล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.นิमित ชมนาวัง

MANOT MAPATO : APPLICATIONS OF X-RAY LITHOGRAPHY  
IN FABRICATION OF INDUCTORS AND CAPACITORS. THESIS  
ADVISOR : NIMIT CHOMNAWANG, Ph.D., 170 PP.

#### MICRO INDUCTORS/X-RAY LITHOGRAPHY/EMBEDDED SU-8 CHIP

This work presents new process development for fabrication of LIGA micro structures detaching from substrate in forms of metal microstructure embedded in SU-8 chip. This movable chip can be directly mounted on the ICs. Furthermore, additional structures can be built on both sides of the chips. This process was used for fabricating an embedded SU-8 chip capacitor for RF applications and micro inductors for micro power converter circuits. Two types of capacitors constructed with interdigital electrodes were 350  $\mu\text{m}$ -thick with 25  $\mu\text{m}$ -wide dielectric gap. The SU-8 dielectric capacitor, SUT-CS, has a maximum Q-factor of 2 for 4 pF at 0.8 GHz and self-resonant frequency of 1.8 GHz. The second capacitor with an air gap, SUT-CA, has a maximum Q-factor of 4 for 2 pF at 0.8 GHz and self-resonant frequency of 2.2 GHz.

Two types of rectangular spiral inductors were designed and fabricated. The SUT-L1 inductors consist of 3.5 turns and 5.5 turns with E-I gapped core. These spiral inductors have 65  $\mu\text{m}$ -wide conductor line, 150  $\mu\text{m}$ -thick  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  magnetic core with a relative permeability of 400, 60  $\mu\text{m}$ -wide air-gap and overall area of 8.32  $\text{mm}^2$ . DC resistances were 21  $\text{m}\Omega$  and 25  $\text{m}\Omega$ . The inductances vary in ranges of 60 nH to 120 nH and 48 nH to 65 nH in a frequency range of 20MHz to 30 kHz. The inductors were not saturated when the bias currents were up to 1 A. The SUT-L2 inductors were designed with pot-core type. They were fabricated for 3 turns to 16 turns in area of 1.8  $\text{mm}^2$  to 9.5  $\text{mm}^2$ ,

conductor width of 25  $\mu\text{m}$ , and overall height of 360  $\mu\text{m}$ . The heights of  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  core, insulating layer, and spiral conductor were, 8  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , and 250  $\mu\text{m}$ , respectively. The Measured DC resistances were 30  $\text{m}\Omega$  to 335  $\text{m}\Omega$ . At 1 MHz, the inductances were 75 nH to 1.33  $\mu\text{H}$ . Saturation currents of inductors were in a range of 420 mA to 150 mA.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature \_\_\_\_\_ อภิวัฒน์ อภินันท์

Advisor's Signature \_\_\_\_\_ ศศิธร วัฒนพงศ์

Co-Advisor's Signature \_\_\_\_\_ ดร. นันทิยา อภินันท์

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ การดำเนินงานวิจัยรวมถึงหน่วยงานต่างๆที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย อาทิ อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการทำงานและดำเนินงานวิจัยให้กับผู้วิจัยเสมอมา คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดีมาโดยตลอด ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือสำหรับทำวิจัย สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือวิจัย สถานที่ทำวิจัย ตลอดจนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และทุนสนับสนุนงานวิจัย ทำนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรักความอบอุ่น ความห่วงใย และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยสามารถเผชิญกับปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มานิตย์ มาปะโท

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขีดกลางเบื้องต้น.....	5
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	6
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 บทนำ.....	7
2.1.1 Bulk Micromachining.....	7
2.1.2 Surface Micromachining.....	7
2.1.3 LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung).....	8
2.2 พัฒนาการของกระบวนการสร้าง โครงสร้างสามมิติด้วยการ สร้างตัวนำฝังในแม่พิมพ์.....	9
<b>3 การพัฒนากระบวนการพื้นฐานในงานวิจัย.....</b>	<b>14</b>
3.1 กระบวนการลิโธกราฟี.....	14
3.2 การสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์.....	18
3.2.1 การออกแบบลวดลาย.....	18



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2	การเตรียมส่วนฐานของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ .....	19
3.2.3	การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต .....	21
3.2.4	การชุบโลหะเงิน.....	22
3.3	การใช้งานแกรไฟต์อ่อนในการสร้างโครงสร้างจุลภาค .....	24
3.3.1	ขั้นตอนการเตรียมแกรไฟต์อ่อน .....	24
3.3.2	การใช้งานแกรไฟต์อ่อน.....	25
3.3.3	การชุบโลหะบนแกรไฟต์อ่อน .....	28
3.4	การสร้างสมการสำหรับการหาค่าสารไวแสงเพื่อให้ได้ความหนาคงที่ .....	30
3.5	การชุบโลหะ NiFe สารเคมี และการพัฒนาชุดชุบโลหะ.....	31
3.6	การพัฒนากระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคแบบฝังในแม่พิมพ์ SU-8 .....	34
4	<b>ทฤษฎี และการวัดผล.....</b>	<b>37</b>
4.1	ตัวเก็บประจุ และการวัดที่ความถี่สูง .....	37
4.1.1	S-parameter .....	37
4.2	ตัวเหนี่ยวนำจุลภาคกำลัง และการวัดผล .....	41
4.2.1	การวัดค่าความเหนี่ยวนำ ด้วย VNA.....	42
4.2.2	การทดสอบการอิ่มตัวของแกนตัวเหนี่ยวนำ ด้วย bias-tee ร่วมกับ VNA...46	
4.2.3	การวัดค่าความต้านทานแบบสี่จุด (4-Probe measurement).....	50
4.2.4	การวัดค่า Hysteresis loop (BH Curve) เพื่อหาค่า Permeability ( $\mu$ ) ของวัสดุ.....	53
4.2.5	การออกแบบ โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำกระแสตรง (DC inductor design) ....	61
5	<b>การพัฒนาตัวเก็บประจุจุลภาคความถี่สูงแบบฝังตัวในแม่พิมพ์ SU-8 ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ .....</b>	<b>63</b>
5.1	ประสิทธิภาพกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	63
5.1.1	ตัวเก็บประจุแบบใช้ออกไซด์ที่ขาคัดของ MOSFET .....	64
5.1.2	ตัวเก็บประจุแบบโลหะ-ฉนวน-โลหะ (MIM).....	64
5.1.3	ตัวเก็บประจุแบบ Poly-insulator gate poly .....	64

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.4	ตัวเก็บประจุแบบ Interdigital electrodes (IDC).....	64
5.2	ทฤษฎีและการออกแบบ.....	66
5.3	กระบวนการสร้าง.....	69
5.4	ผลการวัด สรุป และวิเคราะห์.....	74
<b>6</b>	<b>ตัวเหนี่ยวนำจุลภาคกำลัง ระบบกล-ไฟฟ้าจุลภาคสำหรับ</b>	
	<b>วงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง.....</b>	<b>82</b>
6.1	บทนำ .....	82
6.2	ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	91
6.3	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ.....	101
6.3.1	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L1.....	102
6.3.2	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L2.....	107
6.4	กระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำ.....	112
6.4.1	กระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L1 .....	113
6.4.2	กระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L2 .....	124
6.5	ผลการวัด สรุป และวิเคราะห์.....	137
6.5.1	ผลการวัดของตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L1.....	137
6.5.2	ผลการวัดของตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L2.....	147
<b>7</b>	<b>สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>156</b>
7.1	สรุปงานวิจัย.....	156
7.2	การพัฒนางานวิจัยในอนาคต .....	158
	รายการอ้างอิง .....	160
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ขั้นตอนการผสมน้ำยาชุบโลหะ $Ni_{80}Fe_{20}$ ปริมาตร 1 ลิตร.....	164
	ภาคผนวก ข. การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์บนแกรไฟต์อ่อน .....	166
	ภาคผนวก ค. การสร้างแผ่นพอลิเมอร์ฝังตัวนำ .....	168
	ประวัติผู้เขียน .....	170

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ส่วนผสมน้ำยาชุบแกนตัวเหนียวสำหรับแกนชนิด NiFe และ NiFeMo .....32
4.1	คุณลักษณะสมบัติของวัสดุ NiFe ที่ได้จากการทดสอบ .....60
5.1	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง .....81
6.1	สรุปคุณลักษณะสมบัติของตัวความเหนียว งานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน..... 100
6.2	ค่าความต้านทานกระแสตรงจากการออกแบบตามโครงสร้าง SUT-L1..... 105
6.3	ค่าความต้านทานกระแสตรงจากการคำนวณตามโครงสร้างที่ออกแบบ..... 108
6.4	คุณลักษณะสมบัติของวัสดุ NiFe ที่ได้จากการวัด..... 109
6.5	พารามิเตอร์ของตัวเหนียว SUT-L2 ที่ออกแบบสร้าง..... 112
6.6	ค่าความต้านทานกระแสตรงจากการคำนวณตามขนาดที่สร้างได้จริง และ จากการวัด ...139
6.7	ค่าความเหนียวของตัวเหนียว SUT-L1 ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับผลการวัดที่ความถี่ 1 MHz..... 142
6.8	ค่าความต้านทานกระแสตรงของตัวเหนียวจุลภาคกำลังที่ได้จาก การคำนวณเทียบกับผลการวัดจากโครงสร้างจริง ..... 147
6.9	ค่าความเหนียวของตัวเหนียว SUT-L2 ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับผลการวัดที่ความถี่ 5 MHz..... 149
6.10	ค่ากระแสอิ่มตัวของตัวเหนียวจุลภาคกำลังที่ได้จากการผลการวัด ..... 149

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	เปรียบเทียบชิ้นส่วนจุลภาคในแม่พิมพ์พอลิเมอร์ .....	2
1.2	แบบจำลองโครงสร้างตัวเก็บประจุแบบขีปที่ได้จากกระบวนการ ลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์.....	3
1.3	แสดงค่าความต้านทานของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ที่ความหนา 0 - 500 $\mu\text{m}$ .....	4
1.4	แบบจำลองโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำจุลภาคแกน NiFe .....	4
2.1	Bulk micromachining และ Surface micromachining.....	8
2.2	Electroplated copper via.....	9
2.3	Inter connected copper via and bridge .....	10
2.4	ตัวเหนี่ยวนำแบบใช้แกนของเส้นตัวนำเป็นสารไวแสง SU-8.....	11
2.5	ตัวเหนี่ยวนำที่ฝังอยู่ในแม่พิมพ์ซิลิโคน และ SU-8.....	12
2.6	แบบจำลองโครงสร้างตัวนำที่ฝังอยู่ในแม่พิมพ์ SU-8 หลังการกำจัดฐาน .....	12
3.1	การสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ .....	15
3.2	องค์ประกอบของระบบลำแสงซินโครตรอน BL-6a: DXRL ที่ใช้สำหรับกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์.....	17
3.3	แสดงพลังงานส่วนต่าง ๆ ในเนื้อสารไวแสง.....	17
3.4	ลวดลายที่ออกแบบโดยโปรแกรม Layout Editor.....	18
3.5	หน้ากากกันแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีลวดลายจุลภาคขนาด 30 $\mu\text{m}$ ซึ่งพิมพ์ลง บนฟิล์มใสด้วยแสงเลเซอร์ความละเอียด 3,600 จุดต่อนิ้ว .....	19
3.6	แผ่นใสที่เคลือบโลหะ ไทเทเนียม และเงินซึ่งใช้เป็นฐานรองรับลวดลายของโลหะเงิน ....	20
3.7	การเตรียมฐานสำหรับหน้ากากกันรังสีเอกซ์.....	21
3.8	แม่พิมพ์สารไวแสง SU-8.....	22
3.9	กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์.....	23
3.10	แม่พิมพ์สารไวแสงที่ชุบเงินจนเต็มแล้ว .....	24
3.11	หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่สร้างบนแกรไฟต์อ่อน.....	25
3.12	การรีดแผ่นแกรไฟต์อ่อนด้วยเครื่องรีด PCB.....	26

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13	แกรไฟต์อ่อนหลังการทำความสะอาด และติดบนกระจก.....26
3.14	ลวดลายสารไวแสงบนแกรไฟต์อ่อน สำหรับโครงสร้างที่ซับซ้อน .....27
3.15	หน้ากากกันรังสีเอกซ์บนฐานแกรไฟต์อ่อน.....27
3.16	แสดงการขีดเกาะของ โครงสร้าง SU-8 กว้าง 50 um สูง 300 um บนฐานแกรไฟต์อ่อน.....28
3.17	ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการชุบทองแดงและซัดเรียบ .....29
3.18	การชุบ โลหะทองแดงบนแกรไฟต์อ่อนด้วยกระแสคงที่ 5 ถึง 30 mA/cm <sup>2</sup> .....29
3.19	สมการความหนาของสารไวแสง SU-8 2100 จากการหยดสารไวแสง ในพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว สำหรับความหนามากกว่า 300 μm.....31
3.20	โครงสร้าง NiFe ที่เสียหาย เนื่องจากฟองที่เกิดขึ้นในกระบวนการชุบโลหะ.....32
3.21	ชุดชุบโลหะ NiFe .....33
3.22	โลหะ NiFe ที่ได้จากการชุบด้วยชุดชุบ โลหะที่สร้างขึ้น .....33
3.23	โลหะ NiFe หลังการซัดเรียบ .....34
3.24	แผ่นแม่พิมพ์ SU-8 หนา 250 μm ที่มีขีดทองแดงฝังอยู่ใน .....35
3.25	ภาพตัดขวางของตัวเหนี่ยวนำ ที่ได้นำแผ่นแม่พิมพ์ SU-8 350 μm มาประยุกต์ใช้งาน.....36
4.1	Vector Network Analyzer Agilent 8753ES 30 kHz – 6 GHz.....38
4.2	Two port network .....38
4.3	แบบจำลองชนิด 1 พอร์ตของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ.....40
4.4	การวัดค่าความเหนี่ยวนำด้วยวิธีการวัดเฟสของกระแสและแรงดัน.....42
4.5	แผนผังการทดสอบตัวเหนี่ยวนำจุลภาคแบบ 1 พอร์ตด้วยเครื่อง Vector Network Analyzer (VNA) Agilent 8650ES 30 kHz – 6 GHz. ....43
4.6	แบบจำลอง 1 พอร์ตสำหรับตัวเหนี่ยวนำจุลภาคความถี่ระดับ MHz.....44
4.7	ตัวเหนี่ยวนำจุลภาคกำลังบน PAD เชื่อมต่อกับ N-type connector.....44
4.8	parameter ของตัวเหนี่ยวนำชนิด 3.5 และ 5.5 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 1 GHz....45
4.9	แสดงค่าความเหนี่ยวนำ ของตัวเหนี่ยวนำชนิด 3 รอบ และ 5 รอบ ที่วัดด้วย VNA .....45
4.10	Bias-Tee และวงจรสมมูลอย่างง่าย .....46
4.11	การเชื่อมต่อชุดทดสอบการอิมิตัวของแกนตัวเหนี่ยวนำเข้ากับ VNA.....47
4.12	ชุดแหล่งจ่ายกระแสสำหรับ Bias-Tee.....47

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	ชุดทดสอบการอิมิตัวของแกนตัวเหนี่ยวนำ .....48
4.14	แสดงค่าความเหนี่ยวนำเมื่อป้อนกระแสขนาด 0 mA และ 1 A ของตัวเหนี่ยวนำชนิด 3 รอบ และ 5 รอบ .....49
4.15	แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่ 5 10 และ 20 MHz ของตัวเหนี่ยวนำชนิด 3.5 รอบ .....49
4.16	วงจรการวัดค่าความต้านทานแบบสี่จุด .....51
4.17	การทดสอบความสามารถในการนำกระแสของลวดคอลลูมิเนียม .....51
4.18	แผนผังเครื่องมือสำหรับการทดสอบค่าความต้านทานกระแสตรง โดยวิธีการวัดแบบสี่จุด .....52
4.19	ค่าความต้านทานกระแสตรงของตัวเหนี่ยวนำจุลภาคชนิด 3.5 รอบ .....52
4.20	ค่าความต้านทานกระแสตรงของตัวเหนี่ยวนำจุลภาคชนิด 5.5 รอบ .....53
4.21	แผนผังวงจรสำหรับทดสอบ B-H curve .....56
4.22	กระแส และ แรงดันของแกนเหล็กที่ใช้ทดสอบ .....56
4.23	B-H curve ของตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กเชิงพาณิชย์ที่ความถี่ 50 Hz.....57
4.24	กระแส และ แรงดันของแกนเฟอร์ไรท์ที่ใช้ทดสอบ .....57
4.25	B-H curve ของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรท์เชิงพาณิชย์ที่ความถี่ 4 kHz.....58
4.26	วงแหวน NiFe สำหรับใช้ทดสอบค่า permeability .....59
4.27	กระแส และ แรงดันของแกน NiFe ที่ใช้ทดสอบ ที่ความถี่ 20 kHz .....60
4.28	B-H curve ของแกน NiFe ที่ความถี่ 20 kHz .....60
4.29	ความหนาแน่นฟลักซ์ที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรง และ กระแสสลับของตัวเหนี่ยวนำ .....61
5.1	ตัวเก็บประจุ coupling .ในวงจรความถี่สูง .....63
5.2	ตัวเก็บประจุแบบ Interdigital electrode แบบแบนราบ .....65
5.3	ตัวเก็บประจุแบบ Interdigital electrode แบบชิป สัดส่วนสูง .....66
5.4	Lump model of RF capacitors .....66
5.5	การแปลงแบบจำลอง 1 พอร์ตสำหรับตัวเก็บประจุ เพื่อสะท้อนลักษณะทางกายภาพ .....67
5.6	โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบซี่หวี .....68
5.7	ลวดลายที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Layout Editor และ หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ .....70
5.8	แม่พิมพ์สารไวแสงหนา 400 $\mu\text{m}$ จากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ .....71

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.9	ตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นพร้อมกันในครั้งเดียว บนพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว .....	72
5.10	ตัวเก็บประจุในแม่พิมพ์ SU-8 หลังการชุบทองแดง และ ชัดเรียบ .....	72
5.11	กระบวนการสร้างตัวเก็บประจุ แบบฝังในแม่พิมพ์.....	73
5.12	การเชื่อมลูกบอลตะกั่วที่ตัวเก็บประจุ สำหรับการทำให้ flip-chip.....	73
5.13	ตัวเก็บ SUT-CA ประจุหลังการสกัดแม่พิมพ์ SU-8 ออกแล้ว .....	74
5.14	ภาพถ่ายด้านบนบนแสดงการเชื่อมตัวเก็บประจุเข้ากับชุดทดสอบ .....	75
5.15	ภาพถ่ายด้านข้างแสดงการเชื่อมตัวเก็บประจุ เข้ากับชุดทดสอบ .....	75
5.16	การเชื่อมตัวเก็บประจุ เข้ากับชุดทดสอบพร้อม SMA.....	76
5.17	Vector Network Analyzer HP 8277D 50 MHz - 40 GHz .....	76
5.18	$S_{11}$ ของตัวเก็บประจุช่องอากาศ และ SU-8 .....	77
5.19	เปรียบเทียบส่วนจินตภาพของตัวเก็บประจุ SUT-CA ที่ได้จากการวัด และการสร้างแบบจำลอง .....	78
5.20	เปรียบเทียบส่วนจินตภาพของตัวเก็บประจุ SUT-CS ที่ได้จากการวัด และการสร้างแบบจำลอง .....	78
5.21	ค่าความจุไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง.....	79
5.22	ค่าความเหนี่ยวนำอนุกรมที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง.....	79
5.23	เปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไดอิเล็กตริกอากาศ SUT-CA ที่ได้จากการวัด และการสร้างแบบจำลอง โดยการแปรค่า $L_s$ และ $C_s$ .....	80
5.24	เปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไดอิเล็กตริกอากาศ SUT-CS ที่ได้จากการวัด และการสร้างแบบจำลอง โดยการแปรค่า $L_s$ และ $C_s$ .....	80
5.25	ตัวประกอบกำลังของตัวเก็บประจุ.....	81
6.1	แสดงวงจร DC-DC converter บนบอร์ดพัฒนาเชิงพาณิชย์.....	83
6.2	วงจรแปรผันแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงเชิงพาณิชย์แบบ switching inductive converter.....	84
6.3	วงจร DC-DC เชิงพาณิชย์ ที่ทำงานที่ความถี่ 65 kHz และ 1 MHz .....	85
6.4	แสดงแนวทางการพัฒนางจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง .....	86
6.5	แสดงวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดบรรจุตัวเหนี่ยวนำ ของ Epirion.....	87
6.6	โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำชนิดมีแกนเป็นวัสดุ high permeability แบบ helix.....	88

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.7	โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำเชิงพาณิชย์ แบบ SMD .....89
6.8	แสดงค่าความต้านทานของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ 3 รอบ ที่ความหนาของ ขดลวด 0-500 $\mu\text{m}$ .....90
6.9	ตัวเหนี่ยวนำโครงสร้างแกนค้ำของ Sato (1994).....91
6.10	Spiral type inductive structure ของ Ahn (1998) .....92
6.11	ตัวเหนี่ยวนำแบบขดสปริง ปิดทับด้วยแผ่นวัสดุ High permeability ของ Takayama (2000).....92
6.12	DC-DC converter module and Spiral type inductive structure .....93
6.13	UV-LIGA Spiral type inductor ของ Daniel J. Sadler และ คณะ (2001).....94
6.14	ภาพตัดขวางตัวเหนี่ยวนำแบบขดสปริงคู่ ที่มีโครงสร้างแกนแบบแกนค้ำ ของ Kim และคณะ (2002).....94
6.15	โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบหลายชั้น J. W. Park และ M. Allen (2003).....95
6.16	แสดงโครงสร้าง และ ขนาดของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ ของ M. Saidani และ M. A. M. Gijs (2003) .....95
6.17	แสดงโครงสร้างและขนาดของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ของ Fukuda (2003).....96
6.18	แสดงโครงสร้างและขนาดของตัวเหนี่ยวนำชนิดฟิล์มบางของ Fumihito Sato (2004).....97
6.19	แสดงโครงสร้างและขนาดของตัวเหนี่ยวนำตัวเหนี่ยวนำบนซิลิกอน ของ Ninging Wang และคณะ (2005) .....97
6.20	แสดงโครงสร้างและขนาดของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ ของ B. Orlando และคณะ (2006) .....98
6.21	แสดงโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำที่หุ้มด้วย Permalloy ของ M. Wang และคณะ (2007).....98
6.22	แสดงโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำบนซิลิกอน ของ T. O'Donnell และ คณะ (2008).....99
6.23	แสดงโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำทรงทอรอยด์ที่มีแกนเป็น Permalloy ของ M. Wang (2011) .....99



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.24	เปรียบเทียบค่าความเหนียวนำ และความต้านทานต่อพื้นที่ของตัวเหนียวนำ ในงานวิจัยตั้งแต่อดีต จนถึงปัจจุบัน ..... 101
6.25	โครงสร้างจำลองของตัวเหนียวนำโครงสร้าง SUT-L1 ..... 103
6.26	โครงสร้างจำลองของขดลวดตัวเหนียวนำโครงสร้าง SUT-L1 ..... 104
6.27	ค่าความต้านทานของขดลวดเทียบกับความสูงของตัวนำ ..... 105
6.28	แบบจำลองตัวเหนียวนำโครงสร้าง SUT-L1 สำหรับใช้คำนวณ ..... 107
6.29	ตัวเหนียวนำโครงสร้าง SUT-L2 ..... 108
6.30	Skin depth ของ NiFe เทียบกับค่าความถี่ ..... 110
6.31	พารามิเตอร์โครงสร้างตัวเหนียวนำ SUT-L2 ..... 111
6.32	ลดทลายหน้ากักสามชั้นของตัวเหนียวนำ SUT-L1 บนโปรแกรม Layout Editor ..... 114
6.33	หน้ากักกันรังสีเอกซ์บนฐานแกรไฟต์อ่อน ..... 115
6.34	แม่พิมพ์สารไวแสงหนา 350 $\mu\text{m}$ จากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ..... 115
6.35	ขดลวดตัวเหนียวนำ ในแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 หลังการชุบทองแดง และขัดเรียบ ..... 116
6.36	กระบวนการสร้างขดลวดเหนียวนำ ..... 117
6.37	ขดลวดทองแดงในแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 ..... 117
6.38	แม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 สำหรับชุบโลหะ NiFe ..... 118
6.39	กระบวนการสร้างแผ่น NiFe ชั้นบนและล่าง ..... 119
6.40	โลหะ NiFe ที่ได้จากการชุบจันสันแม่พิมพ์ และขัดเรียบ ..... 120
6.41	ชั้นขดลวดตัวนำเมื่อประกบลงบนชั้นแกน NiFe ..... 121
6.42	ขดลวดเหนียวนำหลังจากกัดทองแดง และล้างสารไวแสงเพื่อให้ได้แม่พิมพ์ของ NiFe .. 122
6.34	โครงสร้างตัวเหนียวนำหลังการเติม NiFe ลงในแม่พิมพ์ชั้นกลาง ..... 122
6.44	โครงสร้างตัวเหนียวนำที่เสร็จสมบูรณ์ เทียบกับแบบจำลอง ..... 122
6.45	ภาพตัดขวางโครงสร้างตัวเหนียวนำที่สร้างได้จริง ..... 123
6.46	โครงสร้างตัวเหนียวนำที่สร้างใน 1 ครั้ง ..... 123
6.47	โครงสร้างตัวเหนียวนำถ่ายภาพด้วยเครื่องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ..... 123
6.48	ภาพตัดขวางแสดงกระบวนการสร้างตัวเหนียวนำจุลภาคกำลัง ..... 124
6.49	ลดทลายขดลวดตัวเหนียวนำ SUT-L2 บนโปรแกรม Layout Editor ..... 126

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.50	ลวดลายหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ของโครงสร้าง SUT-L2 บนฐานแกรไฟต์อ่อน.....127
6.51	แม่พิมพ์สารไวแสงหนา 350 $\mu\text{m}$ สำหรับขดลวดโครงสร้าง SUT-L2 ..... 127
6.52	ขดลวดตัวเหนี่ยวนำในแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 หลังการชุบทองแดง และ ชัดเรียบ ..... 128
6.53	กระบวนการสร้างชั้นขดลวดทองแดงของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ..... 129
6.54	ขดลวดทองแดงในแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 ..... 129
6.55	ขดลวดทองแดงในแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 หลังกำจัดส่วนฐาน ..... 130
6.56	การอบชิ้นงาน เมื่อทำการเคลือบสารไวแสงทั้งสองด้าน ..... 131
6.57	ชิ้นงานที่ผ่านการกัดทองแดงเพื่อเปิดแม่พิมพ์ของ NiFe ..... 131
6.58	ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบ dry film และเปิดลวดลาย ..... 132
6.59	ชิ้นงานที่ติดตั้งบนชุดหมุนเคลือบโลหะสำหรับเครื่อง sputter ..... 133
6.60	ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบทองแดง และ lift-off ..... 133
6.61	เส้นตัวนำเชื่อมชิ้นงานแต่ละตัวเข้าด้วยกัน ..... 134
6.62	ความเครียดที่เกิดขึ้นในโลหะ NiFe ..... 134
6.63	ตัวเหนี่ยวนำที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ และตัดแยกออกจากชิ้นงาน ..... 135
6.64	ภาพตัดขวางของตัวเหนี่ยวนำชนิด 5 รอบ ..... 135
6.65	ภาพตัดขวางกระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2..... 136
6.66	ภาพถ่ายเส้นลวดเชื่อมต่อสายขนาด 20 $\mu\text{m}$ จากกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอน แบบส่องกราด..... 137
6.67	ตัวเหนี่ยวนำบนแผ่นวงจรพิมพ์ เชื่อมกับ N-type connector สำหรับการทดสอบความ ต้านทานกระแสตรง และทดสอบที่ความถี่สูง ..... 138
6.69	ชุดตัวเหนี่ยวนำบนแผ่นวงจรพิมพ์ เชื่อมกับ N-type connector ..... 138
6.69	ภาพตัดขวางแสดงขนาดของขดลวดตัวเหนี่ยวนำที่สร้างได้จริง ..... 139
6.70	ค่า $S_{11}$ ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 และ แผ่นวงจรพิมพ์ในช่วงความถี่ 30 kHz ถึง 1 GHz ซึ่งรวมผลของค่าความจุไฟฟ้าจากแผ่นวงจรพิมพ์ ..... 140
6.71	ค่า $S_{11}$ ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 1 GHz ที่ได้ตัดค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นวงจรพิมพ์แล้ว..... 140
6.72	ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 20 MHz ..... 141

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.73	ค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 20 MHz.....	141
6.74	แบบจำลองอนุกรมและแบบผสมของตัวเหนี่ยวนำ.....	142
6.75	แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ชนิด 5.5 รอบ ที่วัดได้จริง เทียบกับการสร้างแบบจำลองที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 50 MHz .....	143
6.77	แสดงค่าความจุไฟฟ้าขนานจากการสร้างแบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ชนิด 3 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 10 MHz.....	144
6.78	แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากแบบจำลองอนุกรม เทียบกับแบบจำลองขนานของ ตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ชนิด 5.5 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 20 MHz.....	144
6.79	ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำเมื่อไบอัสกระแสในช่วง 0 ถึง 1 A .....	145
6.80	เปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำ และ ความต้านทานต่อพื้นที่ ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 เทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ.....	146
6.81	เปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 เทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ.....	146
6.82	ค่า S11 ของตัวเหนี่ยวนำ L2 และ แผ่นวงจรพิมพ์ในช่วงความถี่ 30 kHz ถึง 1 GHz ซึ่งรวมผลของค่าความจุไฟฟ้า และ หลังลบผลของแผ่นวงจรพิมพ์ .....	148
6.83	ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 20 MHz .....	149
6.84	ค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 20 MHz.....	150
6.85	แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ชนิด 3 รอบ ที่วัดได้จริง เทียบกับการสร้างแบบจำลองที่ความถี่ในช่วง 30 KHz ถึง 30 MHz .....	150
6.86	แสดงค่าความจุไฟฟ้าขนานจากการสร้างแบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ชนิด 3 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 KHz ถึง 10 MHz.....	151
6.87	แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากแบบจำลองอนุกรม เทียบกับแบบจำลองขนาน ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ชนิด 3 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 KHz ถึง 30 MHz.....	151
6.88	แสดงค่าความจุไฟฟ้าขนานจากการสร้างแบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ชนิด 16 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 KHz ถึง 10 MHz.....	152
6.89	แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากแบบจำลองอนุกรม เทียบกับแบบจำลองขนาน ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ชนิด 16 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 KHz ถึง 30 MHz.....	152

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.90	ค่าความเหนียวนำของตัวเหนียวนำ SUT-L2 เมื่อ ไบอัสกระแสในช่วง 0 ถึง 1 A .....153
6.91	เปรียบเทียบค่าความเหนียวนำ และความต้านทานต่อพื้นที่ ของตัวเหนียวนำ เทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ.....155
6.92	เปรียบเทียบค่าความเหนียวนำและความต้านทาน ต่อพื้นที่ ของตัวเหนียวนำ เทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ.....155
7.1	แสดงค่าความเหนียวนำและควมนำต่อพื้นที่ของตัวเหนียวนำในงานวิจัยนี้ เทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ.....157
7.2	ตัวเหนียวนำและตัวเก็บประจุในงานวิจัยนี้บางส่วน .....158
7.3	หม้อแปลงจลนภาคแบบวางซ้อน .....159
7.3	ตัวขับเร้าชี้หวีในแผ่นแม่พิมพ์ SU-8 .....159



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีวงจรรวม เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะทางด้านการสื่อสาร วงจรสำหรับใช้งานในย่านความถี่วิทยุ (RF) เหล่านี้ ถูกพัฒนาให้วงจรมีขนาดเล็กลงมาก ในปัจจุบันสามารถสร้างลวดลายวงจรได้ถึงระดับนาโนเมตร อย่างไรก็ตาม วงจรเหล่านี้ยังต้องการส่วนประกอบอื่น ๆ ในการทำงาน ซึ่งส่วนประกอบของวงจรมากกว่า 80% เป็นอุปกรณ์แพสซีฟ (Frye, 1997) เมื่อวงจรรวมทำงานที่ความถี่สูงขึ้น อุปกรณ์แพสซีฟที่ใช้งานจะมีขนาดเล็กลง นักวิจัยในยุคต่อมาจึงเริ่มมีการนำอุปกรณ์เหล่านี้บรรจุลงบนวงจรรวมโดยตรง เพื่อเป็นการเพิ่มความหนาแน่นในการบรรจุ (integration density) ส่งผลให้วงจรมีขนาดเล็กลง และเป็นการลดต้นทุน แต่การสร้างอุปกรณ์ขนาดเล็ก ที่ให้ประสิทธิภาพการทำงานสูง ยังทำได้ยาก จึงได้มีการนำเทคโนโลยีระบบกล-ไฟฟ้าจุลภาค (Micro electro-mechanical system : MEMS) เข้ามาใช้ผลิตโครงสร้างจุลภาคเหล่านี้ ซึ่งสามารถสร้างโครงสร้างสามมิติสัดส่วนสูง (high-aspect ratio) ที่ให้ประสิทธิภาพการทำงานดีกว่า ยกตัวอย่าง เช่น ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรมีความถี่สูง ในยุคแรกจะเป็นแบบฟิล์มบางในระนาบ (Yue, 1998) ซึ่งมีประสิทธิภาพการทำงานต่ำ แต่เมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบสามมิติที่เป็น โครงสร้างสัดส่วนสูงที่สร้างด้วยเทคโนโลยีดังกล่าว จะมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่า (Lu, 2004) นอกจากนี้การสร้างด้วยโครงสร้างสามมิติ ยังสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติบางประการของอุปกรณ์ที่ต้องการสร้างได้ โดยที่ใช้พื้นที่เท่าเดิม เช่น การสร้างตัวเก็บประจุแบบ อินเตอร์ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสัดส่วนสูง จะให้ค่าความจุไฟฟ้าสูงกว่าแบบซึ่งวางในระนาบ เป็นต้น

การสร้างแม่พิมพ์เป็นกระบวนการเริ่มต้นที่สำคัญของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนจุลภาค วิธีการสร้างมีหลายแบบ เช่น การกัดซิลิกอน การกัดด้วยลำไอออน และลิโทกราฟี เป็นต้น กระบวนการที่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน ได้แก่ กระบวนการลิโทกราฟี เนื่องจากสามารถสร้างโครงสร้างสามมิติขึ้นในพอลิเมอร์โดยตรง และสร้างได้รวดเร็ว แม่พิมพ์พอลิเมอร์ที่ได้ จะถูกกำจัดทิ้งในภายหลัง แต่เนื่องจากพอลิเมอร์เหล่านี้ ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยสารเคมี ต้องใช้การกัดด้วยพลาสมา ซึ่งใช้เวลานาน นักวิจัยในยุคต่อมา จึงเริ่มมีการออกแบบโครงสร้างที่ไม่ต้องมีการกำจัดแม่พิมพ์ (Keller and Howe, 1995) โดย ให้แม่พิมพ์เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง ช่วยเพิ่มความ

แข็งแรง หรือ เพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้าบางประการ โครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จุลภาค จึงสามารถที่จะพัฒนาโครงสร้างให้ฝังตัวอยู่ในแม่พิมพ์ เพื่อลดต้นทุน และ เวลาในการกำจัดแม่พิมพ์

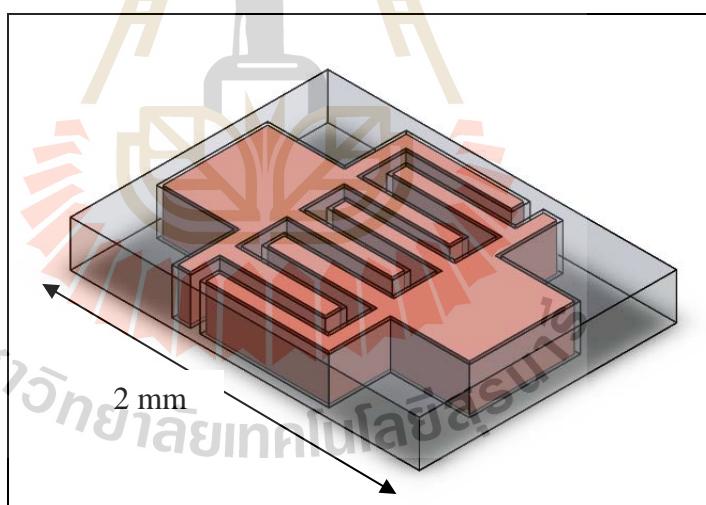
อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไป โครงสร้างที่ได้จะยึดติดกับส่วนฐานดังรูปที่ 1.1 (ก) เป็นข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดในการพัฒนากระบวนการสร้างชิ้นส่วนจุลภาค แบบฝังในแม่พิมพ์ ซึ่งมีประโยชน์ในเรื่องของการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น สามารถสร้างเป็นขดลวดฝังในแม่พิมพ์ เพื่อนำไปเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าได้ทั้งสองด้าน อีกทั้งแม่พิมพ์ ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน และสามารถออกแบบสร้างเป็นโครงสร้างแบบชิป เพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายไปติดตั้งบนวงจรรวมในภายหลังได้



รูปที่ 1.1 เปรียบเทียบชิ้นส่วนจุลภาคในแม่พิมพ์พอลิเมอร์

ในงานวิจัยนี้ นำเสนอวิธีการสร้างโครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง แบบฝังตัวในแม่พิมพ์ SU-8 โดยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นโครงสร้างสัดส่วนสูง มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างในช่วง 5 ถึง 10 โครงสร้างจะถูกกำจัดส่วนฐานทิ้งไป เหลือเป็นแผ่นพอลิเมอร์ใส สามารถสร้างโครงสร้างเพิ่มเติมได้ทั้งสองด้าน หรือ นำไปยึดกับวงจรรวมได้ทันที ซึ่งกระบวนการนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์สร้างเป็นตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำจุลภาค โครงสร้างสัดส่วนสูงที่ได้ จะมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น

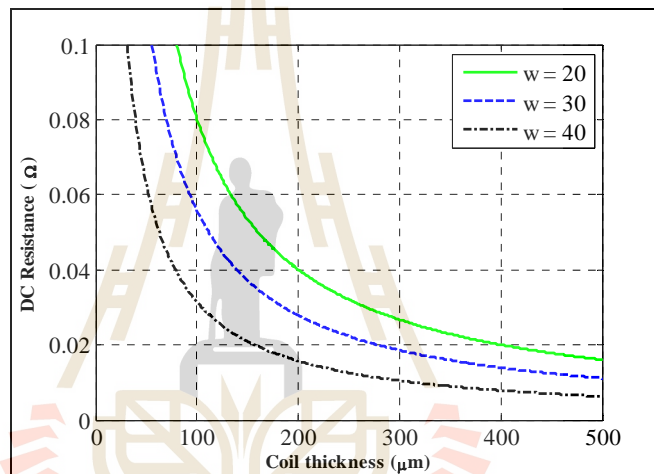
งานวิจัยในส่วนที่สองเป็นการนำกระบวนการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้สร้างตัวเก็บประจุ สำหรับใช้งานในย่านความถี่วิทยุ ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าความจุไฟฟ้าที่ต้องการอยู่ในช่วง 0.01pF ถึง 100 pF (Bahl, 2003) จึงสามารถสร้างโดยใช้เทคนิคลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์โดยตรง โครงสร้างที่ได้จะเป็นชิปตัวเก็บประจุ สามารถนำไปบรรจุบนวงจรรวม โดยเชื่อมด้วยกระบวนการ กลับชิป (flip-chip) ไม่ต้องมีการกำจัดแม่พิมพ์ออก แม่พิมพ์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง และยังช่วยเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าให้สูงขึ้นประมาณ 3 เท่าของไดอิเล็กตริกอากาศ รูปที่ 1.2 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของตัวเก็บประจุ สำหรับการประยุกต์ใช้งาน



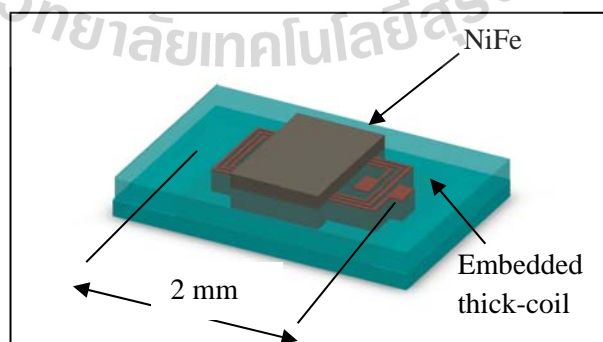
รูปที่ 1.2 แบบจำลองโครงสร้างตัวเก็บประจุแบบชิปที่ได้จากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์

สำหรับงานวิจัยในส่วนที่สาม เป็นการนำกระบวนการดังกล่าว ประยุกต์ใช้สร้างตัวเหนี่ยวนำจุลภาค สำหรับใช้ในวงจรลดแรงดันกระแสตรง ซึ่งคุณสมบัติที่มีความสำคัญในการสร้างตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้คือ ต้องมีค่าความต้านทานกระแสตรง ต่ำ และมีค่าความเหนี่ยวนำอยู่ในช่วง nH ในงานวิจัยส่วนที่สองนี้ จึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้ข้อดีของแสงซินโครตรอน

ที่มีความสามารถในการสร้างโครงสร้างสามมิติ ให้มีความสูงมากกว่าความกว้าง (high-aspect ratio) ในปัจจุบัน สามารถสร้างขดลวดที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างได้มากถึง 10 เท่า ซึ่งหากนำมาใช้สร้างขดลวดจะสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้วยการเพิ่มความสูง โดยที่ขนาดของตัวเหนี่ยวนำไม่เพิ่มขึ้น แต่ยังคงสามารถออกแบบความสูงให้น้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตรได้ รูปที่ 1.3 แสดงค่าความต้านทานกระแสดตรงของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ชนิด 3 รอบ ที่ความหนาของขดลวด 0 ถึง 500  $\mu\text{m}$  จะเห็นว่า ที่ความสูง 300  $\mu\text{m}$  เส้นตัวนำกว้าง 30  $\mu\text{m}$  ขดลวดจะมีค่าความต้านทานกระแสดตรงที่ 20 มิลลิโอห์มเท่านั้น ซึ่งมีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับตัวเหนี่ยวนำเชิงพาณิชย์ และ ตัวเหนี่ยวนำจูลภาคในงานวิจัยอื่นๆ



รูปที่ 1.3 แสดงค่าความต้านทานของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ที่ความหนา 0 ถึง 500  $\mu\text{m}$



รูปที่ 1.4 แบบจำลองโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำจูลภาคแกน NiFe



## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- ประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนในการสร้างโครงสร้างจุลภาคด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ และพัฒนากระบวนการสร้างแผ่นแม่พิมพ์พอลิเมอร์ฝังตัวนำ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- พัฒนาตัวเหนี่ยวนำจุลภาคที่มีค่าความต้านทานต่ำ และ ความเหนี่ยวนำสูงโดยใช้เทคโนโลยีแสงซินโครตรอน
- พัฒนากระบวนการสร้างชิปตัวเก็บประจุแบบฝังในพอลิเมอร์ สำหรับใช้งานในย่านความถี่วิทยุ

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- ขนาดของขดลวดเหนี่ยวนำถูกจำกัดด้วยเทคโนโลยีการออกแบบลวดลาย สามารถสร้างได้เล็กสุดที่ 30  $\mu\text{m}$
- ค่าความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ของตัวเก็บประจุ ยังถูกจำกัดด้วยขนาดของลวดลายที่สร้างได้คือ 30  $\mu\text{m}$

## 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- สร้างตัวเหนี่ยวนำจุลภาคสำหรับใช้ในวงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง
- พัฒนาโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำจุลภาค และทดสอบกับวัสดุแม่เหล็กที่ใช้เป็นแกน โดยพิจารณาค่าความต้านทาน และความเหนี่ยวนำเป็นหลัก
- ประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนในการสร้างตัวเก็บประจุ สำหรับใช้งานในย่านความถี่วิทยุ โดยมีวัสดุไดอิเล็กตริกเป็นอากาศ และพอลิเมอร์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- พัฒนาพื้นฐานความรู้ของกระบวนการสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูงแบบฝังในแม่พิมพ์พอลิเมอร์
- พัฒนารูปร่างความรู้ ในการพัฒนากระบวนการลิโธกราฟีแบบหลายชั้น
- ได้ตัวเหนี่ยวนำ สำหรับวงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าความต้านทานต่อพื้นที่ต่ำ และมีค่าความเหนี่ยวนำสูง โดยเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ
- ได้ตัวเก็บประจุในรูปของชิป ที่สามารถบรรจุลงบนวงจรรวมได้

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท ได้แก่ บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความ เป็นมาและ ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขต ข้อตกลงเบื้องต้น และ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เริ่มจาก เทคโนโลยีการสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูง การสร้างตัวนำแบบฝังตัวในแม่พิมพ์ บทนี้จะเป็นการ กล่าวโดยรวม และ จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมแบบละเอียดในแต่ละบทอีกครั้ง บทที่ 3 กล่าวถึง กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต และ รังสีเอกซ์ ตลอดจนกระบวนการสร้างชิ้นงาน ด้วยวิธีต่างๆ ที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้ บทที่ 4 กล่าวถึง ทฤษฎี การคำนวณ เกี่ยวกับตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ รวมไปถึง วิธีการทดสอบ การสร้างชุดทดสอบคุณลักษณะสมบัติ ของตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ บทที่ 5 กล่าวถึง ตัวเก็บประจุสำหรับใช้ในย่านความถี่วิทยุ แบบฝังในแม่พิมพ์ ปริทัศน์วรรณกรรม การออกแบบ การสร้าง และ ผลการทดสอบ บทที่ 6 กล่าวถึงตัวเหนี่ยวนำสำหรับใช้ในวงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ปริทัศน์วรรณกรรม การออกแบบ การสร้าง และ ผลการทดสอบคุณสมบัติ บทที่ 7 เป็นการสรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

เทคโนโลยีในการสร้างชิ้นส่วนระบบกล-ไฟฟ้าจุลภาค (Micro-electromechanical system : MEMS) เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการสร้างชิ้นส่วนจุลภาค โดยเฉพาะการประยุกต์สร้างโครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความถี่วิทยุ (RF) เช่น ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และ RF สวิตช์ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการสร้างโครงสร้างเหล่านี้ จะต้องอาศัยกระบวนการในการสร้างแม่พิมพ์จุลภาค (micromachining) ซึ่งเป็นกระบวนการหลัก กระบวนการนี้โดยทั่วไป ใช้หลักการกัดวัสดุให้เป็นแม่พิมพ์ เช่น ซิลิกอน จากนั้นจะทำการเติมวัสดุใหม่เข้าไปในแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้โครงสร้างทางกล หรือทางไฟฟ้า (Gregory, 1998) ทิศทางการพัฒนากระบวนการนี้ คือการพัฒนาโครงสร้างให้มีขนาดเล็กลง สามารถสร้างได้พร้อมกันจำนวนมาก เพื่อเป็นการลดต้นทุน ซึ่งนอกจากการกัดแม่พิมพ์แล้ว ยังมีกระบวนการเคลือบโลหะ เป็นกระบวนการที่ช่วยให้สามารถสร้างโครงสร้างที่มีความซับซ้อนได้ โดยกระบวนการสร้างแม่พิมพ์สามารถทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป กระบวนการสร้างแม่พิมพ์ที่ใช้กันโดยทั่วไป มีดังนี้

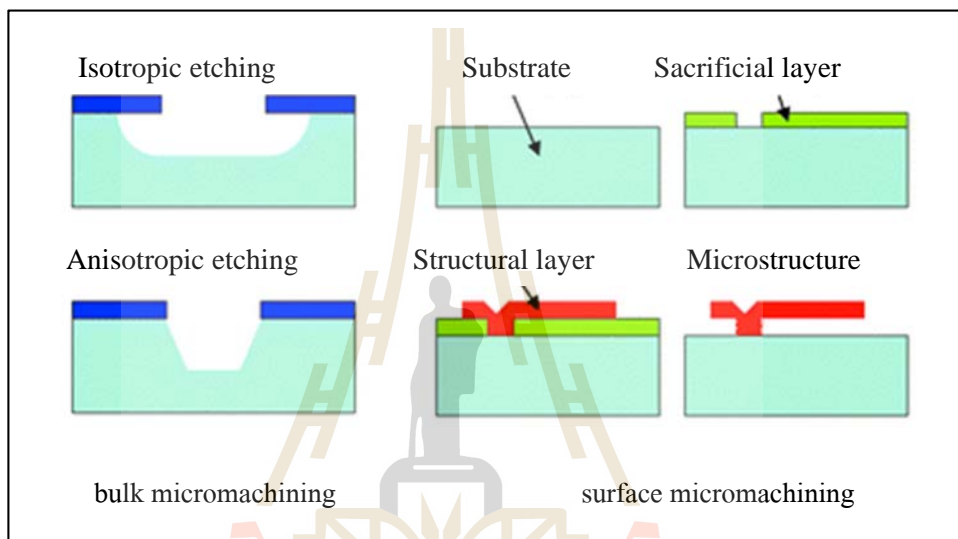
##### 2.1.1 Bulk Micromachining

กระบวนการนี้เป็นการสร้างแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการกัดวัสดุให้เป็นแม่พิมพ์ เช่น การกัดซิลิกอน (Gregory *et al.*, 1998) วิธีการกัดจะใช้หน้ากากในการแยกบริเวณที่ต้องการ และบริเวณที่ไม่ต้องการ สามารถกัดได้ทั้งแบบเปียก (wet etching) และแบบแห้ง (dry etching) วัสดุที่ใช้ในกระบวนการนี้ คือ ซิลิกอน เนื่องจากสามารถกัดแบบไม่เท่ากันทุกทิศทาง (anisotropically etched) จึงได้โครงสร้างตามแนวระนาบของผลึกที่เลือกใช้ เมื่อได้แม่พิมพ์ตามต้องการแล้ว จากนั้นจึงเติมโลหะเข้าไปในแม่พิมพ์นั้น โครงสร้างจะถูกฝังอยู่ภายใน การสร้างด้วยกระบวนการนี้สามารถสร้างโครงสร้างที่มีขนาดเล็กมาก เนื่องจากข้อจำกัดของระนาบผลึกซิลิกอน

##### 2.1.2 Surface Micromachining

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการสร้างชิ้นงานขึ้นบนแผ่นฐาน (Bustillo, 1998) โครงสร้างที่ได้ จะอยู่บนแผ่นฐาน โดยทั่วไปหากใช้ซิลิกอนเป็นฐาน จะใช้ออกไซด์ของซิลิกอนเป็นแม่พิมพ์ โดยกัดให้ได้แม่พิมพ์ตามต้องการ หรือหากต้องการโครงสร้างที่มีบางส่วนยกจากฐาน หรือโครงสร้างที่มีการเคลื่อนไหว จะต้องทำการเคลือบชั้นวัสดุชั่วคราว และกัดทิ้งในภายหลัง

ดังนั้นขนาดของโครงสร้างที่ได้จากกระบวนการนี้ จะถูกกำหนดด้วยกระบวนการลิโธกราฟี ซึ่งหากใช้แสงที่มีความยาวคลื่นน้อย จะสามารถสร้างโครงสร้างในระดับนาโนเมตรได้ กระบวนการนี้ นิยมใช้พัฒนาเป็นโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นวงจรรวม เนื่องจากโครงสร้างสามารถสร้างขึ้นบนแผ่นวงจรซิลิกอนได้โดยตรง นอกจากนี้ ในการสร้างชิ้นส่วนทางกล สามารถใช้วัสดุราคาถูกอื่น ๆ แทนซิลิกอนได้ เช่น แก้ว ไฟต์ แผ่นวงจรพิมพ์ เป็นต้น รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบกระบวนการ bulk micromachining และ surface micromachining



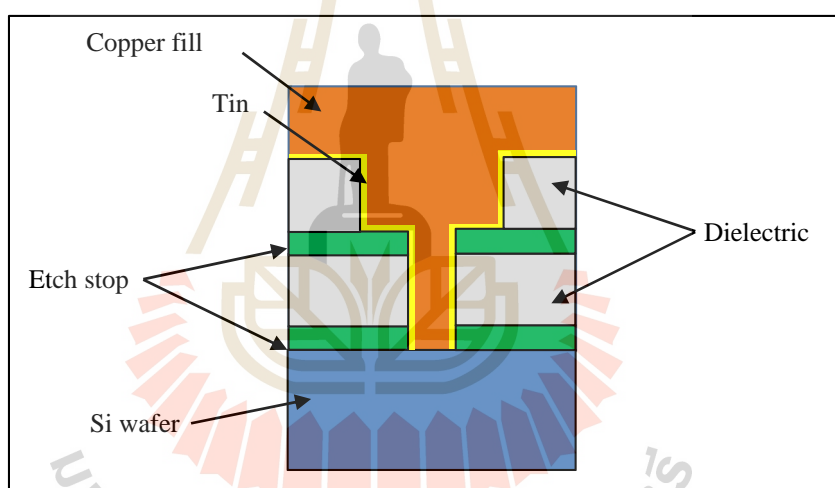
รูปที่ 2.1 bulk micromachining และ surface micromachining

### 2.1.3 LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung)

LIGA เป็นภาษาเยอรมัน ซึ่งแปลว่า การฉายแสง การชุบโลหะ และการสร้างแม่พิมพ์ (Lithography, Electroplating, and Molding) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ผลิตโครงสร้างที่มีความสูงในระดับ ร้อยไมโครเมตร สามารถสร้างโครงสร้างที่มีความสูงมากกว่าความกว้าง (high aspect ratio) จึงมีประโยชน์ในการสร้างโครงสร้างจุลภาคที่ต้องการใช้ประโยชน์จากความสูง เช่น ตัวเหนี่ยวนำประสิทธิภาพสูงในวงจรความถี่วิทยุ เป็นต้น สิ่งที่ใช้เป็นแม่พิมพ์ จะใช้สารไวแสง เช่น SU-8 พอลิอิมิด และ AZ ซึ่งขนาด และความสูงที่สามารถสร้างได้จะขึ้นอยู่กับแสงที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ ถ้าแสงมีพลังงานสูง (ความยาวคลื่นสั้น) จะสามารถสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก และมีสัดส่วนความสูงต่อความกว้างมากขึ้น แสงที่นิยมใช้ เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต และรังสีเอกซ์ ซึ่งรังสีเอกซ์จะมีความยาวคลื่นในช่วง 10 nm ถึง 0.01 nm จึงสามารถสร้างโครงสร้างได้เล็ก และมีความคมมากกว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นในช่วง 356 nm

## 2.2 พัฒนาการของกระบวนการสร้าง โครงสร้างสามมิติด้วยการสร้างตัวนำฝังในแม่พิมพ์

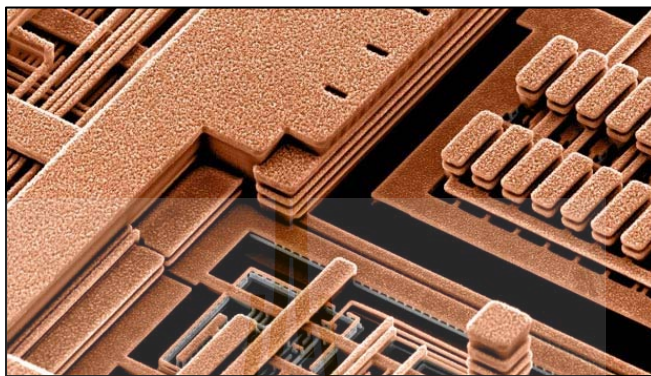
เทคโนโลยีการสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูงสำหรับชิ้นส่วนจุลภาค มีต้นกำเนิดมาจากเทคนิคการพัฒนางจรรวมแบบหลายชั้น ซึ่งเป็นการวางซ้อนวงจรแต่ละชั้น เพื่อเพิ่มความหนาแน่นในการบรรจุวงจร (integration density) ช่วยให้อุปกรณ์มีขนาดที่เล็กลง ซึ่งการเชื่อมโครงสร้างแต่ละชั้นเข้าด้วยกันนั้น ต้องใช้โครงสร้างเสาเชื่อมต่อระหว่างชั้น (via) ในวงจรความถี่วิทยุ (RF) หรือความถี่สูงทั่วไป เสาเชื่อมต่อจะถูกออกแบบให้มีความสูงมาก เพื่อให้ชั้นไดอิเล็กตริกที่กั้นระหว่างชั้นมีความหนา ซึ่งความหนาที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดค่าความจุไฟฟ้าที่สะพานเชื่อม (bridge) ซึ่งมีผลมากในวงจรขนาดเล็ก เสาเชื่อมต่อนี้จึงเป็น โครงสร้างที่มีความสูงมากกว่าความกว้าง หรือ เรียกว่า high-aspect ratio ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 Electroplated copper via in multilayer ICs

ผู้ริเริ่มเทคโนโลยีดังกล่าว คือ บริษัท IBM ในปี 1997 ได้มีการนำกระบวนการชุบโลหะทองแดง มาใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านวงจรรวม บริษัท IBM ได้นำเสนอการชุบทองแดงลงในแม่พิมพ์ออกไซด์ (Editorial, 1997) เพื่อสร้างสะพานทองแดง เชื่อมต่อภายในชิป แทนอลูมิเนียม ที่มีค่าความต้านทานสูงกว่า ทำให้การใช้ทองแดงสามารถช่วยลดขนาดของวงจร และเพิ่มประสิทธิภาพได้อย่างมาก ทองแดงส่วนที่ชุบจนสั้นขึ้นมา จะถูกขัดด้วยกระบวนการทางสารเคมี ร่วมกับการขัดทางกล (Chemical mechanical polishing: CMP) ส่วนแม่พิมพ์ออกไซด์สามารถกำจัดออกไป ดังรูปที่ 2.3 หรือ อาจคงไว้ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง

จากจุดเริ่มต้นนี้ ในปี 2004 IBM จึงได้รับรางวัลจาก US National Medal of Technology ในการเป็นผู้ริเริ่มกระบวนการ ที่ก่อให้เกิดการพัฒนาทางด้านนวัตกรรมการผลิตอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพ และ ขนาดที่เล็กลง



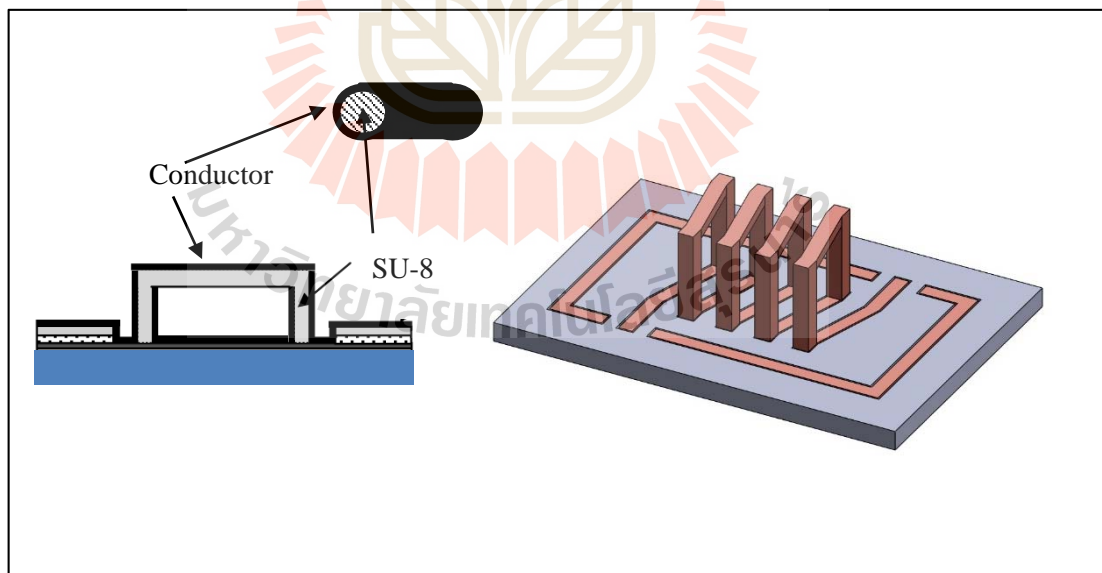
รูปที่ 2.3 Inter connected copper via and bridge

จากกระบวนการดังกล่าว การสร้างแม่พิมพ์ และชุบโลหะ จึงได้เริ่มถูกนำมาประยุกต์ใช้สร้างโครงสร้างรูปแบบอื่นๆ ทั้งระบบทางกล และไฟฟ้า เรียกว่า ระบบกล-ไฟฟ้าจุลภาค (Micro electro mechanical system: MEMS) เช่น เกียร์ (Frazier, 1992) ตัวเหนี่ยวนำ (Kim, *et al.*, 1998) ตัวเก็บประจุ (Esfandiari, 1983) กระบวนการสร้าง จะประกอบไปด้วยการสร้างแม่พิมพ์ การชุบโลหะ การขัด และการกำจัดแม่พิมพ์ กระบวนการสร้างแม่พิมพ์ส่วนใหญ่ใช้เวลาไม่นานสามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการลิโธกราฟี ส่วนระยะเวลาในการชุบโลหะ จะขึ้นกับความหนา ซึ่งแม่พิมพ์ของโครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไป จะสร้างด้วยพอลิเมอร์ บางชนิดสามารถล้างออกได้ง่าย แต่วัสดุที่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน คือ สารไวแสง SU-8 เนื่องจากสามารถสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูงได้ดี แต่ พอลิเมอร์ SU-8 กำจัดได้ค่อนข้างยาก โดยเฉพาะ โครงสร้างที่มีความหนามาก การกัดด้วยพลาสมา ที่กำลัง 200 W จะมีอัตราการกำจัดฟิล์มได้เพียง 6  $\mu\text{m}$  ต่อชั่วโมง จึงใช้เวลานานมาก และเป็น การเพิ่มต้นทุน นักวิจัยในยุคต่อมา จึงเริ่มออกแบบโครงสร้างที่ไม่ต้องมีการกำจัดแม่พิมพ์ โดยให้แม่พิมพ์เป็นส่วนหนึ่งของ โครงสร้าง ช่วยเพิ่มความแข็งแรง หรือ เพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้า บางประการ

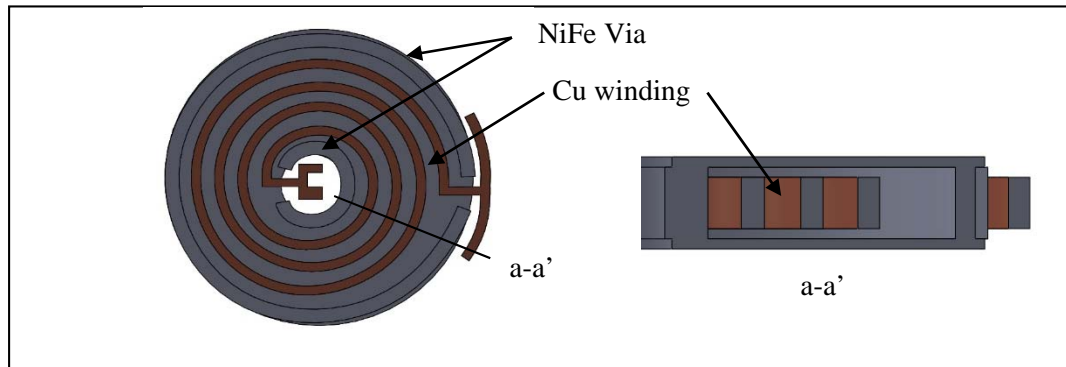
ในปี 1994 Keller และ Howe นำเสนอ การสร้างปากคีบจุลภาค (micro tweezers) ด้วยกระบวนการชุบโลหะลงในแม่พิมพ์ซิลิกอน (poly silicon) ตัวปากคีบขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนจุลภาคแบบอุณหภูมิจึง โครงสร้างทั้งหมดจะถูกยกออกจากแม่พิมพ์หลัก ส่วนโครงสร้างภายใน

ยังคงฝังอยู่ในแม่พิมพ์ (Keller and Howe, 1995) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนั้น ในปี 1998 Ahn นำเสนอการสร้างตัวเหนี่ยวนำ แกน NiFe โดยใช้พอลิอิมิดเป็นแม่พิมพ์ แกนของตัวเหนี่ยวนำ ถูกฝังไว้ในพอลิเมอร์ และ ขดลวดถูกสร้างรอบพอลิเมอร์ สุดท้ายแม่พิมพ์นี้จะเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง ไม่ถูกกำจัดออกไป (Ahn, 1998) ในปี 2005 Yoon *et al.* นำเสนอการสร้างตัวเหนี่ยวนำสำหรับความถี่ในย่าน GHz โครงสร้างหลักเป็นพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.4 และ สร้างตัวนำขึ้นที่ผิวของพอลิเมอร์ เนื่องจากที่ความถี่สูง กระแสจะไหลที่ผิวของตัวนำเท่านั้น ส่วนของแกนที่เป็นพอลิเมอร์นี้ จะไม่ถูกกำจัดออกไป แต่จะยังคงเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง (Yoon, *et al.*, 2005)

ในปี 2007 Wang และ คณะ นำเสนอกระบวนการสร้างขดลวดตัวนำจุลภาคฝังในแม่พิมพ์ซิลิกอน โดยใช้ซิลิกอนออกไซด์เป็นชั้นฉนวน เพื่อสร้างเป็นตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรลดทอนแรงดัน โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำที่ได้ จะถูกฝังอยู่ในซิลิกอน โดยไม่ต้องกำจัดแม่พิมพ์ออก (Wang *et al.*, 2007) นอกจากนี้ ในปี 2008 Wang และคณะ ได้พัฒนากระบวนการสร้างแม่พิมพ์ซิลิกอนเพิ่มเติม ด้วยการใช้สารไวแสง SU-8 สร้างเป็นฉนวนระหว่างขดลวด และ ซิลิกอน เพื่อป้องกันการลัดวงจร และ เพื่อลดความเค้นในโครงสร้าง ซึ่งเป็นปัญหาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Wang *et al.*, 2008) โครงสร้างนี้ ไม่เกิดการแตกร้าวเหมือนโครงสร้างแรก เนื่องจากแม่พิมพ์พอลิเมอร์มีการยึดหยุ่นดีกว่าซิลิกอน

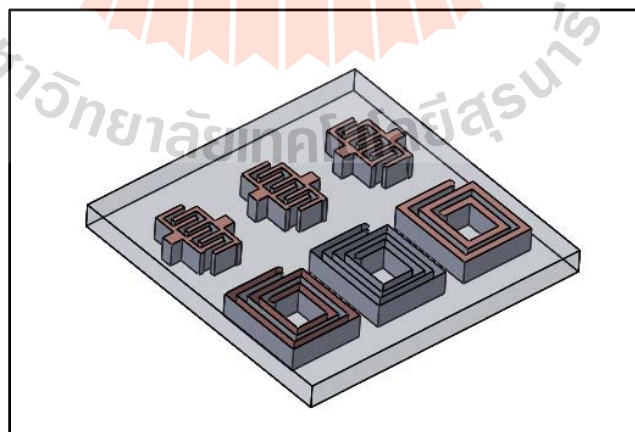


รูปที่ 2.4 ตัวเหนี่ยวนำแบบใช้แกนของเส้นตัวนำเป็นสารไวแสง SU-8 ของ Yoon *et al* (2005)



รูปที่ 2.5 ตัวเหนี่ยวนำที่ฝังอยู่ในแม่พิมพ์ซิลิโคน และ SU-8 ของ Wang *et al.* (2008)

จากงานวิจัยข้างต้น จะเห็นว่า โครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จุลภาค สามารถที่จะพัฒนาโครงสร้างให้ฝังตัวอยู่ในแม่พิมพ์ เพื่อลดต้นทุน และ เวลาในการกำจัดแม่พิมพ์ อีกทั้งแม่พิมพ์ ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอวิธีการสร้างโครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง แบบฝังตัวในแม่พิมพ์ SU-8 โครงสร้างจะถูกกำจัดส่วนฐานทิ้งไป เหลือเป็นแผ่นพอลิเมอร์ใส เพื่อให้สามารถนำไปสร้างโครงสร้างเพิ่มเติมได้ทั้งสองด้าน หรือนำไปติดลงบนแผ่นวงจรเพื่อใช้งานได้ทันที ดังแบบจำลองในรูปที่ 2.5 ชิ้นงาน และ โครงสร้างจะถูกสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ เป็นโครงสร้างสัดส่วนสูง มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างในช่วง 5 ถึง 10 จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นได้



รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างตัวนำที่ฝังอยู่ในแม่พิมพ์ SU-8 หลังการกำจัดฐาน



ในงานวิจัยนี้ ได้พัฒนากระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาค แบบฝังในแม่พิมพ์ เพื่อประยุกต์ใช้สร้างตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ งานวิจัยในส่วนแรก จะเป็นการพัฒนากระบวนการดังกล่าว เพื่อสร้างโครงสร้างโลหะให้ฝังอยู่ในแม่พิมพ์ จากนั้นจึงนำกระบวนการนี้ มาประยุกต์ใช้ งานสร้างเป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ โดยงานวิจัยในส่วนที่สองจะเป็นการสร้างตัวเก็บประจุ สำหรับใช้งานในย่านความถี่วิทยุ ซึ่งมีค่าความจุไฟฟ้าที่ต้องการอยู่ในช่วง pF จึงสามารถสร้างได้ด้วยเทคนิคลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์โดยตรง (X-ray Lithography) โครงสร้างที่ได้ จะเป็นชิปตัวเก็บประจุ สามารถนำไปบรรจุบนวงจรรวม และ เชื่อมด้วยกระบวนการ กลับชิป (flip-chip) โดยไม่ต้องมีการกำจัดแม่พิมพ์ออก แม่พิมพ์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง และ ทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้น

งานวิจัยในส่วนที่สาม จะเป็นการประยุกต์ใช้ข้อดีของแสงซินโครตรอน ที่มีความสามารถในการสร้างโครงสร้างสามมิติ ให้มีความสูงมากกว่าความกว้าง (high-aspect ratio) นำมาใช้สร้างขดลวด เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้วยการเพิ่มความสูง ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำที่ได้ จะเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความต้านทานต่ำ โครงสร้างจะเป็นขดลวด ฝังอยู่ในพอลิเมอร์ SU-8 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในส่วนนี้แบ่งออกเป็นสองโครงสร้าง คือ โครงสร้างแรก สร้างทั้งส่วนของขดลวด และส่วนแกนตัวเหนี่ยวนำ ให้ฝังอยู่ในพอลิเมอร์ SU-8 จากนั้นจึงนำมาวางซ้อนประกอบเข้าด้วยกันในภายหลัง ซึ่งการสร้างแยกทีละส่วน จะช่วยลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงาน ส่วนตัวเหนี่ยวนำโครงสร้างที่สอง เป็นการพัฒนากระบวนการสร้างให้มีความง่ายมากขึ้น โดยใช้กระบวนการดังกล่าวสร้างเฉพาะส่วนขดลวดตัวนำ แต่ส่วนของแกน จะใช้การเคลือบโลหะ และชุบโลหะแบบบาง ซึ่งสามารถสร้างได้ง่ายกว่าโครงสร้างแรก ส่วนรายละเอียดของปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในแต่ละงาน จะได้กล่าวแยกย่อยแบบละเอียดในแต่ละบทต่อไป

## บทที่ 3

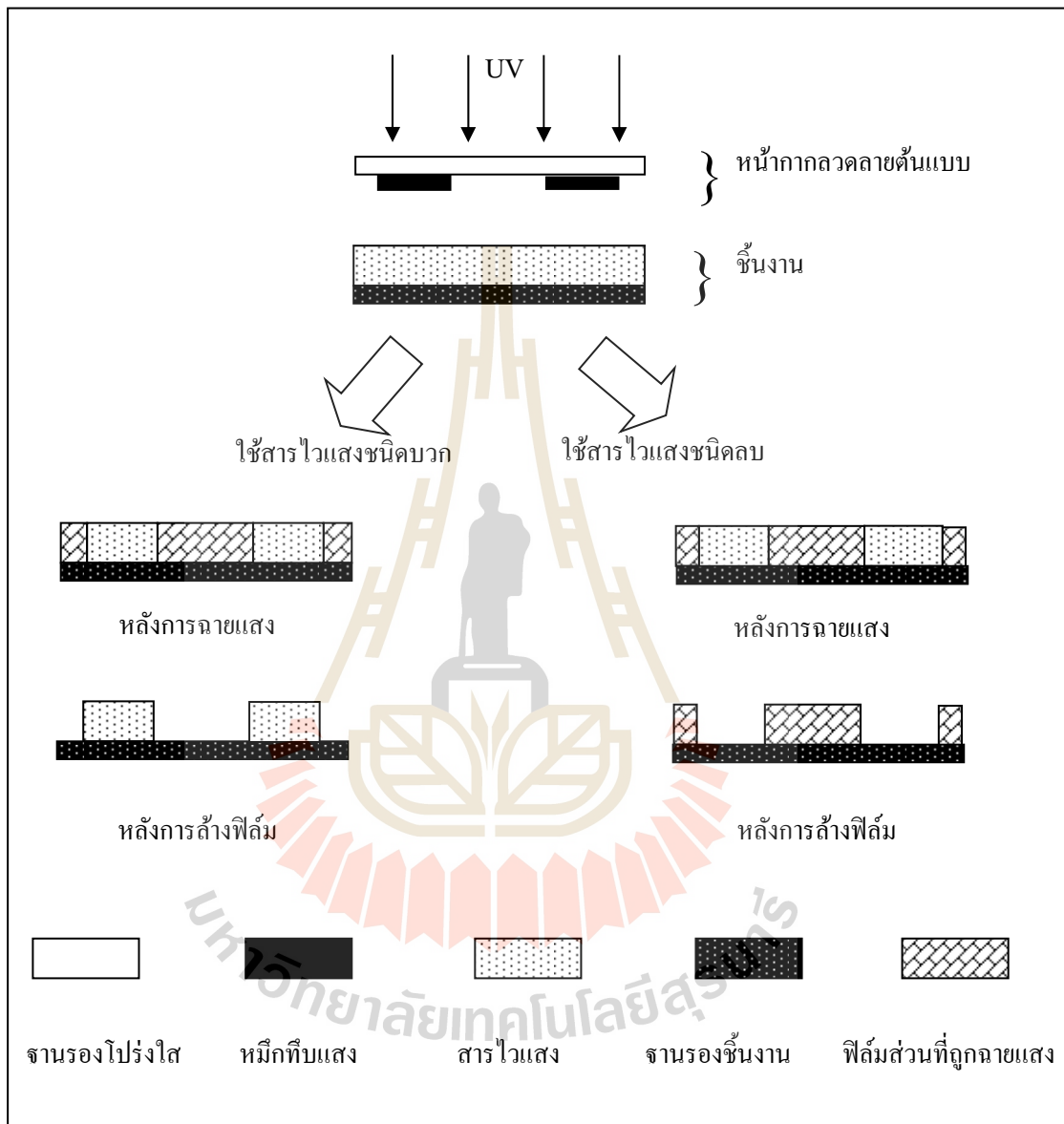
### การพัฒนากระบวนการพื้นฐานในงานวิจัย

แม่พิมพ์ของโครงสร้างจุลภาค เป็นสิ่งที่สำคัญในกระบวนการสร้างชิ้นส่วนจุลภาค แม่พิมพ์สามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่น การกัดซิลิกอน การกัดด้วยไอออน (ion-etching) และการสร้างโดยกระบวนการลิโธกราฟี ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้การสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟี เนื่องจากสามารถสร้างชิ้นส่วนที่มีอัตราความสูงมากกว่าความกว้าง (High-aspect ratio) และมีข้อดีอีกหลายประการ ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา กระบวนการสร้างชิ้นงานในงานวิจัยนี้ มีกระบวนการหลัก ที่เกี่ยวข้อง คือ กระบวนการลิโธกราฟี ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต และกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ นอกจากนี้ ยังมีกระบวนการย่อยอีกหลายกระบวนการ ได้แก่ การเคลือบโลหะด้วยวิธีการ Sputtering การกัดชิ้นงานด้วยพลาสมา การชุบโลหะ NiFe และการพัฒนาวัสดุที่ใช้ในกระบวนการเพื่อให้มีราคาถูกรายละเอียดของกระบวนการต่าง ๆ มีดังนี้

#### 3.1 กระบวนการลิโธกราฟี

กระบวนการลิโธกราฟีเป็นกระบวนการที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการสร้างวงจรรวม ซึ่งต่อมาได้พัฒนาให้สามารถสร้างโครงสร้างที่มีความสูงเพิ่มขึ้น มีลักษณะเป็นโครงสร้างสามมิติ หลักการของกระบวนการนี้ ใช้หลักการฉายแสงผ่านลวดลายที่บดแสง ซึ่งเรียกว่าหน้ากากกันแสง หน้ากากกันแสงนี้จะมีส่วนที่ทึบแสง และส่วนที่แสงสามารถผ่านได้ โดยแสงที่ผ่านหน้ากากจะตกกระทบกับชิ้นงาน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความไวแสง (photoresist) ซึ่งจะมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปเมื่อถูกแสง โดยอาจจะแข็งตัวเป็นโครงสร้างถาวรเมื่อใช้สารไวแสงชนิดลบ (Negative-photoresist) ตัวอย่างสารไวแสงชนิดนี้ ได้แก่ SU-8 หรือสามารถล้างออกได้ เมื่อใช้สารแสงชนิดบวก (Positive-photoresist) ตัวอย่างสารไวแสงชนิดนี้ ได้แก่ AZ4620 ซึ่งสารไวแสงที่ใช้เป็นแม่พิมพ์ เปรียบเสมือนฉากรับภาพ ที่ฉายผ่านหน้ากากกันแสง ลวดลายที่ปรากฏ จะเหมือนหน้ากาสดั้งแบบทุกประการ เมื่อนำสารไวแสงไปล้างด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง จะได้แม่พิมพ์พอลิเมอร์ โดยความสูงที่สามารถสร้างได้ ขึ้นอยู่กับความหนาของสารไวแสงที่ใช้ และขนาดของลวดลาย แต่อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของความสูงขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ด้วย โดยแสงที่มีพลังงานสูงกว่าสามารถใช้สร้างลวดลายที่มีความสูงมากกว่า ซึ่งกระบวนการลิโธกราฟีโดยทั่วไปมีแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ ได้แก่

กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ใช้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 365 ถึง 405 nm กระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยสารไวแสงทั้งสองชนิด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



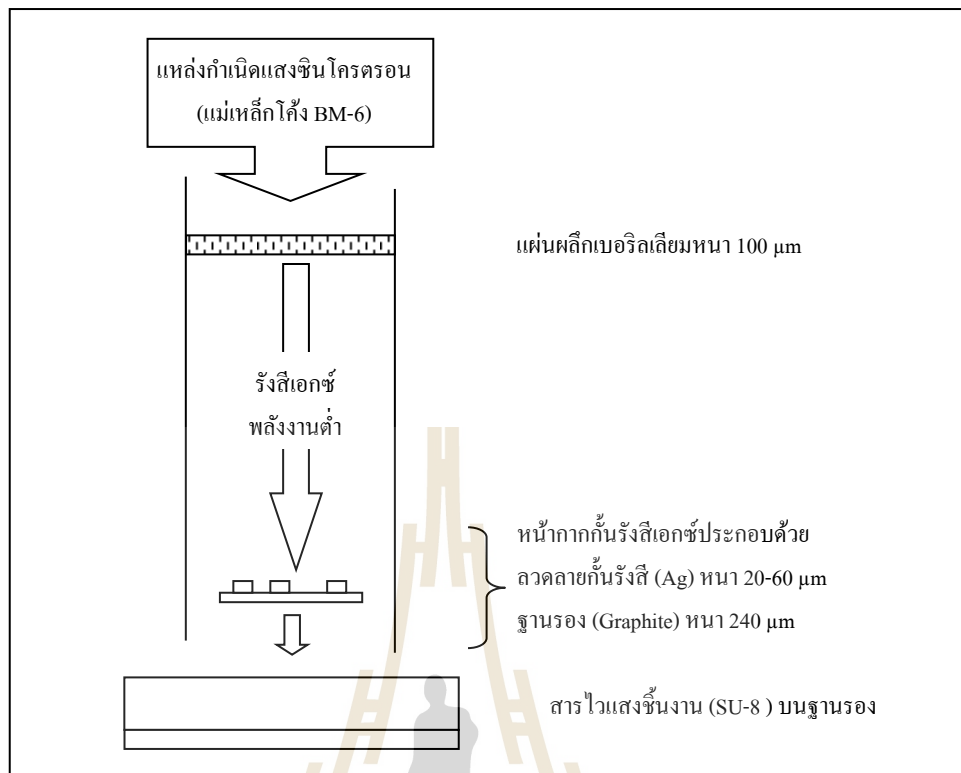
รูปที่ 3.1 การสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ

นอกจากนี้ กระบวนการลิโธกราฟียังมีการพัฒนากระบวนการเพื่อให้สามารถสร้างลวดลายที่มีอัตราส่วนความสูงมากกว่าความกว้างมากขึ้น โดยใช้แสงที่มีพลังงานสูงในการฉายผ่านหน้ากากลึบแสง กระบวนการนี้สามารถสร้างชิ้นงานที่มีอัตราส่วนความสูงมากกว่าความกว้างถึง 10 และ

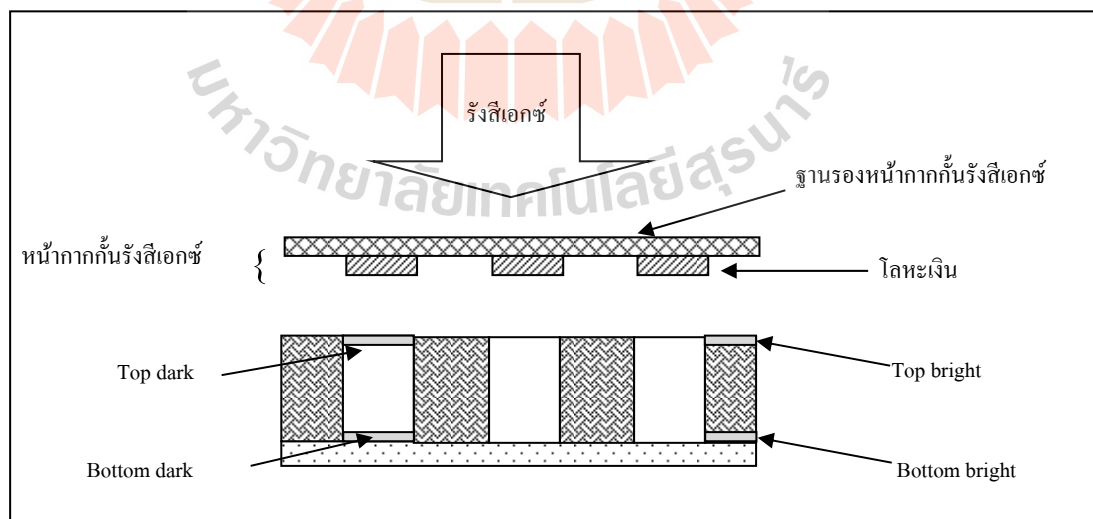
แม่พิมพ์ที่ได้จะมีลวดลายที่คมชัด ผนังเรียบตรงมากกว่าการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต แสงที่ใช้ในกระบวนการนี้ ได้แก่ รังสีเอกซ์ มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 1 nm ดังนั้นหน้ากากที่ใช้จะต้องเป็นวัสดุที่รังสีเอกซ์ไม่สามารถผ่านไปได้ โดยทั่วไปใช้โลหะที่มีเลขอะตอมสูง เช่น เงิน ทอง หรือตะกั่ว หน้ากากทั้งรังสีเอกซ์นี้ จะถูกสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ก่อน โดยชุบโลหะลงในแม่พิมพ์ ดังนั้นฐานรองหน้ากากจึงต้องเป็นวัสดุที่รังสีเอกซ์ผ่านได้ดี

รังสีเอกซ์ที่นำมาใช้ในกระบวนการนี้ ได้มาจากเครื่องกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่า เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ซึ่งสามารถสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในช่วงกว้างตั้งแต่ อินฟราเรด จนถึงรังสีเอกซ์ แต่การนำมาใช้งานในกระบวนการลิโธกราฟีต้องการพลังงานแสงในช่วงของรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (soft X-ray) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังนั้นต้องใช้วัสดุที่สามารถกรองให้ได้แสงในช่วงที่ต้องการ ตัวกรองที่ใช้ คือ ผลึกเบอริลเลียม หนา 100  $\mu\text{m}$  แสงที่ออกมาจึงมีความยาวคลื่นในช่วง 1 nm ซึ่งเป็น soft X-ray และแผ่นผลึกเบอริลเลียมนี้ ยังใช้เป็นตัวแยกแรงดันระหว่างท่อลำเลียงแสง และวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนซึ่งมีแรงดันอยู่ในช่วง  $10^{-4}$  torr และ  $10^{-10}$  torr ตามลำดับรูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างลำดับชั้นของตัวกรองจนถึงชิ้นงานของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน ที่ใช้งานจริงในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ของระบบลำเลียงแสง BL-6a: DXRL ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ในการฉายรังสีเอกซ์ลงบนชิ้นงาน ต้องมีการคำนวณปริมาณพลังงานที่สารไวแสงได้รับ เนื่องจากสารไวแสงต้องได้รับพลังงานที่พอเหมาะ หากฉายแสงด้วยพลังงานมากเกินไป เนื้อสารไวแสงจะแข็งตัวมากเกินไป ทำให้เกิดความเค้นขึ้นในเนื้อสารไวแสง ชิ้นงานจะแตกร้าหรือหลุดจากฐาน หรือหากฉายแสงน้อยเกินไป สารไวแสงจะไม่แข็งตัว ซึ่งอาจถูกล้างออกไปในขั้นตอนการล้างสารไวแสง พลังงานที่สารไวแสงได้รับ สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่เรียกว่า Beer's law แต่ค่าพลังงานที่เหมาะสม จะได้มาจากผลการทดลอง จากสมการดังกล่าวเมื่อคำนวณพลังงานในเนื้อสารไวแสงที่ระดับความหนาต่าง ๆ จะพบว่ามีการลดลงตามความหนาแบบเอกซ์โพเนนเชียล รูปที่ 3.3 แสดงนิยามของกำลังงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในเนื้อสารไวแสง ซึ่งแยกเป็นส่วนมืด (dark zone) คือ ส่วนที่มีวัสดุกันแสง และส่วนสว่าง (bright zone) คือบริเวณที่ได้รับรังสีโดยตรง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้บางบริเวณจะมีวัสดุกันแสง แต่ในความเป็นจริงไม่สามารถกันแสงได้ทั้งหมด ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูป วัสดุกันแสงจะต้องมีความหนามากพอเพื่อที่จะไม่ให้บริเวณ top dark ได้รับพลังงานสะสมจนเกิดการแข็งตัว และต้องฉายแสงด้วยพลังงานมากพอเพื่อให้บริเวณ bottom bright ได้รับพลังงานเพียงพอ หากได้รับพลังงานน้อยเกินไป แม่พิมพ์ก็จะหลุดออกในขั้นตอนการล้างสารไวแสงได้



รูปที่ 3.2 องค์ประกอบของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน BL-6a : DXRL ที่ใช้สำหรับกระบวนการ ลิโทกราฟีด้วยรังสีเอกซ์



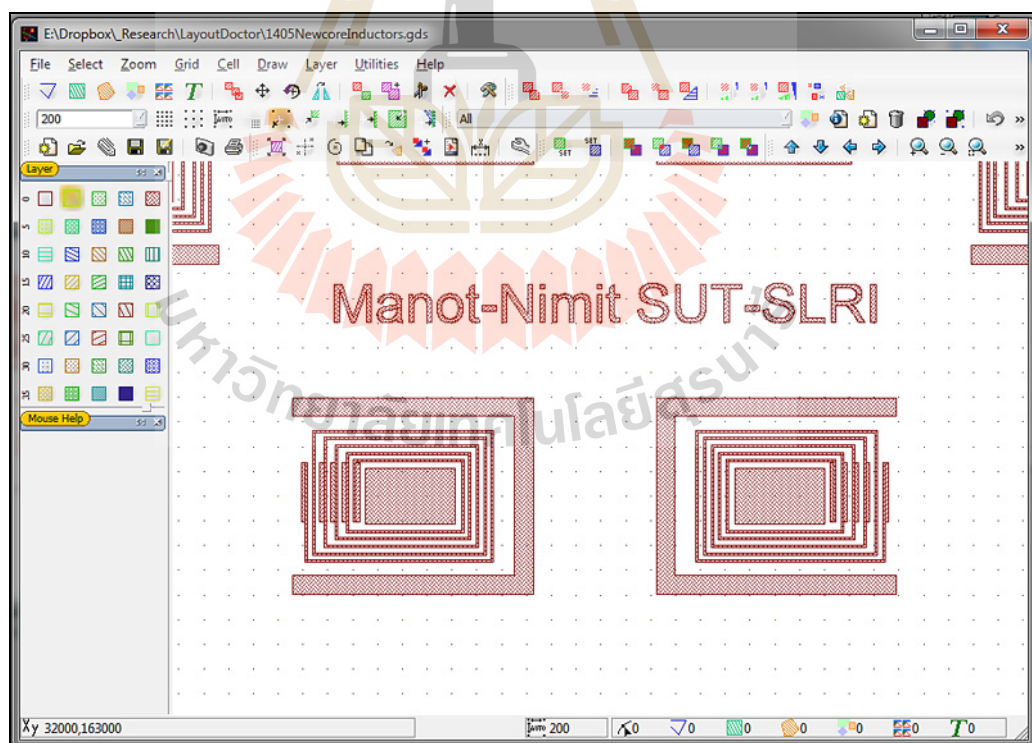
รูปที่ 3.3 แสดงพลังงานส่วนต่าง ๆ ในเนื้อสารไวแสง

### 3.2 การสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์

หน้ากากกันรังสีเอกซ์ เป็นส่วนที่มีความสำคัญในการสร้างโครงสร้างจุลภาค ใช้ในการกันรังสีเอกซ์เพื่อให้เกิดความชัดเจนบนสารไวแสงสำหรับใช้ทำแม่พิมพ์ วัสดุที่ใช้ต้องเป็นวัสดุที่มีเลขอะตอมสูง เช่น เงิน ทอง ตะกั่ว วัสดุเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นบนแผ่นฐานซึ่งเป็นวัสดุที่รังสีเอกซ์ผ่านได้ดี กระบวนการสร้างใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต วัสดุฐานโดยทั่วไปนิยมใช้แผ่นแกรไฟต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ทั้งแผ่นแกรไฟต์ และแผ่นใสสำหรับถ่ายเอกสาร โดยในครั้งแรกเป็นการนำเสนอการสร้างด้วยแผ่นใส ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถใช้ในกระบวนการสร้างโครงสร้างแบบหลายชั้นได้ เนื่องจากหน้ากากมีความใส กระบวนการสร้างหน้ากากมีดังนี้

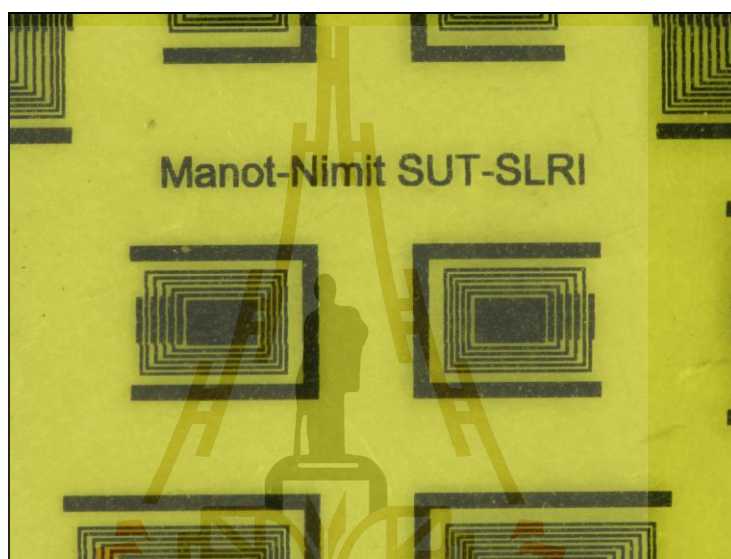
#### 3.2.1 การออกแบบลวดลาย

ในขั้นแรกต้องออกแบบลวดลายสำหรับสร้างฟิล์มทึบแสง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Layout Editor ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับออกแบบลวดลายระดับไมโครเมตร บันทึกไฟล์เป็นไฟล์ชนิด GDS II สามารถแปลงเป็นไฟล์ CAD อื่น ๆ ได้ตามต้องการ ตัวอย่างลวดลายที่วาดด้วยโปรแกรมหดงกล่าว แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลวดลายที่ออกแบบโดยโปรแกรม Layout Editor

ลวดลายที่ออกแบบ จะถูกนำไปพิมพ์ลงบนฟิล์มใส ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ความละเอียด 3,600 จุดต่อนิ้ว สามารถออกแบบลวดลายได้เล็กที่สุดประมาณ 30  $\mu\text{m}$  รูปที่ 3.5 แสดงหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเป็นลวดลายทึบแสงบนแผ่นใส จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต เพื่อสร้างแม่พิมพ์ที่มีความหนา 60  $\mu\text{m}$  และชุบโลหะลงไปในห้องว่าง สารไวแสงที่ใช้ในขั้นตอนนี้ คือ สารไวแสงชนิดบวก AZ4620 สามารถล้างออกได้ง่ายและไม่เกิดความเสียหายในขั้นตอนการชุบโลหะเงิน



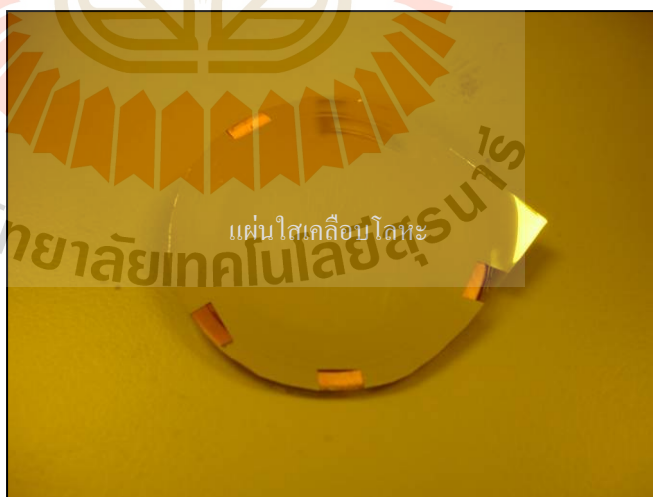
รูปที่ 3.5 หน้ากากกันแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีลวดลายจุดภาคขนาด 30  $\mu\text{m}$  ซึ่งพิมพ์ลงบนฟิล์มใสด้วยแสงเลเซอร์ความละเอียด 3,600 จุดต่อนิ้ว

### 3.2.2 การเตรียมส่วนฐานของหน้ากากกันรังสีเอกซ์

ส่วนฐานของหน้ากากกันรังสีเอกซ์ ต้องเป็นวัสดุที่รังสีเอกซ์สามารถผ่านได้ดี โดยทั่วไปนิยมใช้แผ่นแกรไฟต์ เนื่องจากใช้งานง่าย จึงช่วยลดความยุ่งยากในการเตรียมแผ่นฐาน แต่ข้อเสียของแผ่นแกรไฟต์ คือ ราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น ในส่วนนี้จึงนำเสนอการใช้แผ่นใสเป็นส่วนฐาน ซึ่งมีข้อดีคือ ในการนำไปใช้งานเป็นหน้ากากแบบหลายชั้น สามารถจัดวางบนชิ้นงานได้ง่าย สามารถมองเห็นชิ้นงานด้านล่าง และแผ่นใสยังมีราคาถูกมาก แผ่นใสที่ใช้ต้องเป็นชนิดสำหรับถ่ายเอกสาร เนื่องจากสามารถทนอุณหภูมิได้สูง เพราะกระบวนการสร้างต้องผ่านกระบวนการทางอุณหภูมิหลายครั้ง แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากต้องมีการชุบโลหะลงบนแผ่นฐาน ดังนั้นต้องทำให้แผ่นใสนำไฟฟ้าได้ โดยใช้กระบวนการเคลือบโลหะด้วยการระเหยเคลือบในสุญญากาศ ซึ่งใช้

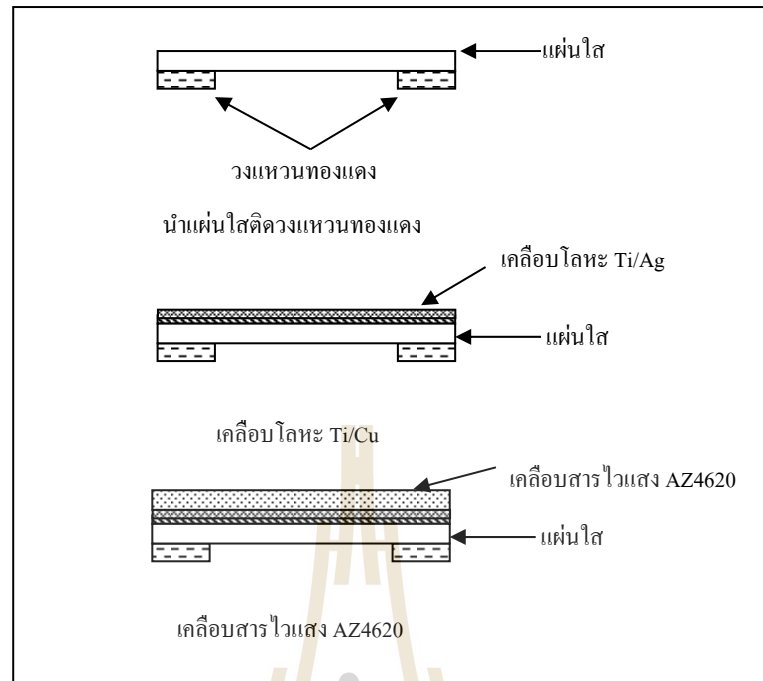
โลหะสองชนิด คือ ไทเทเนียม และเงิน เนื่องจากโลหะไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง จึงสามารถยึดติดกับแผ่นใสได้ดี ส่วนโลหะเงินที่เคลือบทับลงไปนั้น เพื่อให้สามารถชุบโลหะเงินลงในแม่พิมพ์ โดยที่น้ำยาไม่กัดโลหะไทเทเนียม ซึ่งจากการทดลอง สามารถชุบโลหะเงินได้จนเต็มแม่พิมพ์ที่ความหนาประมาณ 60  $\mu\text{m}$  โดยโครงสร้างทั้งหมดยังคงยึดติดกับส่วนฐานได้ดี แผนภาพการเตรียมส่วนฐานของหน้ากากกันรังสีเอกซ์เป็นดังรูปที่ 3.7

ขั้นตอนการเตรียมส่วนหน้ากากกันรังสีเอกซ์ชนิดแผ่นใส เริ่มจากนำแผ่นใสยึดติดกับวัสดุที่มีความแข็งแรง ในที่นี้ ใช้วงแหวนทองแดงวางบนแผ่นใสทั้งแผ่น ยึดติดด้วยกาวชนิดแห้งช้า ที่ใช้เวลากว่า 12 ชั่วโมง จากนั้นตัดแยกวงแหวนออกจากกัน นำมาทำความสะอาดโดยการเช็ดด้วย IPA (Isopropyl alcohol) นิดล้างด้วยอะซิโตน และนึ่งด้วย IPA อีกครั้ง และนำไปจุ่มน้ำ DI เพื่อทำความสะอาดด้วยคลื่นเสียง อัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและอบไล่ความชื้นด้วยอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 30 นาที หลังจากเย็นตัวลง จึงนำไปบรรจุในเครื่องระเหยเคลือบโลหะ ซึ่งจะดูดอากาศออกให้มีความดันอยู่ในช่วง  $10^{-5}$  torr ทำการเคลือบโลหะไทเทเนียมและเงินประมาณ 200 และ 600 อังสตรอมตามลำดับ จากนั้นนำไปหมუნเคลือบสารไวแสง AZ4620 ด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 วินาที จะได้ความหนาของสารไวแสงประมาณ 60  $\mu\text{m}$  และนำไปอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และนำออกจากเตาทันที ไม่ต้องรอให้ชิ้นงานเย็นตัว เมื่อชิ้นงานเย็นตัวจึงนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเลตในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.6 แผ่นใสที่เคลือบโลหะไทเทเนียม และเงินซึ่งใช้เป็นฐานรองรับลวดลายของโลหะเงิน

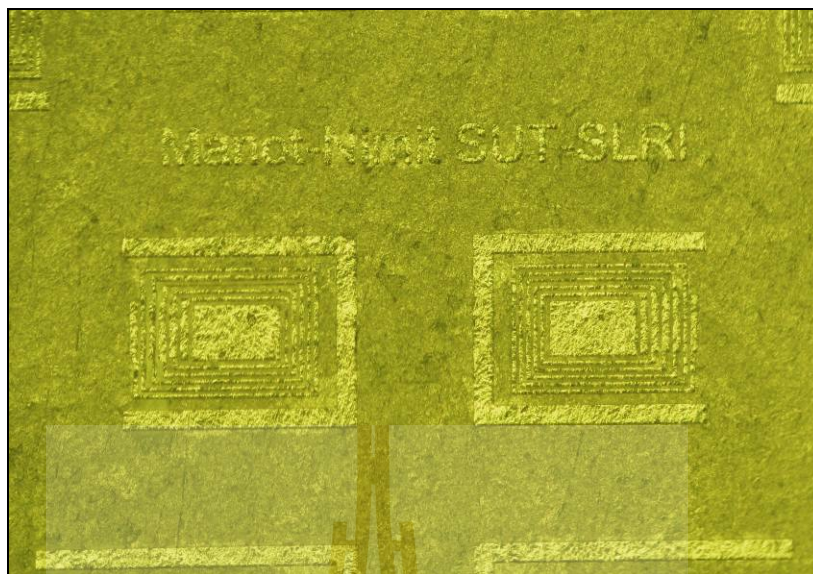




รูปที่ 3.7 การเตรียมฐานสำหรับหน้ากากทันตวัสดุ

### 3.2.3 การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

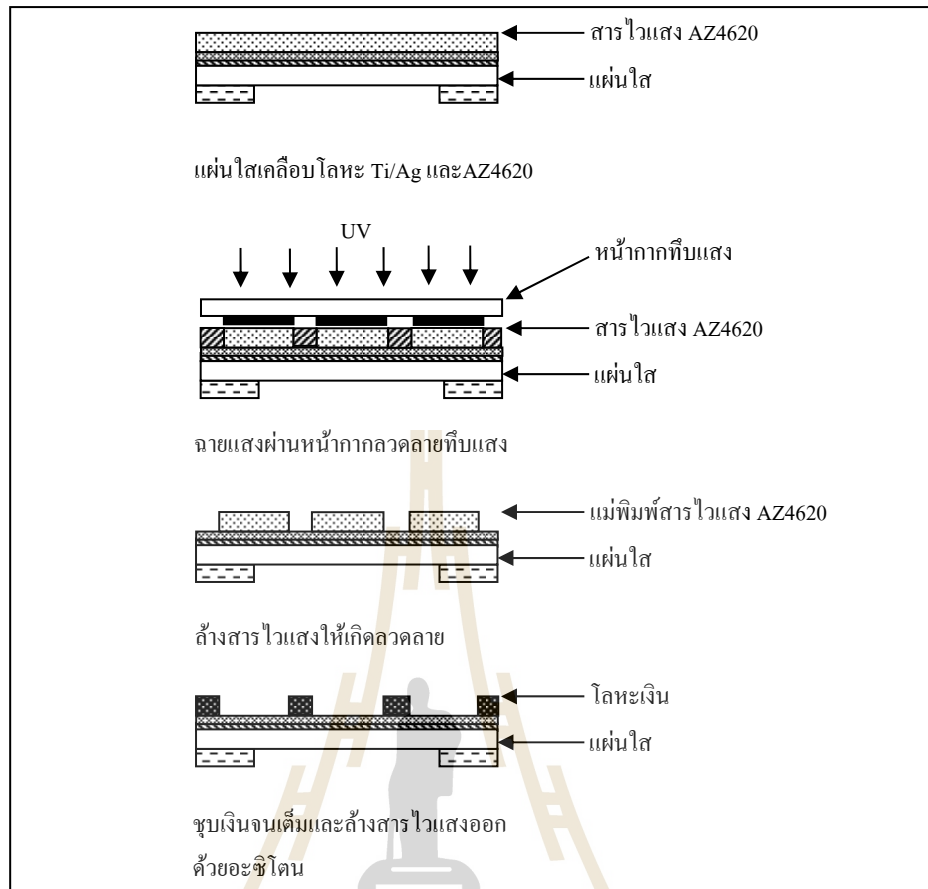
เมื่อได้ชิ้นงานที่เคลือบสารไวแสงและอบจนแห้งแล้ว ในขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างลวดลายลงบนสารไวแสง เพื่อสร้างแม่พิมพ์สำหรับชุบโลหะเพื่อใช้เป็นหน้ากากทันตวัสดุ กระบวนการสร้างเริ่มจาก นำฟิล์มที่บดแสงวางทับลงบนชิ้นงาน โดยหันด้านที่มีหมึกเข้าหาชิ้นงาน เพื่อให้ลวดลายแนบกับสารไวแสง จะช่วยให้ลวดลายที่ได้มีความคมชัดมากขึ้น จากนั้นนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตด้วยพลังงาน  $3.7 \text{ J/cm}^2$  และนำหน้ากากออก จากนั้นผสมน้ำยาล้างสารไวแสง ซึ่งประกอบไปด้วยกรดบอริก และ KOH และน้ำ DI ใช้เวลาในการล้างสารไวแสงประมาณ 20 ถึง 30 นาที จากนั้นเมื่อสารไวแสงที่ถูกแสงละลายจนหมด จะได้หลุมของแม่พิมพ์ เป่าชิ้นงานให้แห้ง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 20 นาทีเพื่อให้สารไวแสงยึดกับแผ่นฐานได้ดีขึ้น ซึ่งจะช่วยป้องกันการหลุดในระหว่างขั้นตอนการชุบโลหะ หลังจากชิ้นงานเย็นลง จึงนำชิ้นงานปิดด้วยเทปกาวในบริเวณที่ไม่ต้องการชุบโลหะ เพื่อให้โลหะก่อตัวขึ้นในหลุมของแม่พิมพ์เท่านั้น ตัวอย่างแม่พิมพ์หลังล้างสารไวแสง แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แม่พิมพ์สารไวแสง SU-8

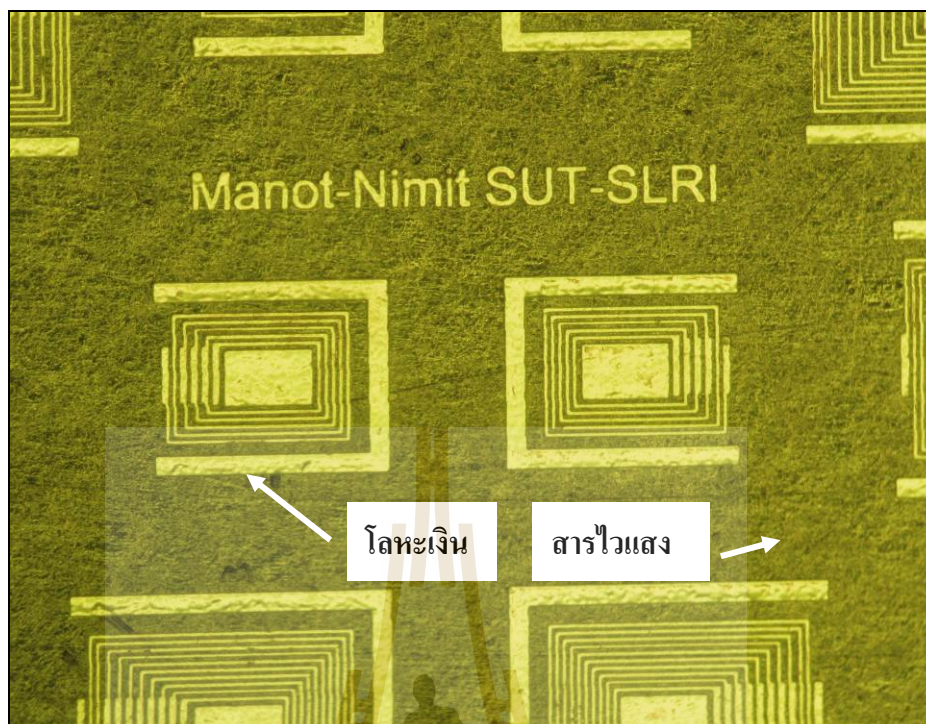
### 3.2.4 การชุบโลหะเงิน

โลหะที่ใช้สำหรับกั้นรังสีเอกซ์ในงานวิจัยนี้ ใช้โลหะเงิน เนื่องจากมีราคาถูกกว่าทองคำ สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการชุบโลหะได้เช่นเดียวกัน แต่การใช้โลหะเงิน ต้องมีความหนามากกว่าทองคำ ซึ่งจากการทดลองควรใช้โลหะเงินหนามากกว่า  $40\ \mu\text{m}$  จึงจะสามารถสร้างลวดลายที่มีความสูงถึง  $600\ \mu\text{m}$  แต่ขึ้นอยู่กับขนาดของลวดลายด้วย สารละลายสำหรับชุบโลหะเงินสามารถผสมใช้งานเองได้ ซึ่งมีราคาถูกกว่าชนิดสำเร็จรูป ตัวอย่างขั้นตอนการเตรียมสารละลาย ปริมาตร 1 ลิตร เริ่มจากเตรียมน้ำดีไอปริมาตร 600 มิลลิลิตรใส่ในบีกเกอร์และวางบนแท่นกวนสาร จากนั้นเติมโพแทสเซียมไซยาไนด์ น้ำหนัก 165 กรัม และกวนทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที เติมโพแทสเซียมคาร์บอเนต 15 กรัม กวนต่อเป็นเวลา 5 นาที จากนั้น เติมซิลเวอร์ไซยาไนด์ 80% น้ำหนัก 45 กรัม และกวนทิ้งไว้อีก 15 นาที จึงเติมน้ำลงไปจนปริมาตรเป็น 1 ลิตร และเติมผงถ่าน (Granular carbon) น้ำหนัก 2 กรัม แล้วกวนสารละลายต่อไปเป็นเวลาประมาณ 30 นาที จากนั้นหยุดการกวนสาร และนำสารละลายที่ได้ปิดฝาไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรอง เพื่อกำจัดผงถ่าน และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกไป จากนั้นจึงนำสารละลายมาชุบด้วยไฟฟ้า โดยขั้วบวกเป็นตะแกรงโลหะแพลทินัม และขั้วลบใช้Stainless steel ป้อนแรงดัน 1.5 โวลต์ คงที่เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นหยุดขั้นตอนการชุบโลหะ และเติมสาร Silver Glo make up ปริมาตร 6 มิลลิลิตร และสาร Silver Glo 3K TY ปริมาตร 13 มิลลิลิตร เพื่อให้ผิวของชิ้นงานที่ชุบ มีความสม่ำเสมอ เรียบเนียน ไม่เกิดจุดนูนขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ลวดลายเสียหายได้



รูปที่ 3.9 กระบวนการสร้างหน้ากักกันรังสีเอกซ์

หลังจากเตรียมสารละลายสำหรับชุบ โลหะเงินแล้ว จึงนำชิ้นงาน มาชุบด้วยไฟฟ้า โดยใช้โลหะไทเทเนียมชุบพลาตินัม เป็นขั้วบวก และชิ้นงานเป็นขั้วลบ ใช้ความหนาแน่นกระแสในการชุบเริ่มต้นที่  $30 \text{ mA/cm}^2$  เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงลดกระแสลงเหลือ  $20 \text{ mA/cm}^2$  ใช้เวลาในการชุบประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที โลหะจะได้ความหนา  $60 \mu\text{m}$  ซึ่งหลังจากชุบโลหะได้ความหนาตามต้องการแล้ว จึงนำชิ้นงานไปล้างสารไวแสงออกด้วยอะซิโตน และหากต้องการหน้ากักใสให้นำหน้ากักไปกัดโลหะเงิน และ ไทเทเนียมออก ซึ่งในขั้นตอนการกัดนี้ต้องควบคุมระยะเวลาอย่างเคร่งครัด เพราะลวดลายเงิน มีขนาดเล็กมาก หากกัดนานเกินไป สารเคมีอาจกัดให้เงินมีความหนาลดลง หรืออาจหลุดจากฐาน ซึ่งรูปที่ 3.10 แสดงหน้ากักกันรังสีเอกซ์หลังการชุบเงิน และล้างสารไวแสงออก ส่วนกระบวนการสร้างหน้ากักทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.10 แม่พิมพ์สารไวแสงที่ชุบเงินจนเต็มแล้ว

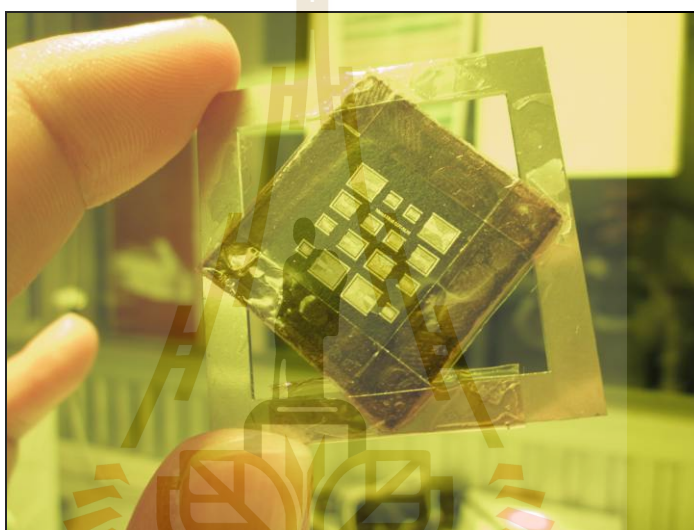
### 3.3 การใช้งานแกรไฟต์อ่อนในการสร้างโครงสร้างจุลภาค

แผ่นแกรไฟต์อ่อน เป็นแกรไฟต์บริสุทธิ์ มีความหนา 400  $\mu\text{m}$  โครงสร้างเป็นแผ่นบาง สามารถหลุดออกมาเป็นชั้นได้ แต่ไม่มีการแยกชั้นชัดเจน มีความอ่อนตัว สามารถหักได้ง่าย คล้ายกระดาษอัด เหตุที่งานวิจัยในส่วนนี้ เลือกใช้แกรไฟต์อ่อน เนื่องจากมีราคาถูกกว่าแกรไฟต์แข็งถึง 50 เท่า แต่อย่างไรก็ตามในการนำมาใช้ในงานสร้างชิ้นส่วนจุลภาค ต้องผ่านขั้นตอนการรีด อบ และทำความสะอาด ตามกระบวนการที่เหมาะสม ถ้าไม่ผ่านกระบวนการเหล่านี้ เมื่อนำไปใช้งานเนื้อแกรไฟต์ จะเกิดการโป่งพอง หัก หรืออาจทำให้เกิดฟองในเนื้อสารไวแสงจำนวนมาก จนไม่สามารถใช้งานได้ ขั้นตอนการเตรียมแผ่นแกรไฟต์ เพื่อใช้เป็น ฐาน (substrate) หรือ หน้ากากกันรังสีเอกซ์ (X-ray mask) ดังรูปที่ 3.11 กระบวนการมีดังนี้

#### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมแกรไฟต์อ่อน

ในขั้นแรก นำแกรไฟต์อ่อนรีดด้วยเครื่องรีด PCB รุ่น PCB lab LM-150 ปรับอุณหภูมิไว้สูงสุด ( $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ดังรูปที่ 3.12 รีดซ้ำประมาณ 10 นาที เพื่อไล่ความชื้น และช่วยให้แผ่นแกรไฟต์แข็งขึ้น จากนั้น รีดแกรไฟต์อีกครั้งด้วยแท่งเหล็ก เพื่อให้เนื้อแกรไฟต์แน่น และมีความแข็งแรงมากขึ้น และนำไปรีดด้วยเครื่องรีด PCB อีกครั้ง แผ่นละ 3 รอบ จากนั้นนำแกรไฟต์ อบด้วย

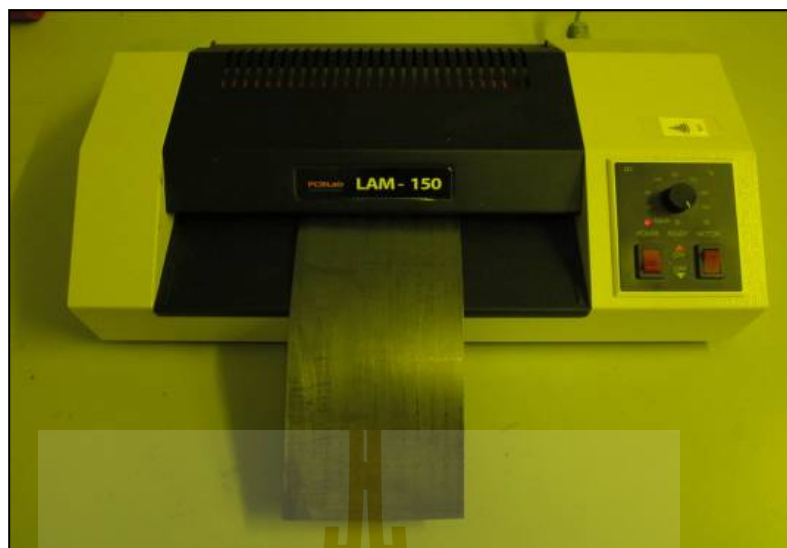
เตาอบ ตั้งอุณหภูมิสูง 120 ถึง 150 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้ แผ่นแกรไฟต์อาจโป่งพอง ซึ่งสามารถรีดกลับคืนได้ในขั้นตอนต่อไป ขั้นตอนต่อไปให้รีดแผ่นแกรไฟต์ด้วยแท่งเหล็ก ต่อด้วยเครื่องรีด PCB หลังผ่านขั้นตอนี้แล้วแผ่นแกรไฟต์จะแข็งขึ้นและจะไม่เกิดการโป่งพองขึ้นอีก แม้จะนำไปเผาจนแดงก็ตาม ส่วนความหนาจะลดลงเหลือ 350  $\mu\text{m}$  ถึงแม้ว่าแผ่นแกรไฟต์จะแข็งขึ้นมาก แต่เพื่อป้องกันความเสียหาย และโค้งงอ จึงต้องติดกับวัสดุแข็ง เช่น กระดาษ และทำความสะอาดด้วยการใช้สำลี ชุบ IPA เช็ดสองครั้ง โดยครั้งแรกจะมีแกรไฟต์หลุดออกมาจำนวนมาก ครั้งที่สองให้เช็ดเบา ๆ ผิวแกรไฟต์จะมันวาว และผิวเรียบขึ้น ดังรูปที่ 3.13



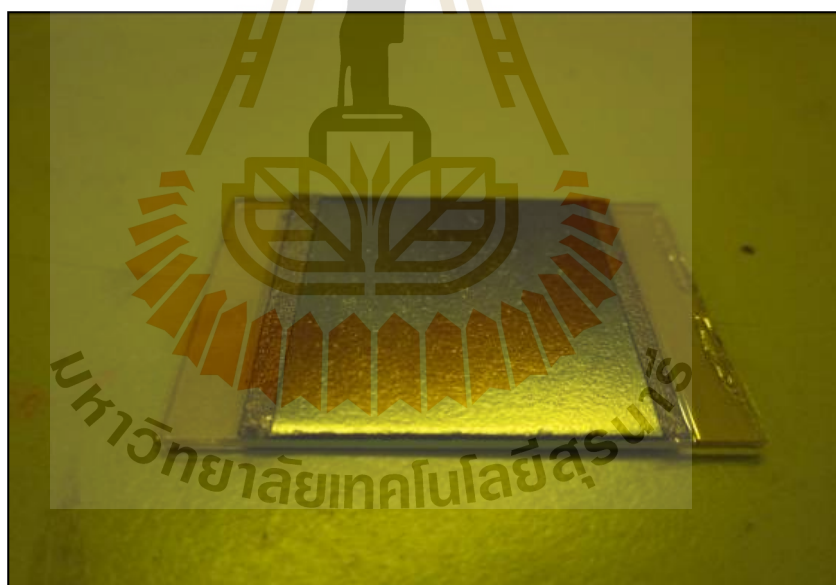
รูปที่ 3.11 หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่สร้างบนแกรไฟต์อ่อน

### 3.3.2 การใช้งานแกรไฟต์อ่อน

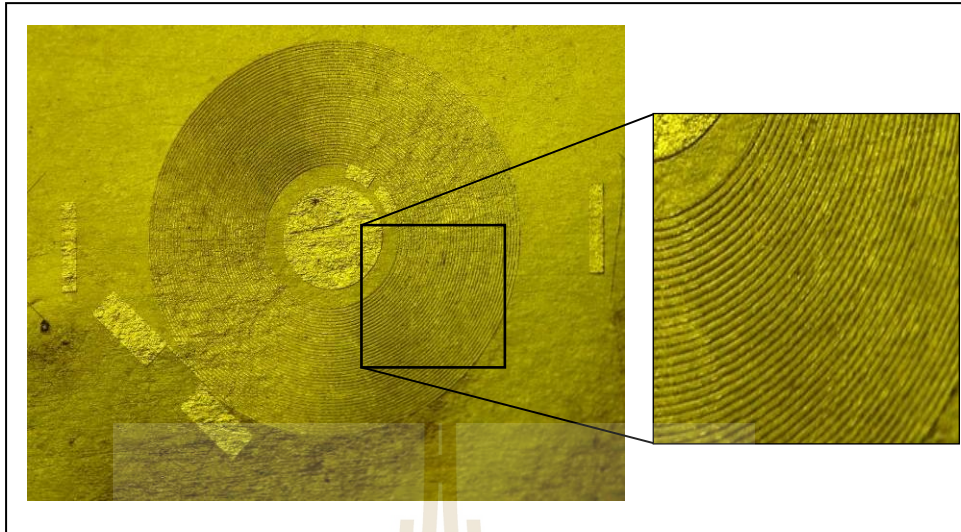
ก่อนการใช้งานแผ่นแกรไฟต์ ต้องทำการอบไล่ความชื้นด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที ก่อนทุกครั้ง เพื่อไล่ความชื้น หากไม่อบ จะเกิดพองขึ้นจำนวนมาก เมื่อเคลือบสารไวแสง ก่อนการเคลือบสารไวแสงทุกครั้ง ควรนำแผ่นแกรไฟต์ อบไล่ความชื้นที่ 80 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อป้องกันฟองอากาศที่จะเกิดขึ้นในเนื้อสารไวแสง ในขั้นตอนการอบ จากการทดสอบใช้งานแบ่งเป็นสองส่วน คือ การใช้สร้างหน้ากาก และการใช้เป็นฐานขึ้นงาน รูปที่ 3.14 แสดงการเปิดหลอดเลือดของสารไวแสง SU-8 บนฐานแกรไฟต์อ่อนเพื่อใช้ทำหน้ากาก จะเห็นว่าหลอดเลือดมีความสมบูรณ์ เมื่อนำไปชุบเงินด้วยค่ากระแสที่เหมาะสม จะเห็นว่าโลหะเงินขึ้นได้สมบูรณ์ทุกหลอดเลือด ส่วนความสามารถยึดเกาะของสารไวแสงบนแกรไฟต์ พบว่าสามารถยึดเกาะได้ดี จากรูปที่ 3.16 จะเห็นว่าสารไวแสงกว้าง 30 ถึง 50  $\mu\text{m}$  สูง 300  $\mu\text{m}$  สามารถยึดเกาะฐานได้ดี



รูปที่ 3.12 การรีดแผ่นแกรไฟต์อ่อนด้วยเครื่องรีด PCB



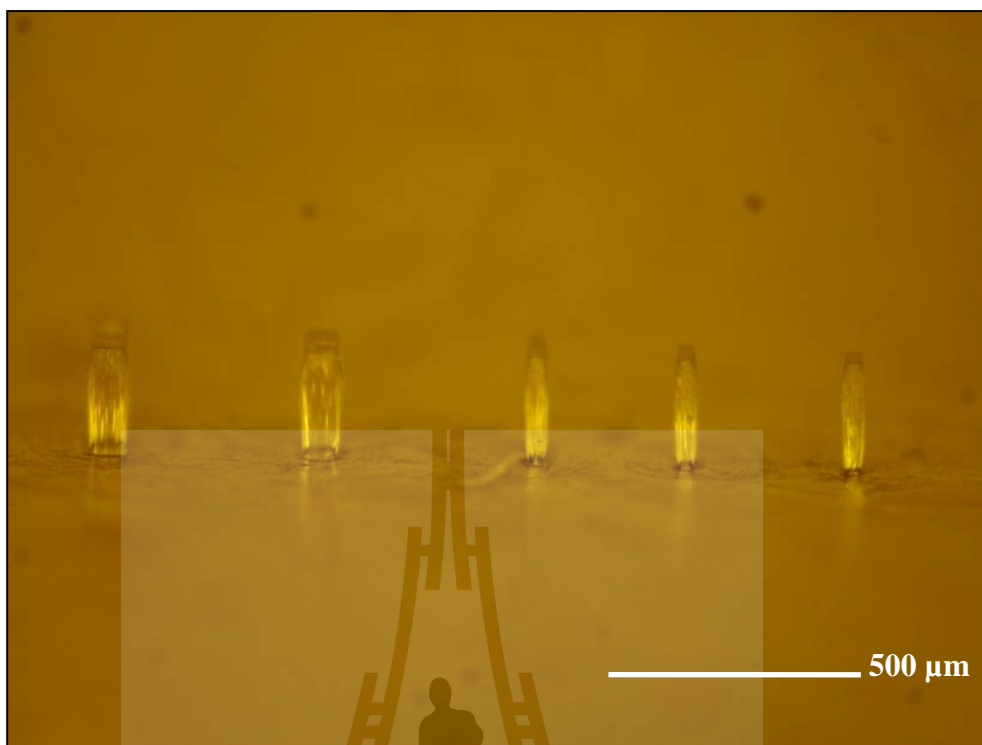
รูปที่ 3.13 แกรไฟต์อ่อนหลังการทำความสะอาด และติดบนกระจก



รูปที่ 3.14 ลวดลายสารไวแสงบนเกรไฟต์อ่อน สำหรับโครงสร้างที่ซับซ้อน



รูปที่ 3.15 หน้ากากกันรังสีเอกซ์บนฐานเกรไฟต์อ่อน

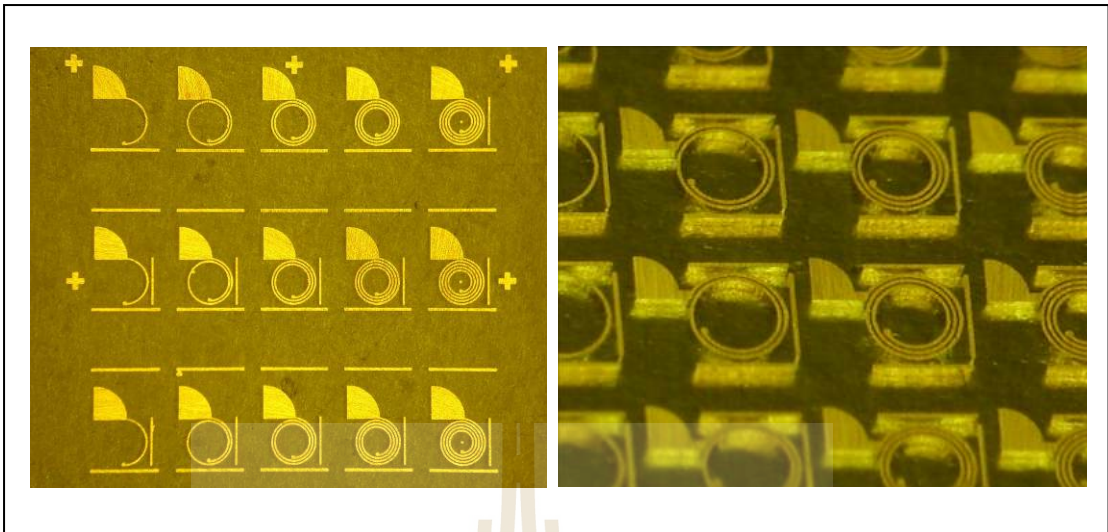


รูปที่ 3.16 แสดงการยึดเกาะของ โครงสร้าง SU-8 กว้าง 50  $\mu\text{m}$  สูง 300  $\mu\text{m}$   
บนฐานแกรไฟต์อ่อน

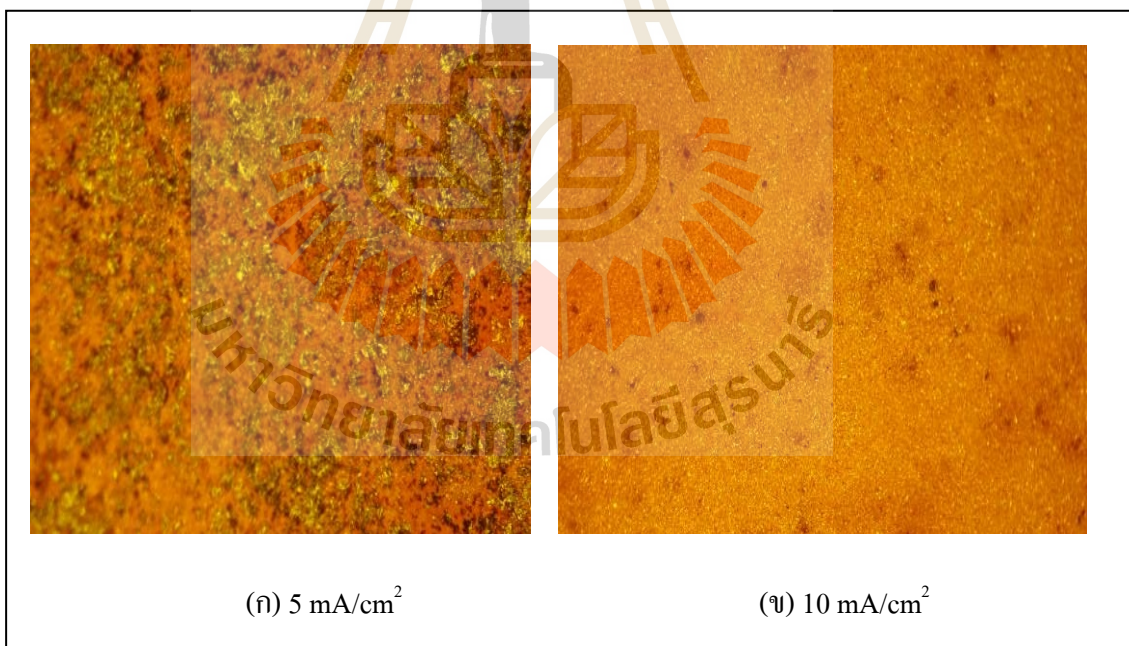
### 3.3.3 การชุบโลหะบนแกรไฟต์อ่อน

แกรไฟต์อ่อน พื้นผิวมีความนำไฟฟ้า ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น ในการชุบโลหะจึงต้องมีการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจึงจะสามารถชุบให้ขึ้นพร้อมกัน และเรียบได้ ในส่วนนี้ได้ทำการหาเงื่อนไขในการชุบโลหะที่เหมาะสมสำหรับโลหะสามชนิด ประกอบไปด้วย การชุบโลหะทองแดง เงิน และนิกเกิล เงื่อนไขในการชุบโลหะ สำหรับทองแดง และเงิน ต้องชุบด้วยค่ากระแสเริ่มต้นที่ 30  $\text{mA}/\text{cm}^2$  เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงลดค่ากระแสลงมาที่ 20  $\text{mA}/\text{cm}^2$  ชุบต่อไปที่ค่ากระแสที่จกกว่าจะเต็ม ถ้าเริ่มต้นด้วยค่ากระแสต่ำผลเป็นดังรูปที่ 3.18 (ก) จะเห็นว่า ที่ค่ากระแสเริ่มต้น 5 ถึง 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$  โลหะก่อตัวขึ้นไม่สม่ำเสมอ แม้ว่าหลังจากชุบด้วยกระแสเริ่มต้นแล้ว เพิ่มกระแสขึ้นอีก โลหะก็ไม่สามารถขึ้นบริเวณที่ว่างได้ เนื่องจากบริเวณที่ว่าง มีค่าความต้านทานสูงกว่าบริเวณที่มีทองแดง ส่วนที่กระแส 20  $\text{mA}/\text{cm}^2$  โลหะขึ้นสม่ำเสมอมากขึ้น แต่จะยังมีบริเวณที่เกิดช่องว่างเล็กน้อย และขั้นสุดท้ายทดสอบชุบที่ค่ากระแส 30  $\text{mA}/\text{cm}^2$  โลหะขึ้นได้ดีทุกบริเวณ ไม่เกิดช่องว่าง แต่ถ้าชุบต่อไปด้วยค่ากระแสนี้ จะเกิดจุดนูนขึ้นดังรูปที่ 3.18 (ง) เนื่องจากโลหะก่อตัวขึ้นเร็วเกินไป

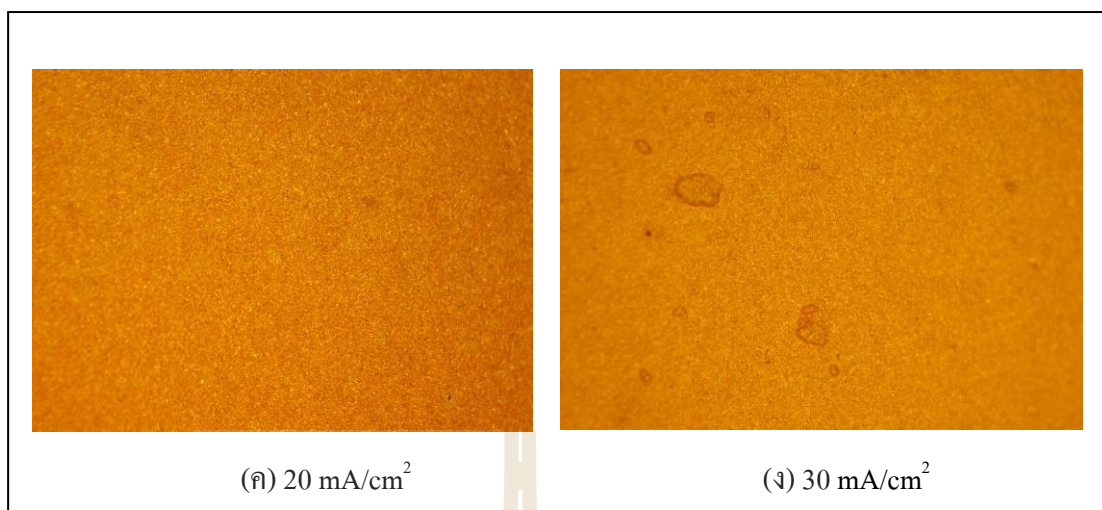




รูปที่ 3.17 ตัวอย่างโครงสร้างขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการชุบทองแดงและซัดเรียบบนฐานแกรไฟต์อ่อน



รูปที่ 3.18 การชุบโลหะทองแดงบนแกรไฟต์อ่อนด้วยกระแสที่ 5 ถึง  $30 \text{ mA/cm}^2$

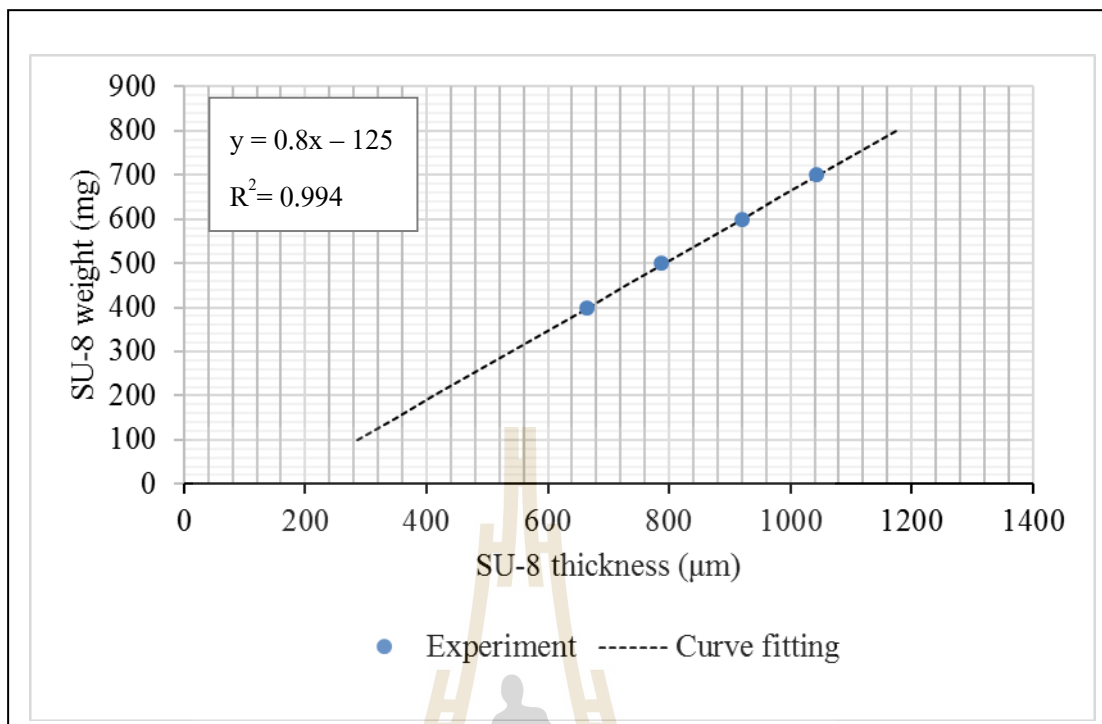


รูปที่ 3.18 การชุบโลหะทองแดงบนแกรไฟต์อ่อนด้วยกระแสคงที่ 5 ถึง 30 mA/cm<sup>2</sup> (ต่อ)

สำหรับโลหะเงิน ได้ผลเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการชุบโลหะทองแดง และเงิน จึงต้องเริ่มต้นชุบที่กระแส 30 mA/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นลดค่ากระแสมา 20 mA/cm<sup>2</sup> และชุบด้วยค่ากระแสที่น้อยกว่าจะเต็ม ซึ่งจากการทดสอบเงื่อนไขนี้กับชิ้นงานจริง พบว่าโลหะขึ้นสม่ำเสมอทุกบริเวณ โครงสร้างตัวอย่างการชุบโลหะทองแดงของโครงสร้างจุลภาคจริงหลังการจัดเรียง เป็นดังรูปที่ 3.17 และสำหรับโลหะนิกเกิลกระแสเริ่มต้นควรชุบที่ 10 mA/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นลดลงเหลือ 3 mA/cm<sup>2</sup> จนวนกว่าจะเต็ม เนื่องจากการชุบนิกเกิล จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้น ทำให้เกิดฟองแทรกในแม่พิมพ์ จึงไม่สามารถชุบด้วยกระแสสูงได้

### 3.4 การสร้างสมการสำหรับการหดยาสารไวแสงเพื่อให้ได้ความหนาคงที่

ในการเตรียมสารไวแสง โดยทั่วไปจะใช้วิธีการหมุนเคลือบ ซึ่งจากการทดลองพบว่าสารไวแสงที่ได้ใช้จริงคิดเป็นปริมาณ น้อยกว่า 50 % ของสารไวแสงที่เติมลงไปทั้งหมด โดยเฉพาะสารไวแสงที่มีความหนืดมาก เช่น SU-8 2100 ในส่วนนี้ จึงได้คิดค้นวิธีการหดยาสารไวแสงแทนการหมุนเคลือบ ซึ่งจะใช้งานสารไวแสงได้ 100 % โดยไม่มีการทิ้งไป แต่อย่างไรก็ตาม ในการหดยาสารไวแสงให้ได้ความหนาตามต้องการ ทำได้ยาก ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการชั่งน้ำหนักสารไวแสงต่อพื้นที่ จากการทดลอง จะได้สมการแทนความหนา และน้ำหนักของสารไวแสงที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.19 สำหรับพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว และสารไวแสงต้องทำการอบ 13 ชั่วโมงโดยประมาณ จากการทดสอบใช้งานจริง พบว่าความหนามีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 μm สมการดังกล่าวจึงสามารถใช้งานได้จริง ซึ่งจะช่วยประหยัดสารไวแสง และยังสามารถเตรียมชิ้นงานได้ครั้งละมาก ๆ



รูปที่ 3.19 สมการความหนาของสารไวแสง SU-8 2100 จากการหยดสารไวแสงในพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว สำหรับความหนามากกว่า 300  $\mu\text{m}$

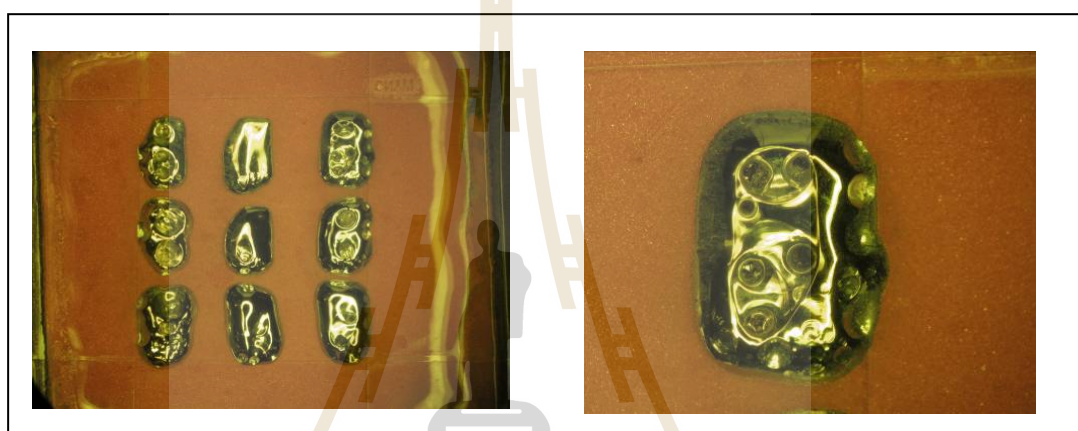
### 3.5 การชุบโลหะ NiFe สารเคมี และการพัฒนาชุดชุบโลหะ

กระบวนการสร้างส่วนของแกน permalloy (Ni:Fe) ทั้งในส่วนบน และส่วนล่าง จะใช้กระบวนการสร้างแบบเดียวกับกระบวนการสร้างขดลวด เพียงแต่ กระบวนการสร้างแกนชั้นล่าง ไม่ต้องกำจัดส่วนฐานทิ้งไป กระบวนการขึ้นรูป NiFe นั้นขึ้นรูปโดยการชุบด้วยไฟฟ้า ใช้ส่วนผสมของสารเคมี เพื่อให้ได้อัตราส่วน Ni:Fe 80:20 เป็นไปตามตารางที่ 3.1 จากการทดสอบพบว่า กระบวนการชุบค่อนข้างมีปัญหา เนื่องจากเกิดฟองขึ้นจำนวนมาก ถึงแม้จะใช้ค่ากระแสต่ำเพียง  $3\text{mA}/\text{cm}^2$  ก็ตาม โดยฟองนี้คือแก๊ส ไฮโดรเจน ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี หากใช้แท่งแม่เหล็กแกนสารละลาย เหมือนการชุบโลหะทั่วไป จะไม่สามารถกำจัดฟองได้ ทำให้โครงสร้างไม่สมบูรณ์ เนื่องจากมีหลุมเกิดขึ้นจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.20

นอกจากนี้ เนื่องจากในกระบวนการทางไฟฟ้า-เคมี จะเกิด  $\text{Fe}^{3+}$  ขึ้นในสารละลาย หากมีออกซิเจนเข้าไปสัมผัสที่ผิวของสารละลายหรือละลายเข้าไป จะทำให้เกิด  $\text{FeO}_2$  ขึ้นในสารละลาย ทำให้ NiFe ที่ได้ มีอัตราส่วนของ Fe ลดลง เหลือ 5 ถึง 10 % เท่านั้น ส่งผลให้ค่า permeability ของ NiFe ลดต่ำลงอย่างมาก ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหการเกิดฟองไฮโดรเจน และไล่ ออกซิเจนออกจาก

สารละลาย จึงได้ออกแบบชุดชุบโลหะแบบปิด ใช้แก๊สไนโตรเจนไล่ออกซิเจน และพาฟองไฮโดรเจนออกจากโครงสร้างพร้อมกัน โครงสร้างชุดชุบโลหะนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.21 จากการทดสอบใช้งาน พบว่าสามารถกำจัดฟองที่เกิดขึ้นได้ โครงสร้างที่ได้มีความเรียบสวยงาม ดังรูปที่ 3.22 และเมื่อขัดโลหะส่วนที่เกินออกให้เรียบ จะได้ชิ้นของ NiFe ดังรูปที่ 3.23

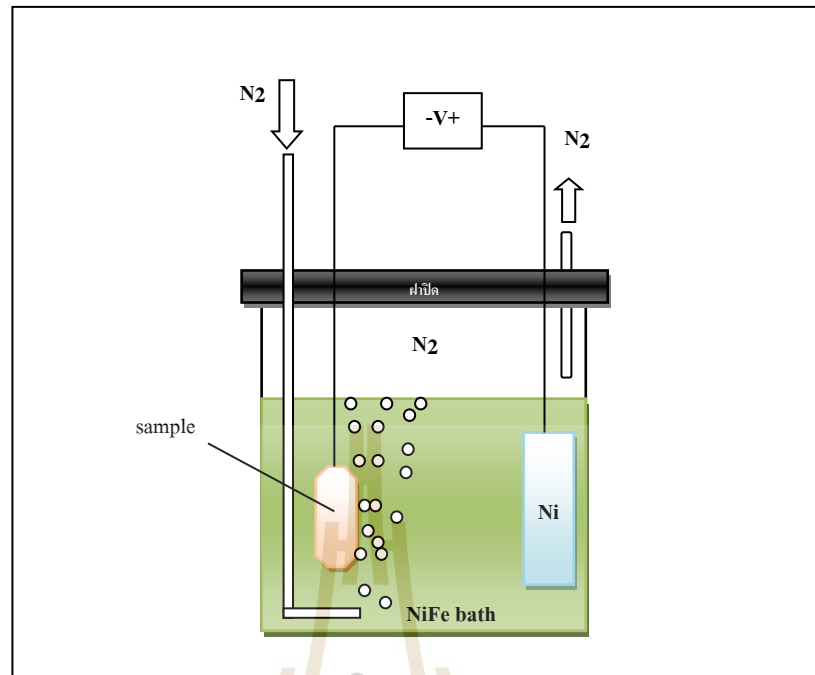
โครงสร้าง NiFe ที่ได้นี้ จะนำไปใช้ในการสร้างตัวเหนี่ยวนำจุลภาคแกน E-I โดยใช้เป็นแผ่นปิดด้านบน และด้านล่าง และจะชุบแกนกลางของตัวเหนี่ยวนำขึ้นมาเพิ่มเติม ซึ่งรายละเอียดในการสร้าง จะได้นำเสนอโดยละเอียดในบทที่ 6



รูปที่ 3.20 โครงสร้าง NiFe ที่เสียหาย เนื่องจากฟองที่เกิดขึ้นในกระบวนการชุบโลหะ

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมน้ำยาชุบแกนตัวเหนี่ยวนำสำหรับแกนชนิด NiFe และ NiFeMo

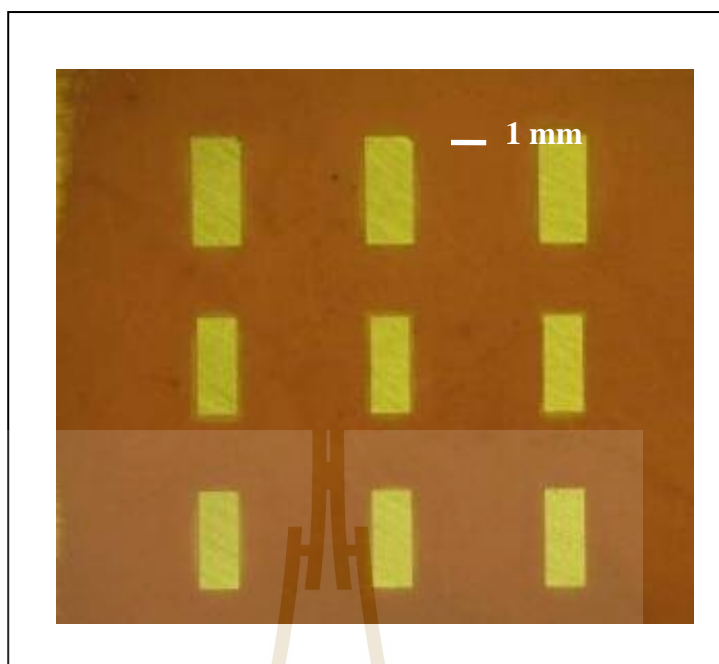
Chemical	NiFe bath (g/L)	NiFeMo bath (g/L)
$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	200	60
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	5	-
$\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	8	4
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	2
$\text{H}_3\text{BO}_3$	25	-
NaCl	-	10
Citric acid	-	66
Saccharin	3	3



รูปที่ 3.21 ชุดชุบโลหะ NiFe



รูปที่ 3.22 โลหะ NiFe ที่ได้จากการชุบด้วยชุดชุบโลหะที่สร้างขึ้น

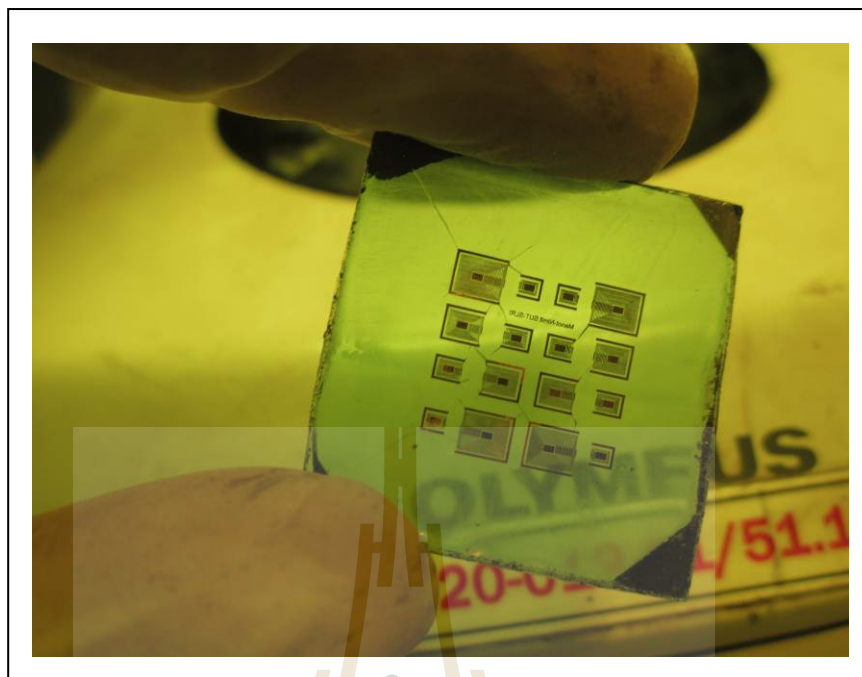


รูปที่ 3.23 โลหะ NiFe หลังการขัดเรียบ

### 3.6 การพัฒนากระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคแบบฝังในแม่พิมพ์ SU-8

ในส่วนนี้นำเสนอการพัฒนากระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูงแบบฝังในแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งมีประโยชน์ดังได้กล่าวในบทที่ 1 และบทที่ 2 กระบวนการนี้เป็นการพัฒนาการสร้างแผ่นพอลิเมอร์บาง โดยการกำจัดส่วนฐานออกไป โครงสร้างที่ได้สามารถนำไปยึดติดกับฐานใหม่ หรือนำไปสร้างโครงสร้างเพิ่มเติมได้ทั้งสองด้าน กระบวนการสร้างโครงสร้างมีดังนี้

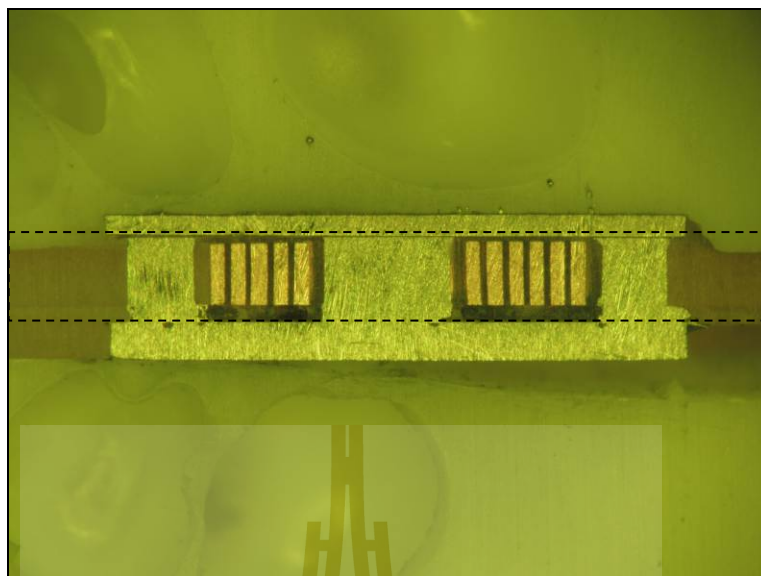
ในการพัฒนากระบวนการนี้ เลือกใช้แกรไฟต์อ่อน หรือแกรไฟต์แข็ง เป็นส่วนฐานของโครงสร้าง เนื่องจากสามารถขัดออกได้ง่าย กระบวนการเริ่มจาก นำแผ่นแกรไฟต์อบให้แห้ง เมื่อเย็นลง จึงนำมาเคลือบสารไวแสงให้ได้ความหนาตามต้องการ และอบที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 13 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน  $22 \text{ J/cm}^2$  ผ่านหน้ากากเงินหนา  $50 \text{ }\mu\text{m}$  และอบที่ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที ปลอ่ยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อไม่ให้ชิ้นงานโก่งตัวจากความเครียด จากนั้นจึงล้างสารไวแสงออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ล้างต่อด้วย อะซิโตน และน้ำเปล่า เพื่อให้ชิ้นงานสะอาดไม่เป็นคราบของน้ำยาคัดที่ผิวของแกรไฟต์ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ อบที่ 50 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อให้ชิ้นงานแห้ง



รูปที่ 3.24 แผ่นแม่พิมพ์ SU-8 หนา 250  $\mu\text{m}$  ที่มีขดทองแดงฝังอยู่ภายใน

เมื่อได้แม่พิมพ์ของสารไวแสงหนาแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการชุบทองแดงลงในแม่พิมพ์ ในขั้นแรก นำแม่พิมพ์ติดทับด้วยเทปกาว เพื่อให้ชิ้นงาน นำไฟฟ้าเฉพาะบริเวณหลุมของแม่พิมพ์ จากนั้นนำแม่พิมพ์ หยอดด้วยแอลกอฮอล์เนื่องจากมีแรงตึงผิวน้อยกว่าน้ำ จะช่วยไม่ให้เกิดฟองอากาศ ขึ้นในแม่พิมพ์ และนำไปจุ่มน้ำ DI จากนั้นนำชิ้นงานจุ่มในน้ำยาชุบทองแดง และชุบด้วยกระแสเริ่มต้น  $30 \text{ mA/cm}^2$  เป็นเวลา 10 นาที และชุบต่อด้วยกระแส  $10 \text{ mA/cm}^2$  จนสิ้น จากนั้นนำชิ้นงาน ชัดทองแดงที่ล้นออกให้เรียบ จะได้ขดลวดทองแดงฝังอยู่ในแม่พิมพ์ SU-8 เป่าชิ้นงานให้แห้ง และติดทับด้วยเทปกาวในด้านที่ชัดทองแดงออก ซึ่งเทปกาวนี้ จะเป็นตัวช่วยเสริมความแข็งแรงของแผ่นสารไวแสง ที่มีความหนาเพียง 150 ถึง 400  $\mu\text{m}$  จากนั้นกลับด้านชิ้นงาน และขัดส่วนฐานทิ้งไป ในขั้นตอนนี้ต้องขัดด้วยความระมัดระวัง เพราะถ้าขัดมากเกินไป จะทำให้ความหนาของชิ้นงานลดลง ซึ่งโดยทั่วไป หลังการขัดสองด้าน จะเสียความหนาไปด้านละประมาณ 25  $\mu\text{m}$  ดังนั้นในขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์ควรเผื่อความหนาไว้ประมาณ 50  $\mu\text{m}$

เมื่อขัดฐานออกแล้ว จะเหลือแผ่นสารไวแสงที่ติดกับเทปกาว ในการลอกเทปกาวนั้น ต้องจุ่มในอะซิโตน และลอกออก หากไม่ใช่อะซิโตน จะลอกยาก และชิ้นงานจะแตกร้าวเสียหายได้ รูปที่ 3.24 แสดงโครงสร้างแผ่นแม่พิมพ์ SU-8 สี ที่มีตัวนำฝังอยู่ภายใน และในรูปที่ 3.25 แสดงภาพตัดขวางของโครงสร้างที่นำไปประยุกต์ใช้งานเป็นส่วนของขดลวด ในตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.25 ภาพตัดขวางของตัวเหนี่ยวนำ ที่ได้นำแผ่นแม่พิมพ์ SU-8 350  $\mu\text{m}$  มาประยุกต์ใช้งาน

จากกระบวนการที่ได้พัฒนาขึ้นในบทนี้ จะนำไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อสร้างเป็นตัวเก็บประจุแบบชิปสำหรับใช้งานในย่านความถี่วิทยุ และพัฒนาเป็นตัวเหนี่ยวนำจุลภาคสำหรับวงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดในบทที่ 5 และ 6 ส่วนในบทต่อไป จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ รวมไปถึงวิธีการวัดผล และการสร้างเครื่องมือวัด เพื่อใช้ในการวัดคุณลักษณะสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ



## บทที่ 4

### ทฤษฎีและการวัดผล

#### 4.1 ตัวเก็บประจุ และการวัดที่ความถี่สูง

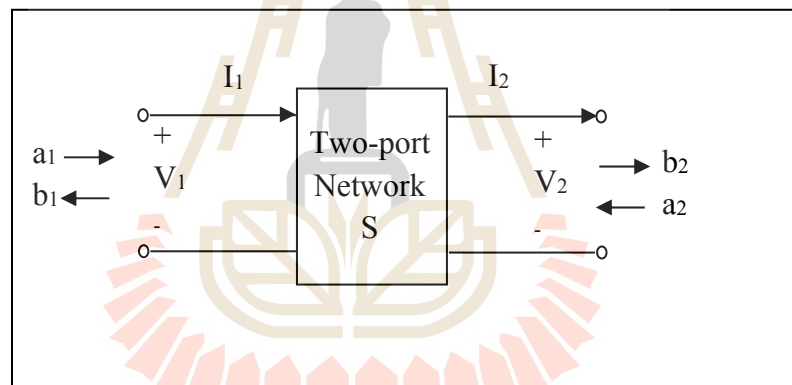
ตัวเก็บประจุในงานวิจัยนี้ ออกแบบใช้งานสำหรับความถี่วิทยุ (RF) ซึ่งในการวัดผล ต้องทำการวัดที่ความถี่ที่ต้องการใช้งาน เพื่อสร้างแบบจำลองหาส่วนประกอบภายในตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้น ซึ่งในงานความถี่สูง จำเป็นต้องหาความถี่ self-resonance ของอุปกรณ์ เนื่องจากที่จุดนี้ อุปกรณ์จะไม่สามารถใช้งานเป็นตัวเก็บประจุ หรือตัวเหนี่ยวนำได้ เพราะส่วนจินตภาพจะหักล้างกันหมดเหลือเพียงส่วนจริง ซึ่งคือค่าความต้านทานนั่นเอง ดังนั้น ในการวัดที่ความถี่สูง จำเป็นต้องใช้เครื่อง Vector network analyzer วัดพารามิเตอร์การสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยเข้าไปในอุปกรณ์ที่ต้องการวัด เรียกว่า s-parameter รายละเอียดมีดังนี้

##### 4.1.1 S-parameter

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติวัดผลทางไฟฟ้ากระแสตรงหรือความถี่ต่ำ ปริมาณกระแส แรงดัน สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือวัดทั่วไป เช่น โวลต์มิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ หรือ ออสซิลโลสโคป ซึ่งค่าความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ หรือค่าความจุไฟฟ้า สามารถวัดได้ด้วย LCR มิเตอร์ แต่สำหรับความถี่สูงในระดับ GHz ค่าพารามิเตอร์แฝงต่าง ๆ จะมีผลมาก กระบวนการวัดจึงทำได้ยาก จำเป็นต้องใช้วิธีการวัดด้วยเครื่องมือวัดความถี่สูง คือ Vector Network Analyzer (VNA) ดังรูปที่ 4.1 อุปกรณ์นี้ใช้หลักการส่งผ่าน และสะท้อน ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งเข้าไปในอุปกรณ์ เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของอุปกรณ์ ที่ต้องการวัด สิ่งที่วัดได้จากเครื่องมือนี้เรียกว่า scattering parameter (S-parameter) ซึ่งหมายถึง พารามิเตอร์การกระเจิงของคลื่น สามารถวัดออกมาเป็นพารามิเตอร์สะท้อน (reflect) และพารามิเตอร์การส่งผ่าน (transmit) พารามิเตอร์นี้ เป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์ แอดมิตแดนซ์ สามารถแปลงได้โดยใช้ transfer matrix (ABCD matrix) พารามิเตอร์เหล่านี้ มีความสัมพันธ์กัน ดังสมการที่ 4.1 ถึง 4.3 แต่ในการวัดที่ความถี่สูงระดับ GHz พารามิเตอร์ที่วัดได้คือพารามิเตอร์ S สามารถแปลงเป็นเมตริกซ์ของแอดมิตแดนซ์ได้ด้วยสมการที่ 4.5 ถึง 4.8 (Linder, 1996) และสามารถแปลงจาก y เป็น s ได้ด้วยสมการที่ 4.9 ถึง 4.12 โดยค่า  $Z_0$  เป็นค่าความต้านทานคุณลักษณะ มีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$  ซึ่งความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เหล่านี้ สามารถพิจารณาได้จากรูปวงจร 2 พอร์ต ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 Vector Network Analyzer Agilent 8753ES 30kHz - 6GHz



รูปที่ 4.2 Two port network

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$y_{11} = \frac{(1-s_{11})(1+s_{21})+s_{12}s_{21}}{Z_0(1+s_{11})(1+s_{22})-s_{12}s_{21}} \quad (4.5)$$

$$y_{12} = \frac{-2s_{21}}{Z_0(1+s_{11})(1+s_{22})-s_{12}s_{21}} \quad (4.6)$$

$$y_{21} = \frac{-2s_{21}}{Z_0(1+s_{11})(1+s_{22})-s_{12}s_{21}} \quad (4.7)$$

$$y_{22} = \frac{(1+s_{11})(1-s_{21})+s_{12}s_{21}}{Z_0(1+s_{11})(1+s_{22})-s_{12}s_{21}} \quad (4.8)$$

$$s_{11} = \frac{(1-y_{11})(1+y_{22}Z_0)+y_{12}y_{21}Z_0^2}{(1+y_{11}Z_0)(1+y_{22}Z_0)-y_{12}y_{21}Z_0^2} \quad (4.9)$$

$$s_{12} = \frac{-2y_{12}Z_0}{(1+y_{11}Z_0)(1+y_{22}Z_0)-y_{12}y_{21}Z_0^2} \quad (4.10)$$

$$s_{21} = \frac{-2y_{21}Z_0}{(1+y_{11}Z_0)(1+y_{22}Z_0)-y_{12}y_{21}Z_0^2} \quad (4.11)$$

$$s_{22} = \frac{(1+y_{11}Z_0)(1-y_{22}Z_0)+y_{12}y_{21}Z_0^2}{(1+y_{11}Z_0)(1+y_{22}Z_0)-y_{12}y_{21}Z_0^2} \quad (4.12)$$

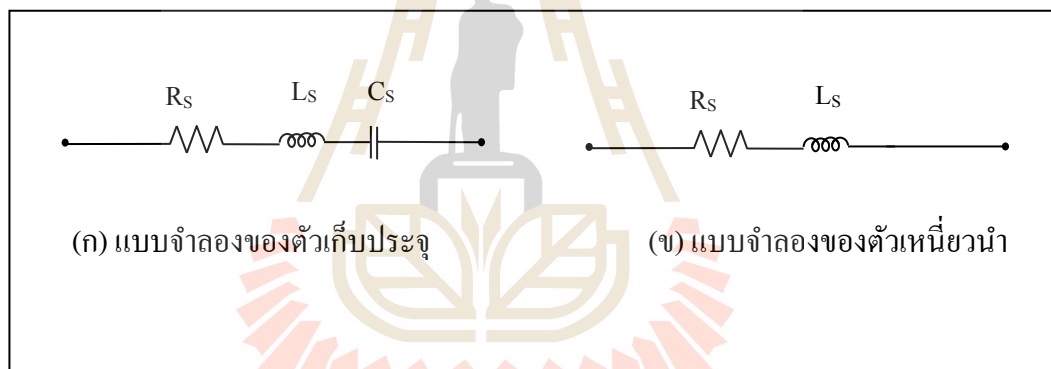
ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการวัดอุปกรณ์แบบเทียบกราวนด์ ส่งผลให้แบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองแบบ 1 พอร์ต ดังนั้นสมการจะลดรูปเหลือเพียงพารามิเตอร์เดียว คือ  $S_{11}$  เท่านั้น มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.13 ถึง 4.14 และสามารถแปลงเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ต 1 ได้ด้วย

สมการที่ 4.15 ค่าที่ได้นี้จะเป็ค่าสมมูลของวงจร ดังนั้น สำหรับตัวเก็บประจุ จะใช้วงจรสมมูลดังรูปที่ 4.3 (ก) แต่หากเป็นตั้เหนี่ยวนำ จะใช้วงจรสมมูลดังรูปที่ 4.3 (ข)

$$y_{11} = \frac{(1 - s_{11})}{Z_0(1 + s_{11})} \quad (4.13)$$

$$s_{11} = \frac{(1 - y_{11})}{(1 + y_{11}Z_0)} \quad (4.14)$$

$$Z_1 = Z_0 \frac{(1 + s_{11})}{(1 - s_{11})} \quad (4.15)$$



รูปที่ 4.3 แบบจำลองชนิด 1 พอร์ตของตัวเก็บประจุและตั้เหนี่ยวนำ

จากแบบจำลองในรูปที่ 4.3 สามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำอนุกรม และค่าความต้านทานอนุกรม โดยใช้สมการที่ 4.15 ถึง 4.17 และค่าตัวประกอบคุณภาพสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 4.18

$$Z_s = R_s + j\omega L_s \quad (4.16)$$

$$R_s = \text{Re}(Z_s) \quad (4.17)$$

$$L_s = \frac{\text{Im}(Z_s)}{\omega} \quad (4.18)$$

$$Q = \frac{\text{Im}(Z_{in})}{\text{Re}(Z_{in})} \quad (4.19)$$

$$Q = \frac{\text{Im}(Z_s)}{\text{Re}(Z_s)} \quad (4.20)$$

แต่สำหรับตัวเก็บประจุ จะเห็นว่า ส่วนจินตภาพนั้น ประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ในการหาคำตอบ ต้องใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization) ส่วนค่าตัวประกอบคุณภาพสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.24

$$Z_s = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (4.21)$$

$$\text{Re}(Z_s) = R \quad (4.22)$$

$$\text{Im}(Z_s) = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (4.23)$$

$$Q = \frac{1}{2\pi fCR_s} \quad (4.24)$$

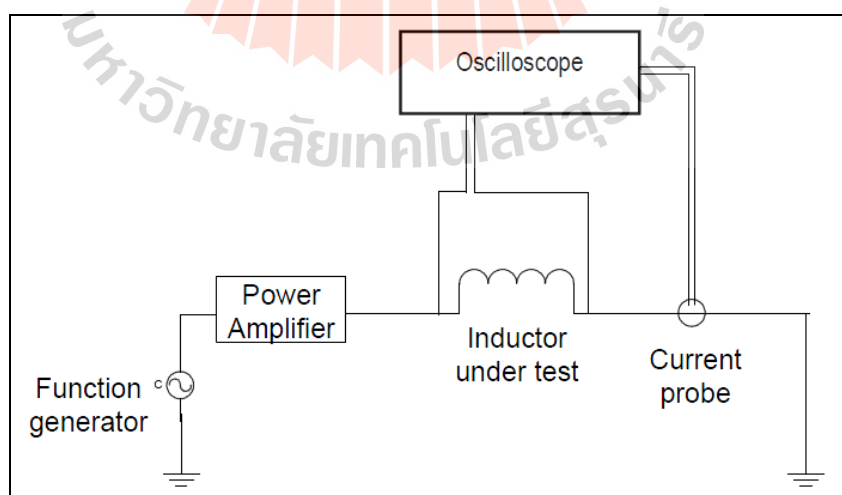
## 4.2 ตัวเหนี่ยวนำจุลภาคกำลัง และการวัดผล

ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) คือ อุปกรณ์ทางไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ในการเก็บสะสมพลังงานจลน์ทางไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรไฟฟ้า (Inductance) ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำคือปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นที่ตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน และสนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ด้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า โดยที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะแปรผันตรงกับปริมาณกระแสที่ไหล ค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็นเฮนรี (Henry : H) ค่าความเหนี่ยวนำ 1 H หมายถึง เมื่อมีไฟฟ้ากระแสสลับ 1 Hz ไหลผ่าน

ตัวเหนี่ยวนำปริมาณ 1 แอมแปร์ ตัวเหนี่ยวนำจะสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive force : EMF) ขึ้น 1 โวลต์ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำโดยทั่วไป แบ่งเป็นสองประเภท คือ ตัวเหนี่ยวนำกระแสสลับ (AC inductor) และตัวเหนี่ยวนำกระแสตรง (DC inductor) โดยตัวเหนี่ยวนำกระแสตรง โดยทั่วไป จะมีการเพิ่มช่องอากาศเข้าไปใน โครงสร้าง เพื่อเพิ่มความสามารถในการรองรับฟลักซ์ที่เกิดจาก แรงดันกระแสตรง หากไม่มีการเพิ่มช่องอากาศ แกนจะเกิดการอิ่มตัว นอกจากการเพิ่มช่องอากาศ แล้ว ยังมีการใช้แกนผงอัด (powder core) สามารถช่วยเพิ่มกระแสอิ่มตัว ได้เช่นเดียวกัน

#### 4.2.1 การวัดค่าความเหนี่ยวนำ ด้วย VNA

การวัดค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่ในระดับ MHz มีวิธีการที่นิยมสองวิธี คือ การวัด โดยใช้ออสซิลโลสโคป วัดกระแส แรงดัน เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความ ด้านทานอนุกรม มีแผนผังการต่อวงจรดังรูปที่ 4.4 เมื่อได้ผลการวัดเฟส ขนาด ของกระแส และ แรงดันแล้ว จึงนำมาคำนวณค่าความต้านทาน และความเหนี่ยวนำ ด้วยสมการที่ 4.25 ถึง 4.26 ซึ่งใน การวัด ต้องมีการใช้หัววัดกระแส (Current Probe) เพื่อใช้วัดสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัว เหนี่ยวนำ วิธีการนี้มีข้อเสีย คือ ผลการวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนได้มาก เนื่องจากการอ่านเฟสของ สัญญาณ อาจผิดพลาดได้ และที่ความถี่สูงในระดับนี้ ผลของลายวงจรที่นำตัวอย่างชิ้นงานติดตั้งไป (PAD) จะมีผลค่อนข้างมาก การวัดค่าความจุของ PAD เพื่อลบออกในภายหลัง ทำได้ยาก เพราะมี ค่าน้อย ยากที่จะวัดเฟสต่างของสัญญาณได้ ทำให้การวัดด้วยวิธีการนี้ ตัวเหนี่ยวนำมักจะมีจุด self-resonance frequency (SRF) ต่ำ เนื่องมาจากผลของความจุไฟฟ้าจะหักล้างกับค่าความเหนี่ยวนำ ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำที่วัดได้มีค่าลดลง



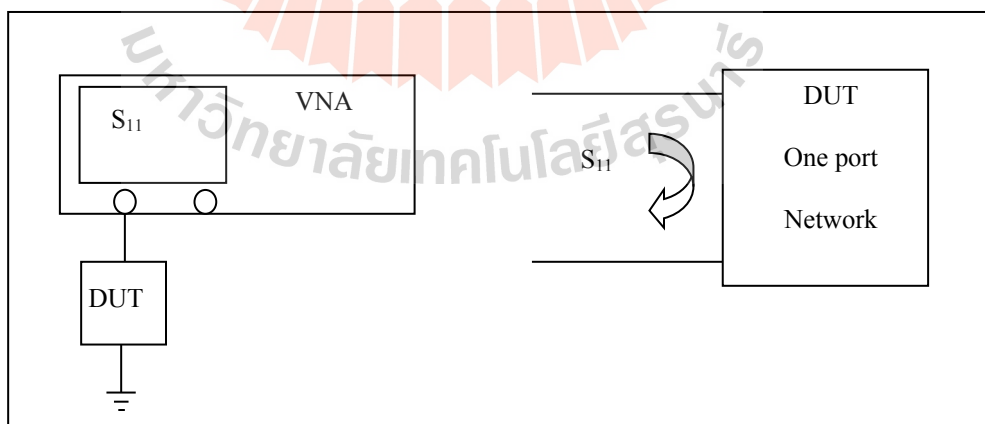
รูปที่ 4.4 การวัดค่าความเหนี่ยวนำด้วยวิธีการวัดเฟสของกระแสและแรงดัน.

$$L = \frac{V}{\omega I} \sin \varphi \quad (4.25)$$

$$R_{eq} = \frac{V}{I} \cos \varphi \quad (4.26)$$

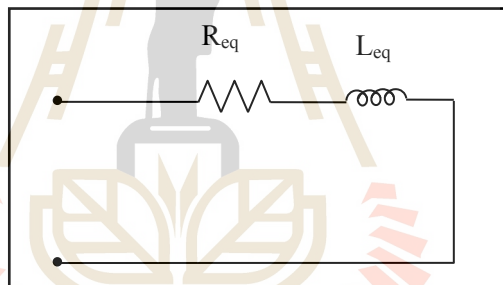
วิธีการที่สองคือ การวัดด้วย Vector Network Analyser (VNA) มีข้อดีคือ สามารถวัดด้วยความถี่สูงถึงระดับ GHz และวัดได้แม่นยำกว่ามาก เนื่องจากสามารถตัดผลของค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจาก PAD ออกได้ทั้งหมด ผลการวัดด้วยวิธีการนี้ตัวเหนี่ยวนำจะมีจุด SRF ที่ความถี่สูงกว่า ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การ ทดสอบคุณลักษณะสมบัติของตัวเหนี่ยวนำจุลภาค ในวงจรกระแสสลับ ด้วยเครื่อง Vector Network Analyser (VNA) ทำให้สามารถวัดคุณสมบัติที่ความถี่ในระดับ GHz ซึ่งจะมีประโยชน์ในการหาจุด SRF ในกรณีที่ตัวเหนี่ยวนำจุลภาคมีจุด SRF ที่ความถี่สูงในระดับ GHz

การศึกษาคุณลักษณะสมบัติของตัวเหนี่ยวนำในวงจรกระแสสลับ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การวัด S-parameter เพื่อหาแบบจำลองแบบ 1 พอร์ต เนื่องจากความถี่ที่ใช้งานไม่สูงมากคืออยู่ในช่วงไม่เกิน 1 GHz หากวัดแบบ 2 พอร์ต จึงให้ผลการวัดไม่ต่างกัน หลังจากการวัดค่า s-parameter แล้ว จึงนำมาคำนวณ พารามิเตอร์สองตัวคือ ค่าความต้านทานอนุกรม และค่าความเหนี่ยวนำอนุกรม ซึ่งวงจรการวัด เป็นดังรูปที่ 4.5 และแบบจำลอง แบบ 1 พอร์ต เป็นดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 แผนผังการทดสอบตัวเหนี่ยวนำจุลภาคแบบ 1 พอร์ตด้วยเครื่อง Vector Network Analyzer (VNA) Agilent 8650ES 30kHz - 6GHz

ในการเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำเข้ากับ VNA ใช้การเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำด้วยเส้นลวดขนาด  $20\ \mu\text{m}$  เพื่อเชื่อมไปยังขั้วไฟฟ้าของ PAD ที่ต่อเข้ากับตัวเชื่อมต่อชนิด N-type ดังรูปที่ 4.6 เชื่อมจุดละ 3 เส้น เนื่องจากแต่ละเส้นสามารถทนกระแสได้  $500\ \text{mA}$  และเพื่อลดค่าความต้านทานที่จุดเชื่อมต่อ ความถี่ที่ใช้ทดสอบตัวเหนี่ยวนำ ส่วนใหญ่นิยมใช้ความถี่สูงให้ครอบคลุมจุด SRF ในการทดลองนี้ วัดที่ความถี่ในช่วง  $20\ \text{kHz}$  ถึง  $2\ \text{GHz}$  เนื่องจากในการวัดเบื้องต้น ตัวเหนี่ยวนำนี้มีจุด SRF ที่  $1.2\ \text{GHz}$  และ  $1.5\ \text{GHz}$  สำหรับตัวเหนี่ยวนำชนิด 5.5 และ 3.5 รอบ ในขั้นตอนต่อไป ต้องทำการตัดผลของขั้วไฟฟ้าออก เพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่แท้จริง วิธีการคือ นำค่า  $S_{11}$  ของ DUT และ pad แปลงเป็น  $y$  ด้วยสมการที่ 4.13 ซึ่งเป็นการคำนวณสำหรับการวัดแบบ 1 พอร์ตจากนั้นนำค่า  $y_{\text{DUT}}$  ลบด้วยค่า  $y_{\text{pad}}$  และแปลงกลับให้อยู่ในรูปของ  $S$  ด้วยสมการที่ 4.14 นำค่า  $S_{11}$  ที่ได้ แปลงเป็น  $z$  ด้วยสมการที่ 4.15 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนจริงและส่วนจินตภาพ สามารถแยกเป็นตัวเหนี่ยวนำอนุกรม และตัวต้านทานอนุกรม ดังสมการที่ 4.17 และ 4.18 จะได้ค่าความเหนี่ยวนำดังรูปที่ 4.8

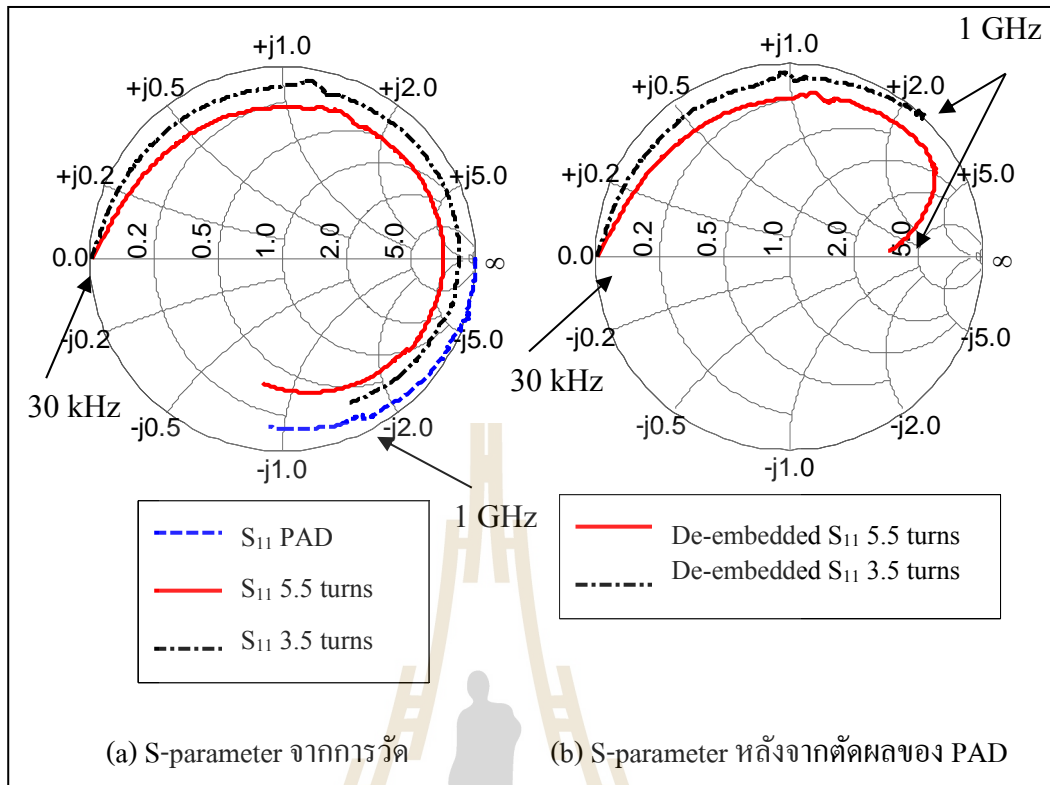


รูปที่ 4.6 แบบจำลอง 1 พอร์ตสำหรับตัวเหนี่ยวนำจุลภาคความถี่ระดับ MHz

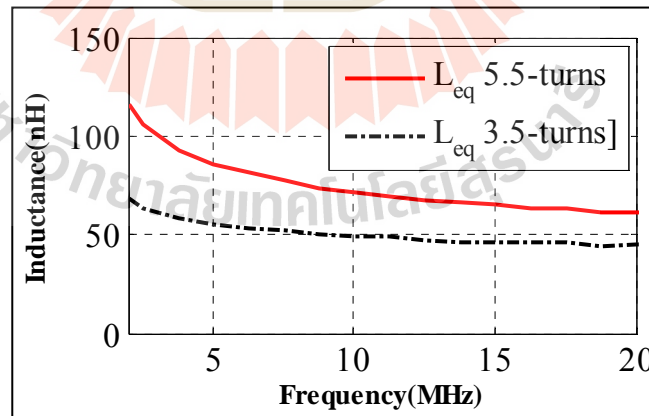


รูปที่ 4.7 ตัวเหนี่ยวนำจุลภาคกำลังบน PAD เชื่อมต่อกับ N-type connector





รูปที่ 4.8  $S_{11}$  parameter ของตัวเหนี่ยวนำชนิด 3.5 และ 5.5 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 1GHz.

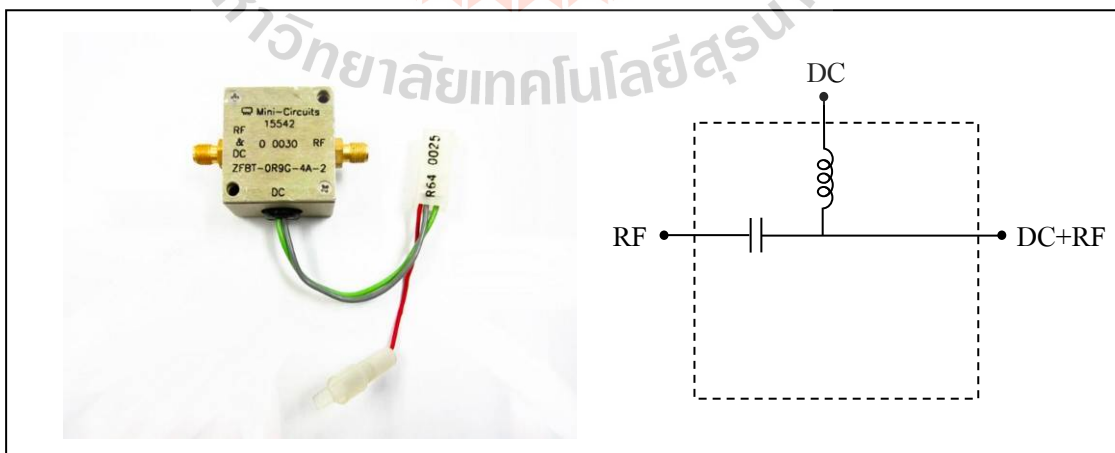


รูปที่ 4.9 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ ของตัวเหนี่ยวนำชนิด 3 รอบ และ 5 รอบ ที่วัดด้วย VNA

#### 4.2.2 การทดสอบการอิมิตัวของแกนตัวเหนี่ยวนำ ด้วย bias-tee ร่วมกับ VNA

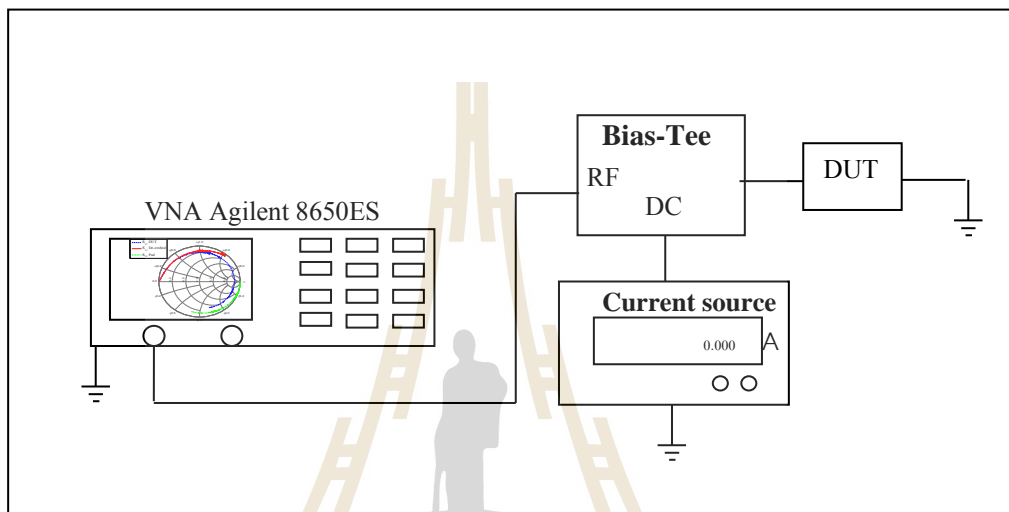
ในการทดสอบการอิมิตัวของแกนตัวเหนี่ยวนำ สามารถทดสอบได้หลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การทดสอบโดยการป้อนกระแสตรงที่ตัวเหนี่ยวนำที่ค่าต่าง ๆ พร้อมกับใช้เครื่องมือ VNA (Vector Network Analyzer) วัดค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  ไปพร้อมกัน ซึ่งการทดสอบด้วยวิธีนี้มีข้อดี คือ สามารถวัด และบันทึก  $S_{11}$  ได้ทุกค่าความถี่พร้อม ๆ กัน ที่ค่ากระแสใด ๆ ยกตัวอย่าง เช่น เมื่อต้องการวัดการอิมิตัวที่กระแส 10 ค่า จะดำเนินการวัดเพียง 10 ครั้ง แต่ที่แต่ละกระแสจะได้ค่า  $S_{11}$  ที่ทุกช่วงความถี่พร้อมกัน ซึ่งการวัดด้วยวิธีการดังกล่าว จำเป็นต้องมีการรวมสัญญาณความถี่สูง เข้ากับสัญญาณกระแสตรง ซึ่งหากนำมาต่อเข้าด้วยกันตรง ๆ จะทำให้เครื่อง VNA เสียหาย หรือมีการสูญเสียสัญญาณ เข้าไปที่แหล่งจ่ายกระแสตรง ทำให้การวัดผลผิดพลาด ดังนั้น ในการวัด จำเป็นต้องมีเครื่องมือเพิ่มเติม คืออุปกรณ์รวมสัญญาณ และป้องกันคลื่นความถี่สูงจาก VNA เข้าแหล่งจ่ายกระแสตรง อุปกรณ์นี้เรียกว่า Bias-Tee

โครงสร้างภายในของ Bias-Tee ประกอบไปด้วยอุปกรณ์แพสซีฟ คือ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ โดย ตัวเก็บประจุ ทำหน้าที่กั้นแรงดันกระแสตรง ไม่ให้ผ่านเข้าเครื่อง VNA ส่วนตัวเหนี่ยวนำมีหน้าที่ป้องกันความถี่สูงเข้าสู่แหล่งจ่ายกระแสตรง รูปที่ 4.10 แสดงภาพของ Bias-Tee และแบบจำลองวงจรอย่างง่าย จากรูปจะเห็นว่า ช่องต่อ RF จะต่อเข้ากับเครื่อง VNA ช่องต่อ DC จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสตรง และช่องต่อ DC-RF จะต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ รูปที่ 4.11 แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับ VNA และรูปของวงจรทั้งหมด ซึ่งอุปกรณ์ Bias-Tee ที่ใช้ทดสอบ เป็น รุ่น Mini-Circuits ZFBT-0R9G-4A-2 นำกระแสได้ 4 แอมแปร์ และสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ในช่วง 2 MHz ถึง 2GHz



รูปที่ 4.10 Bias-Tee และวงจรสมมูลอย่างง่าย

ในการทดสอบไบอัสตัวเหนี่ยวนำ ได้ออกแบบชุดไบอัสกระแสแบบใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงาน เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย AC รูปที่ 4.12 แสดงแหล่งจ่ายกระแสตรงที่ได้ออกแบบสร้างสำหรับจ่ายกระแสให้กับ Bias-Tee จะเห็นว่า หน้าจอจะแสดงค่ากระแสไบอัส และค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่ใช้อ่านกระแส เพื่อป้องกันแรงดันที่ป้อนเข้าสู่ชุดแปลงแอนาล็อกเป็นดิจิทัลสูงกว่า 5 โวลต์

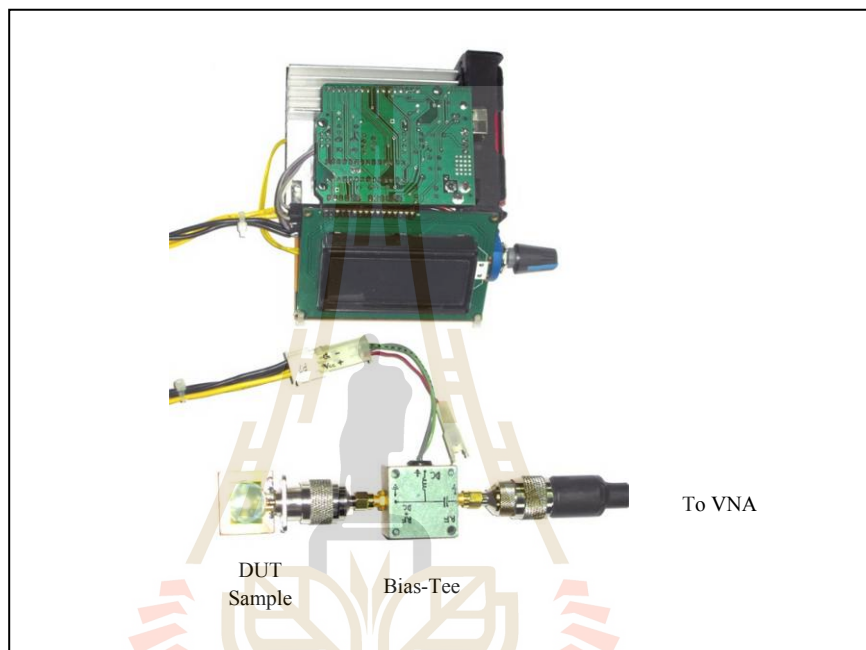


รูปที่ 4.11 การเชื่อมต่อชุดทดสอบการอิมิตตัวของแกนตัวเหนี่ยวนำเข้ากับ VNA



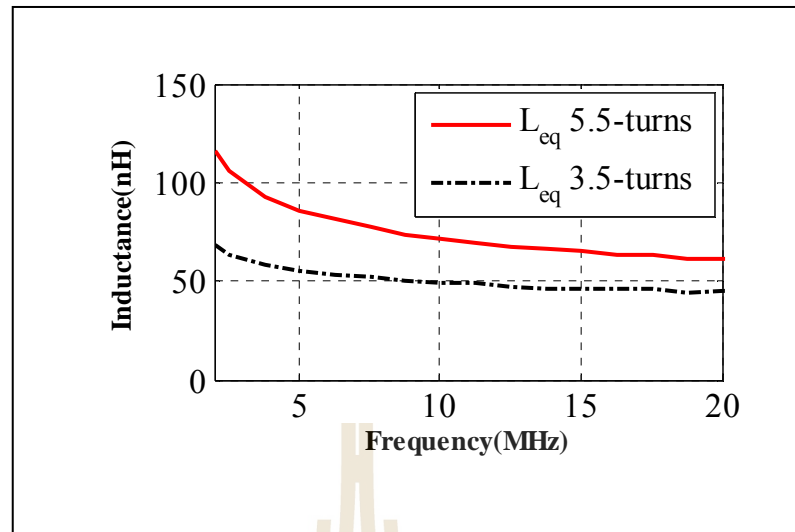
รูปที่ 4.12 ชุดแหล่งจ่ายกระแสสำหรับ Bias-Tee

วิธีการวัดผลในขั้นตอนนี้ ใช้วิธีการเดียวกับการวัดคุณสมบัติความเหนียวนำ และความต้านทาน โดยดำเนินการวัดที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 2 GHz และตัดผลของ PAD ออกด้วยวิธีการทางเมตริกซ์ ซึ่งในขั้นตอนการปรับเทียบ ต้องใส่ชุด Bias-Tee เข้าไปด้วย เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์ที่ใส่เพิ่มเข้าไป รูปที่ 4.13 แสดงการเชื่อมต่อชิ้นงานจริงเข้ากับชุดทดสอบการอิมิตัวของแกนตัวเหนียวนำ

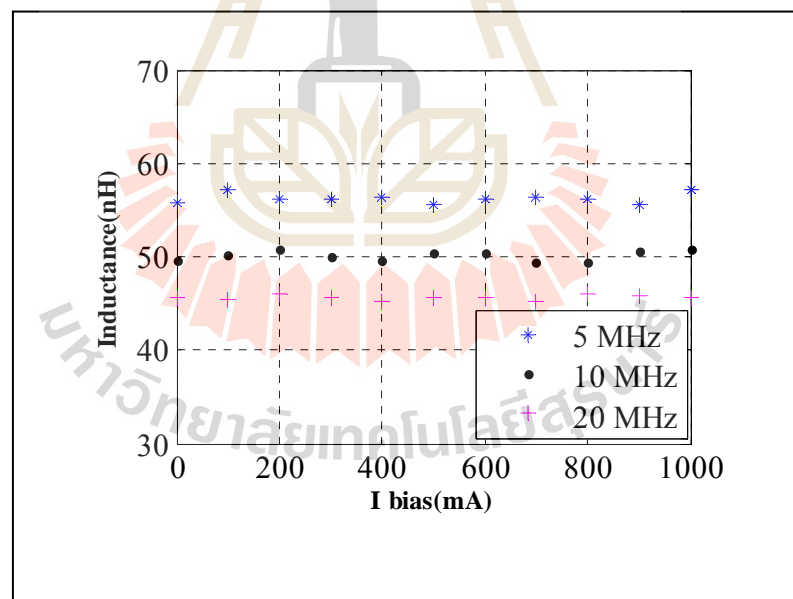


รูปที่ 4.13 ชุดทดสอบการอิมิตัวของแกนตัวเหนียวนำ

จากผลการวัดในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า เมื่อป้อนค่ากระแสในช่วง 0 ถึง 1 A ค่าความเหนียวนำมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก พบว่าเส้นกราฟทับกันสนิท เมื่อเทียบระหว่างการไม่ป้อนกระแส และการป้อนกระแส 1 A ซึ่งในงานวิจัยนี้ ต้องการนำตัวเหนียวนำไปใช้ในช่วงความถี่ไม่เกิน 20 MHz จึงต้องการผลการทดสอบที่ 5 MHz 10 MHz และ 20 MHz ซึ่งสามารถนำมาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 4.15 โดยจะเห็นได้ว่า ที่ค่ากระแสต่าง ๆ ค่าความเหนียวนำมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ประมาณ 0.05% จึงสรุปได้ว่าตัวเหนียวนำยังไม่เกิดการอิมิตัว



รูปที่ 4.14 แสดงค่าความเหนี่ยวนำเมื่อป้อนกระแสขนาด 0 mA และ 1000mA ของตัวเหนี่ยวนำชนิด 3 รอบ และ 5 รอบ

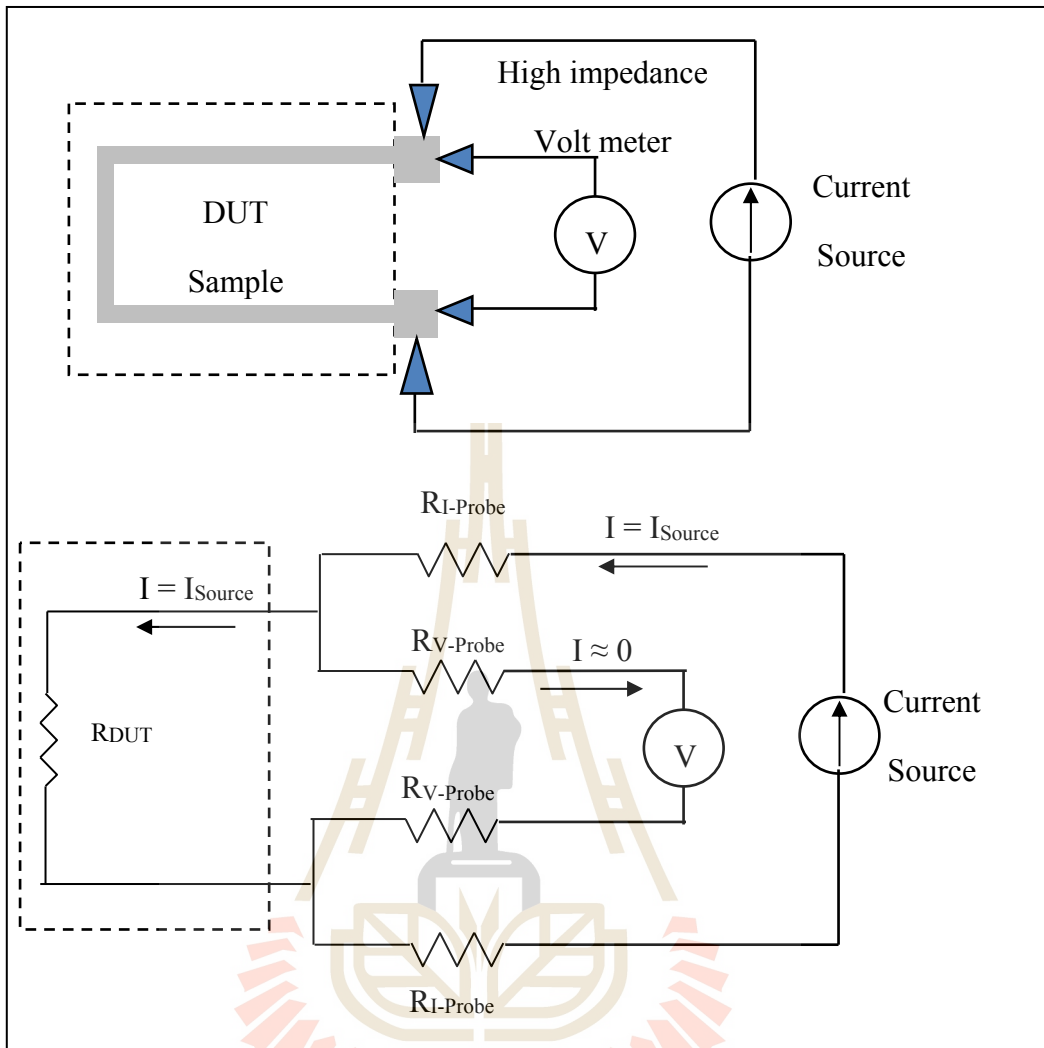


รูปที่ 4.15 แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่ 5 10 และ 20 MHz ของตัวเหนี่ยวนำชนิด 3.5 รอบ

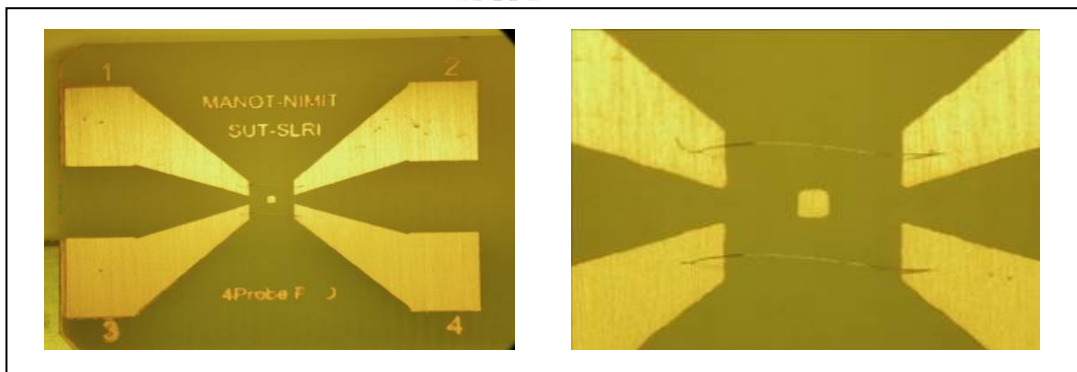
#### 4.2.3 การวัดค่าความต้านทานแบบสี่จุด (4-Probe measurement)

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรกระแสตรง พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญตัวหนึ่ง ได้แก่ ค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง ( $R_{DC}$ ) เนื่องจากกระแสส่วนใหญ่ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำคือ กระแสตรง ประสิทธิภาพส่วนใหญ่ของตัวเหนี่ยวนำจึงขึ้นกับตัวต้านทานกระแสตรงเป็นหลัก ซึ่งในการวัด ไม่สามารถวัดได้ด้วยวิธีการวัดแบบสองจุด หรือ โอห์มมิเตอร์ได้ เนื่องจากค่าความต้านทานมีค่าอยู่ในช่วงมิลลิโอห์ม ผลของค่าความต้านทานจุดสัมผัส (contact resistance) และสาย จะมีผลต่อการวัดอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการวัดแบบสี่จุด ซึ่งการวัดแบบสี่จุดจะช่วยลดความคลาดเคลื่อน อันเนื่องมาจากจุดสัมผัสของหัววัด การวัดด้วยวิธีนี้ มีหลักการวัด ใช้การจ่ายกระแสผ่านขั้วจ่ายกระแสให้ไหลผ่านชิ้นงานที่ต้องการวัด จากนั้น นำหัววัดอีกคู่ต่อขนานเข้าไปเพื่อวัดแรงดันตกคร่อม ดังรูปที่ 4.16 จะเห็นว่า เมื่อใช้เครื่องมือวัดแรงดันแบบความต้านทานสูง กระแสที่ไหลเข้าเครื่องมือวัดจึงเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้น แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อของจุดสัมผัสหัววัดแรงดัน จึงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ค่าความต้านทานของหัววัดส่วนนี้จึงไม่มีผลต่อการวัด จากนั้นเมื่อพิจารณาขั้วจ่ายกระแส จะเห็นว่าถึงแม้ค่าความต้านทานของรอยต่อจะมีค่าสูง แต่กระแสที่ไหลผ่าน อุปกรณ์ที่ต้องการวัด จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ออกมาจากแหล่งจ่าย ดังนั้นความต้านทานของจุดสัมผัสนี้ จึงไม่มีผลต่อการวัดเช่นเดียวกัน ขึ้นต่อมาเมื่อได้ค่ากระแสและแรงดัน จึงคำนวณค่าความต้านทานที่ได้

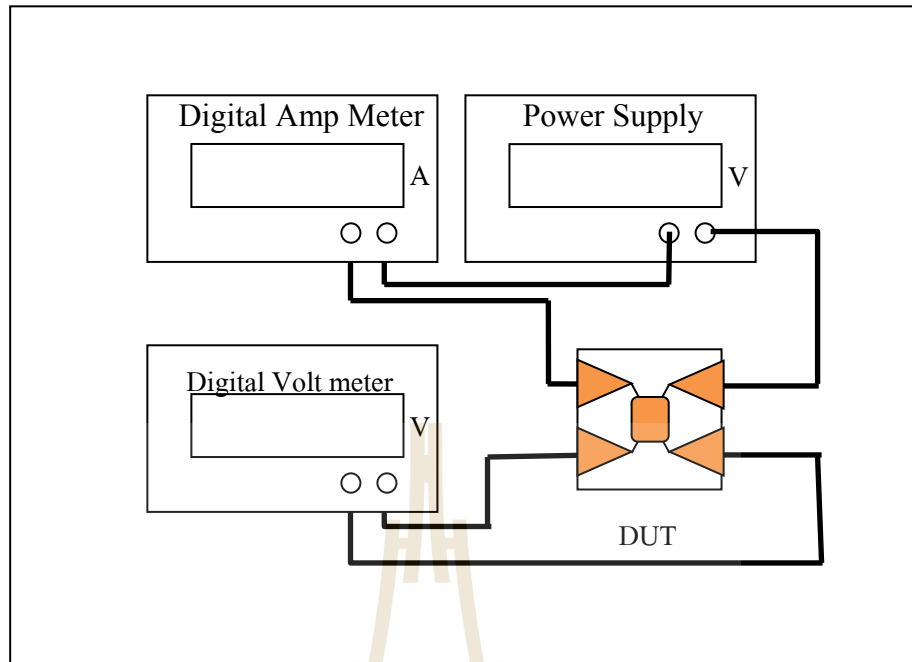
ตัวเหนี่ยวนำจุลภาคกำลังในงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบให้สามารถใช้งานที่กระแสในช่วงไม่เกิน 1 A และการเชื่อมต่อใช้งาน ต้องใช้การเชื่อมต่อด้วยเครื่องเชื่อมต่อสาย ซึ่งเป็นอลูมิเนียมขนาด 20  $\mu\text{m}$  ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบลวดที่ใช้เชื่อมต่อสาย เพื่อหาค่ากระแสสูงสุด ซึ่งได้ทำการทดสอบดังรูปที่ 2.3 จากผลการทดสอบพบว่า เส้นลวดอลูมิเนียม สามารถนำกระแสได้เส้นละ 0.54 A ดังนั้น ในการใช้งานจึงใช้เส้นลวดเพื่อเชื่อมต่อสาย จำนวนสองเส้นเพื่อรองรับกระแส 1 A จากรูปที่ 4.17 ซึ่งจะเห็นว่า PAD หมายเลข 1 และ 2 ใช้ในการ จ่าย กระแส ส่วน 3 และ 4 ใช้วัดแรงดัน เพื่อทดสอบการวัดแบบสี่จุด ซึ่งแผนผังการวัด แสดงได้ดังรูปที่ 4.14 มีรายละเอียด คือ ใช้แหล่งจ่ายป้อนค่ากระแสให้กับตัวเหนี่ยวนำ จากนั้นวัดแรงดันตกคร่อม และนำมาใช้คำนวณ ค่าความต้านทานที่กระแสแต่ละค่า ซึ่งวิธีการวัดแบบสี่จุดเหมาะสำหรับการวัดค่าความต้านทานแบบที่มีค่าน้อย ๆ เนื่องจากสามารถกำจัดค่าความต้านทานของหัววัด และเส้นลวด เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานที่แท้จริงของอุปกรณ์ที่ต้องการวัด และในรูปที่ 4.19 ถึง 4.20 แสดงค่าความต้านทานกระแสตรงที่วัดได้ของตัวเหนี่ยวนำชนิด 3.5 รอบ และ 5.5 รอบ ตามลำดับ จะเห็นว่ามีความคงที่ทุกช่วงกระแสการวัด



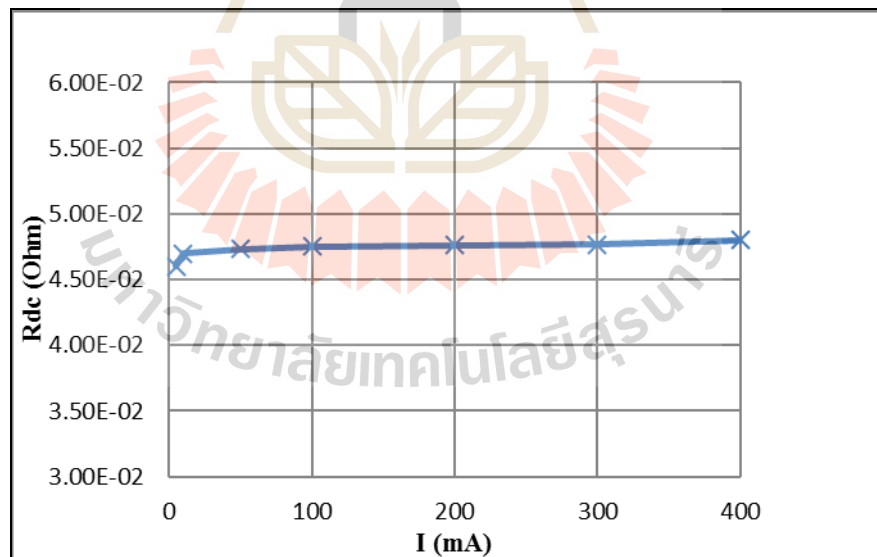
รูปที่ 4.16 วงจรการวัดค่าความต้านทานแบบสี่จุด



รูปที่ 4.17 การทดสอบความสามารถในการนำกระแสของลวดอลูมิเนียม

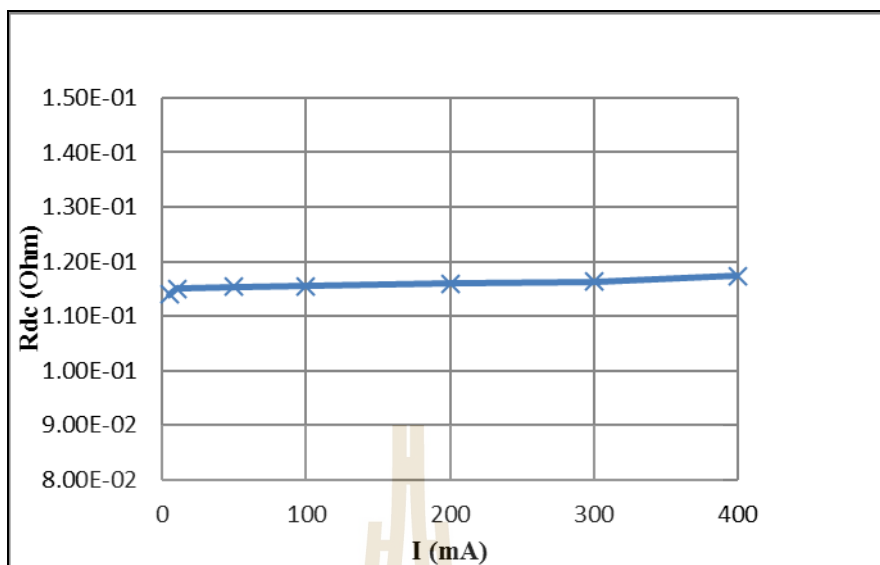


รูปที่ 4.18 แผนผังเครื่องมือสำหรับการทดสอบค่าความต้านทานกระแสตรงโดยวิธีการวัดแบบสี่จุด



รูปที่ 4.19 ค่าความต้านทานกระแสตรงของตัวเหนี่ยวนำจูลภาคชนิด 3.5 รอบ





รูปที่ 4.20 ค่าความต้านทานกระแสตรงของตัวเหนี่ยวนำจูลภาคชนิด 5.5 รอบ

#### 4.2.4 การวัดค่า Hysteresis loop เพื่อหาค่า Permeability ของวัสดุ NiFe

การวัดค่า permeability ของวัสดุแม่เหล็ก มีวิธีการวัดสามวิธี คือ การวัดด้วยเครื่อง VSM (Vibrating Sample Magnetometer) การวัดด้วยวิธีการวัดเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านแกนด้วย Hall probe (Jiles, 1991) และวิธีที่สามคือ การวัดโดยวัดกระแส และแรงดัน คือ V-I method (Caltun *et al.*, 1998) ซึ่งแต่ละวิธีการมีหลักการทํางาน และข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป คือ การวัดด้วย VSM เป็นการวัดคุณสมบัติทางวัสดุในรูปฟังก์ชันของสนามแม่เหล็ก ใช้หลักการคือ วางวัสดุไว้ในสนามแม่เหล็กที่มีรูปแบบแน่นอน (uniform magnetic field : H) :ซึ่งจะทำให้เกิด magnetic moment ขึ้นในวัสดุ และวัสดุจะถูกวางไว้ใกล้ขดลวดตรวจรู้สนามแม่เหล็ก (magnetic sensing coil) จากนั้นวัสดุจะถูกสั่นทางกลให้มีการเคลื่อนที่แบบสัญญาณไซน์ ทำให้สนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลง และ magnetic sensing coil จะตรวจจับและบันทึกผล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กนี้ จะสัมพันธ์ กับ magnetic moment ในวัสดุ สามารถนำไปวาดกราฟเส้นโค้ง B-H และนำไปคำนวณ ค่า permeability ได้ การวัดด้วยวิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถใช้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่เป็นผง ของแข็ง ของเหลว ผลึก และฟิล์มบางได้โดยตรง ส่วนข้อเสียของการวัดด้วยวิธีการนี้คือ สามารถวัดได้เฉพาะค่า permeability ที่ใกล้ความถี่ DC เท่านั้น ดังนั้น จึงไม่สามารถใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ความถี่สูงได้

วิธีการวัดอีกสองวิธีเป็นการวัดโดยวิธีการทางไฟฟ้า-แม่เหล็ก ใช้การพันขดลวดบนวัสดุที่ต้องการวัด และจ่ายแรงดันกระแสสลับ ซึ่งวิธีการใช้ Hall probe จะใช้หัววัดแทรกเข้าไป

ในวงจรแม่เหล็ก และบันทึกเส้นแรงแม่เหล็กที่วัดได้ ซึ่งวิธีการนี้ มีข้อเสียคือ ต้องมีการตัดแกนให้ เกิดช่องว่างเพื่อใส่หัววัด วิธีการนี้จึงไม่เหมาะกับการวัดแกนที่มีขนาดเล็ก ส่วนวิธีการสุดท้าย คือ การวัดโดยวิธีวัดกระแส และแรงดัน วิธีการนี้ มีข้อดีคือ สามารถวัด BH-curve ได้หลายความถี่ตาม ต้องการ จึงสามารถใช้วิเคราะห์แกนของวัสดุที่มีค่า permeability เปลี่ยนไปตามความถี่ได้ ส่วน ข้อเสียของการวัดด้วยวิธีการนี้คือ ต้องมีการพันขดลวดไปบนแกน ดังนั้นแกนที่วัดต้องเป็นวงจร แม่เหล็กที่ครบวงจรไม่มี Gap วิธีการนี้จึงเหมาะกับการวัดวัสดุที่สามารถขึ้นรูปได้ และมีขนาดใหญ่ พอที่จะพันขดลวดได้

ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้การวัดกระแส และแรงดัน เนื่องจาก สามารถวัดได้หลาย ความถี่ และสามารถวัดโดยใช้เครื่องมือพื้นฐาน คือ oscilloscope ซึ่งหลักการวัด คือ ใช้การป้อน แรงดันที่ความถี่ที่ต้องการวัด เข้าไปที่ขดลวด ซึ่งพันบนแกนของวัสดุ โดยต้องไม่มีการต่อโหลด ทางด้านทุติยภูมิ เพื่อให้กระแสที่ไหลเป็นกระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing current) (Caltun, 1998) จากนั้นนำ oscilloscope จับสัญญาณของแรงดันด้านทุติยภูมิ และแรงดันตกคร่อมตัว ด้านทานอนุกรมด้านปฐมภูมิเพื่อใช้คำนวณกระแส จากนั้นบันทึกค่าแรงดันที่อ่านได้ทั้งสองค่า เพื่อ นำมาคำนวณค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (Magnetic flux density : B (Wb/m<sup>2</sup>)) และค่าความ เข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity, Magnetizing force : H (At/m)) ซึ่งจากกฎของ ฟารา เดย์ (Faraday's law) จะได้แรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวดด้านทุติยภูมิดังสมการที่ 4.27 จากนั้น ทำการ อินทิเกรตแรงดันจะได้ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตามสมการที่ 4.31

สำหรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H คือ อัตราส่วนระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force : mmf (A-t)) ต่อความยาวของวงจรแม่เหล็ก (Magnetic path length) ดังสมการที่ 4.33 แต่เนื่องจากในชุดทดสอบ ได้ทำการวัดแรงดันตกคร่อมตัวด้านทาน ซึ่งค่าที่ ต้องการ คือ ค่ากระแส ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณ คือ สมการที่ 4.34 เมื่อได้ค่า B และ H แล้วจึง นำไปวาดกราฟเพื่อคำนวณค่า permeability ของวัสดุ ซึ่งแผนผังวงจรการวัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.21

$$V_s(t) = N_p \frac{d\phi(t)}{dt}; \phi = BA_c \quad (4.27)$$

$$V_s(t) = N_p \frac{dB(t)A_c}{dt} \quad (4.28)$$

$$\frac{1}{N_p A_c} V_s(t) = \frac{dB(t)}{dt} \quad (4.29)$$

$$\frac{1}{N_p A_c} \int V_s(t) dt = \int \frac{dB(t)}{dt} dt \quad (4.30)$$

$$\therefore B(t) = \frac{1}{N_p A} \int V_s(t) dt \quad (4.31)$$

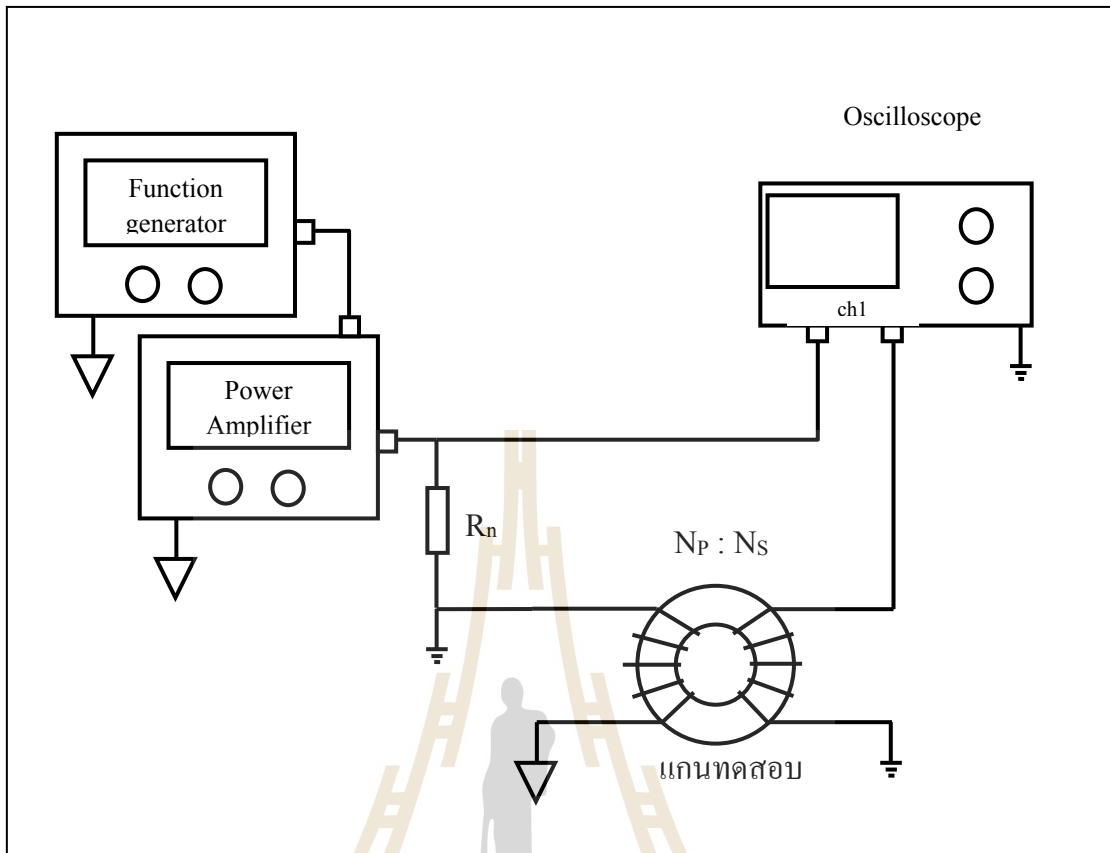
$$H = \frac{F_m(t)}{l} \quad (4.32)$$

$$H = \frac{N_s I_p(t)}{l} \quad (4.33)$$

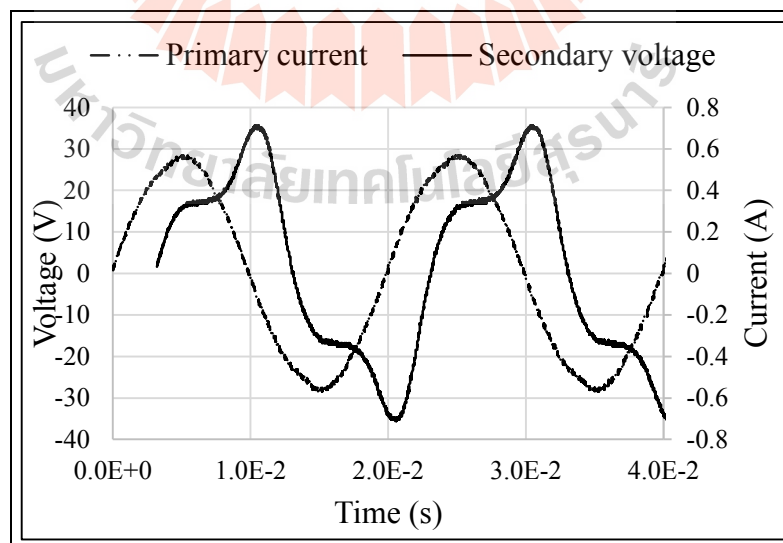
$$\therefore H = \frac{N_s V_{Rn}(t)}{I R_n} \quad (4.34)$$

- เมื่อ  $V_s(t)$  คือ แรงดันด้านทุติยภูมิ (V)  
 $N_p$  คือ จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ (รอบ)  
 $N_s$  คือ จำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ (รอบ)  
 $\phi(t)$  คือ เส้นแรงแม่เหล็ก (Wb)  
 $B(t)$  คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (Tesla, Wb/m<sup>2</sup>)  
 $A_c$  คือ ขนาดของแกน (m<sup>2</sup>)  
 $H(t)$  คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A-t/m)  
 $F_m(t)$  คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (A-t)  
 $I_p(t)$  คือ กระแสด้านทุติยภูมิ (A)  
 $l_m$  คือ ความยาวของวงจรแม่เหล็ก (m)  
 $R_n$  คือ ความต้านทานอนุกรม (m)

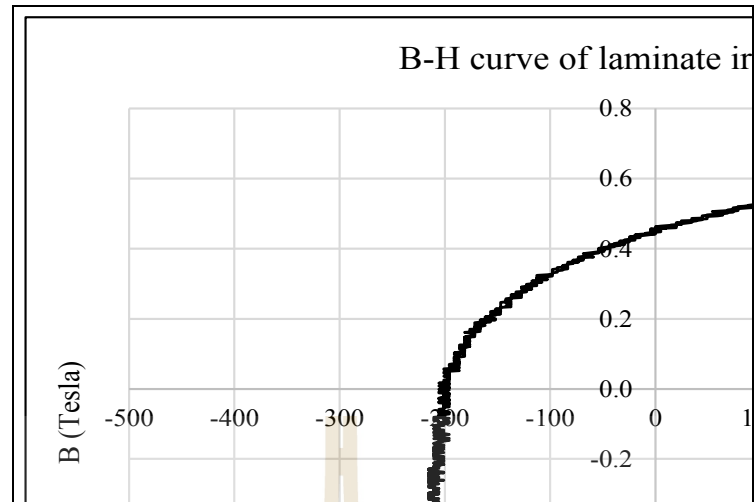
ในการทดสอบในขั้นต้น ได้ทำการทดสอบวัดหม้อแปลงแกนเหล็กเชิงพาณิชย์ และแกน หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ ดังรูปที่ 4.22 ถึง 4.25 จะเห็นว่าแกนเหล็กมี BH curve กว้าง มีค่า  $B_{max}$  ประมาณ 0.6 T ส่วนแกนชนิด ferrite มีค่า  $B_{max}$  ประมาณ 0.4 ซึ่งตรงตามคุณสมบัติของแกนเหล็ก และแกน เฟอร์ไรต์ เชิงพาณิชย์ ที่ได้นำมาทดสอบดังกล่าว



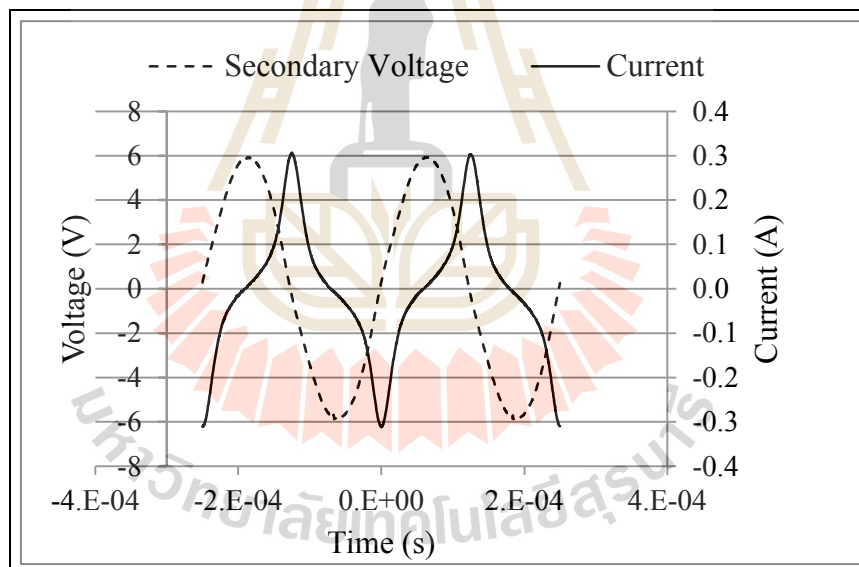
รูปที่ 4.21 แผนผังวงจรสำหรับทดสอบ B-H curve



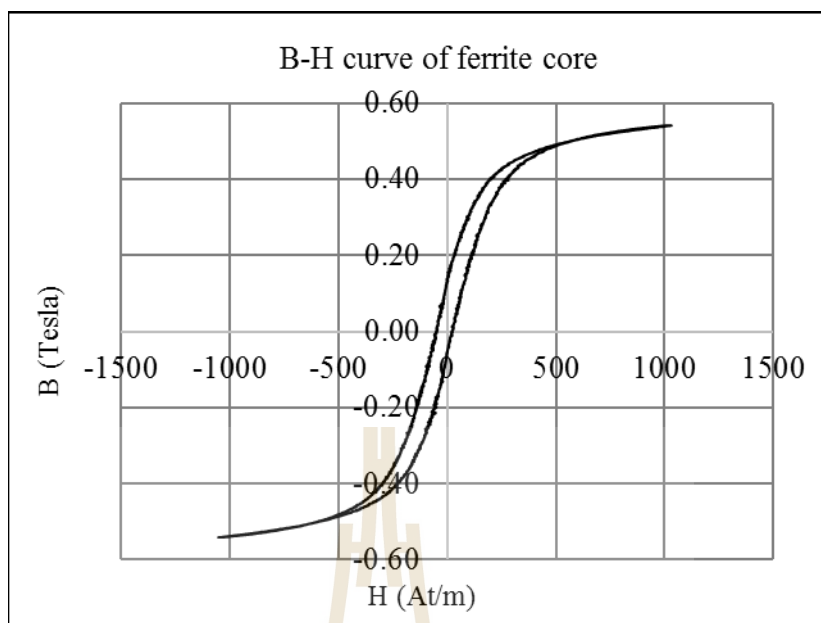
รูปที่ 4.22 กระแส และแรงดันของแกนเหล็กที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 4.23 B-H curve ของตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กเชิงพาณิชย์ที่ความถี่ 50 Hz



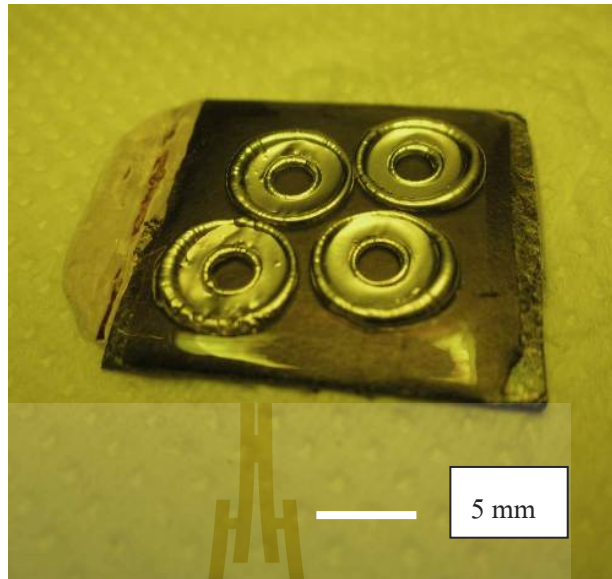
รูปที่ 4.24 กระแส และแรงดันของแกนเฟอร์ไรท์ที่ใช้ทดสอบ



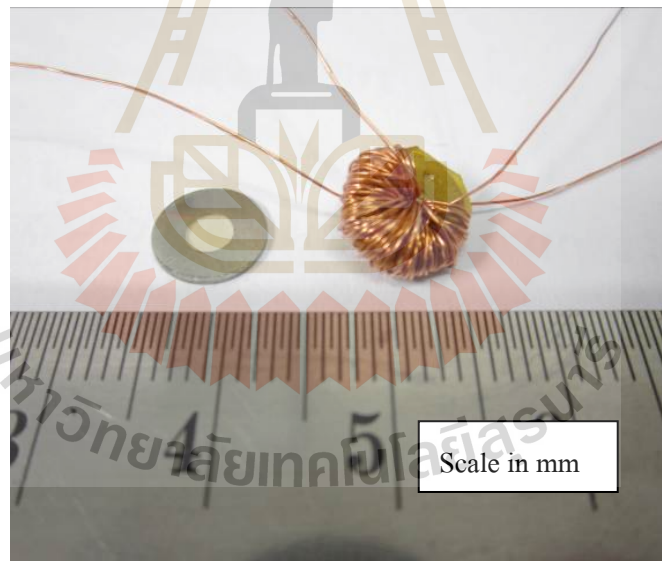
รูปที่ 4.25 B-H curve ของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรท์เชิงพาณิชย์ที่ความถี่ 4 kHz

สำหรับแกน NiFe ในงานวิจัยนี้ ต้องทำการวัดคุณสมบัติของแกนด้วยวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น จึงต้องสร้างวงแหวนขนาดเล็ก เพื่อใช้พันขดลวด ในที่นี้ได้สร้างวงแหวนด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 4.26 (ก) วงแหวนมีความหนา 350  $\mu\text{m}$  ความกว้าง 2.5 mm จะได้พื้นที่หน้าตัดแกน 0.875  $\text{mm}^2$  วงแหวนมีเส้นรอบวงเฉลี่ย 18.85 mm วงแหวนพันเส้นลวดด้านปฐมภูมิ 90 รอบ ด้านทุติยภูมิ 15 รอบ ซึ่งจำนวนรอบนี้เป็นจำนวนรอบมากที่สุดที่พันได้ เนื่องจากแกนมีขนาดเล็ก รูปที่ 4.26 (ข) แสดงแกนที่ใช้ทดสอบหลังพันขดลวดจนเต็ม

ในขั้นตอนต่อไป นำแกนทดสอบ ต่อเข้ากับวงจรขยายกำลัง ซึ่งมีความถี่สูงสุดที่ 20 kHz และกำหนดความถี่ที่ป้อนเข้าด้วยใช้เครื่องกำเนิดคลื่นความถี่ ดังวงจรในรูปที่ 4.21 จากนั้นวัดค่ากระแสและแรงดันจะได้รูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.27 และนำสัญญาณที่ได้ มาคำนวณ จะได้ B-H curve ของวัสดุ NiFe ดังรูปที่ 4.28 ซึ่งจากรูป จะได้ความชันของเส้น เท่ากับ 0.0005 สามารถนำมาคำนวณเป็นค่า  $\mu_r$  โดยหารด้วย  $\mu_0$  ดังนั้นวัสดุมีค่า permeability เท่ากับ 400 และจากการทดสอบค่าสภาพนำไฟฟ้า ด้วยวิธีการวัดแบบสี่จุด ได้ค่าสภาพนำไฟฟ้าเท่ากับ  $5.66 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$  สามารถสรุปคุณลักษณะสมบัติของวัสดุ ได้ดังตารางที่ 4.1

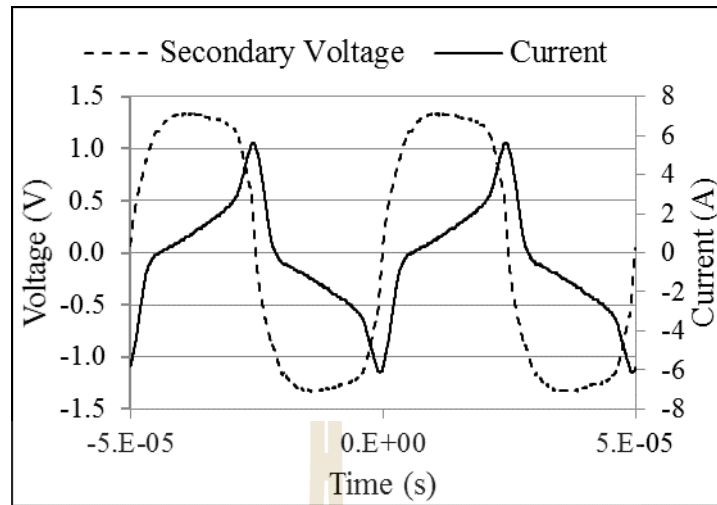


(ก) วงแหวน NiFe ที่สร้างด้วยกระบวนการชุบโลหะลงในแม่พิมพ์

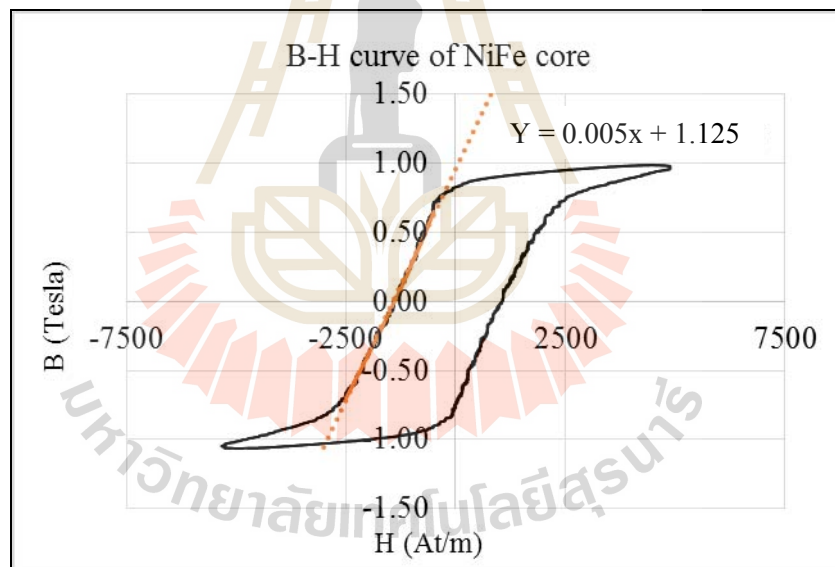


(ข) วงแหวน NiFe พันขดลวด สำหรับใช้ทดสอบ ค่า permeability

รูปที่ 4.26 วงแหวน NiFe สำหรับใช้ทดสอบค่า permeability



รูปที่ 4.27 กระแส และแรงดันของแกน NiFe ที่ใช้ทดสอบ ที่ความถี่ 20 kHz



รูปที่ 4.28 B-H curve ของแกน NiFe ที่ความถี่ 20 kHz

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติสมบัติของวัสดุ NiFe ที่ได้จากการทดสอบ

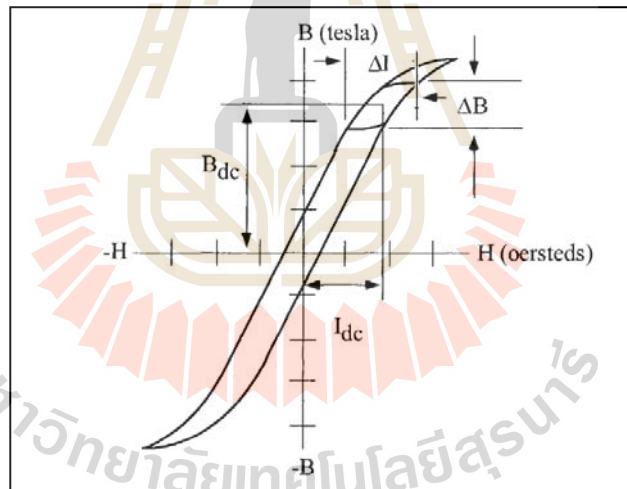
Deposited Current density	5 mA/cm <sup>2</sup>
Relative Permeability	400
Conductivity	5.66x10 <sup>6</sup> (Ωm) <sup>-1</sup>
Saturation Flux density	1 T



#### 4.2.5 การออกแบบโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำกระแสตรง (DC inductor design)

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำกระแสตรง ตัวเหนี่ยวนำจะมีกระแสตรงไหลเป็นส่วนใหญ่ซึ่งทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบ ๆ แต่ในการใช้งานมักจะออกแบบให้อยู่ในช่วงก่อนการอิ่มตัว ดังรูปที่ 4.29 เมื่อพิจารณา BH-curve จะเห็นว่า  $\Delta B$  มีค่าอยู่ในช่วงแคบ ๆ จะได้ค่าสูงสุดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B_{pk}$  ดังสมการที่ 4.35 และเมื่อพิจารณาส่วนกระแสตรง และกระแสสลับ จะได้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังสมการที่ 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ

ค่าความเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4.39 ในสมการมีค่าของช่องอากาศ ( $l_g$ ) ซึ่งจะช่วยให้อัตราส่วนความยาวของเส้นทางเดินแม่เหล็ก (MPL) ต่อค่าความซึมซาบได้ของวัสดุ ( $\mu_m$ ) มีค่าน้อยมาก เนื่องจากค่า  $\mu_m$  ของวัสดุมีค่าในช่วง 40 ถึง 25000 ส่วนค่า MPL มีค่าอยู่ในหน่วยไมโครเมตรเท่านั้น ดังนั้นสมการจึงสามารถรูปได้เป็นสมการที่ 4.40



รูปที่ 4.29 ความหนาแน่นฟลักซ์ที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับของตัวเหนี่ยวนำ

$$B_{pk} = B_{dc} + \frac{B_{ac}}{2}, \text{ (tesla)} \quad (4.35)$$

$$B_{dc} = \frac{0.4\pi NI_{dc} 10^{-4}}{l_g + \left(\frac{MPL}{\mu_m}\right)}, \text{ (tesla)} \quad (4.36)$$

$$B_{ac} = \frac{0.4\pi N \left(\frac{\Delta I}{2}\right) 10^{-4}}{l_g + \left(\frac{MPL}{\mu_m}\right)}, \text{ (tesla)} \quad (4.37)$$

$$B_{pk} = \frac{0.4\pi N \left(I_{dc} + \frac{\Delta I}{2}\right) 10^{-4}}{l_g + \left(\frac{MPL}{\mu_m}\right)}, \text{ (tesla)} \quad (4.38)$$

$$L = \frac{0.4\pi N^2 A_c 10^{-8}}{l_g + \left(\frac{MPL}{\mu_m}\right)}, \text{ (tesla)} \quad (4.39)$$

$$L = \frac{0.4\pi N^2 A_c 10^{-8}}{l_g}, \text{ Henrys} \quad (4.40)$$

เมื่อ	$B_{pk}$	คือ ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด (Tesla)
	$B_{dc}$	คือความหนาแน่นฟลักซ์จากไฟฟ้ากระแสตรง (Tesla)
	$B_{ac}$	คือความหนาแน่นฟลักซ์จากไฟฟ้ากระแสสลับ (Tesla)
	$N$	คือจำนวนรอบ (รอบ)
	$I_{dc}$	คือกระแสของไฟฟ้ากระแสตรง (A)
	$\Delta I$	คือกระแสของไฟฟ้ากระแสสลับ (A)
	$MPL$	คือ Magnetic path length (m)
	$\mu_m$	คือ Material permeability
	$A_c$	คือพื้นที่หน้าตัดของแกน (m <sup>2</sup> )
	$l_g$	คือระยะช่องอากาศ (m)

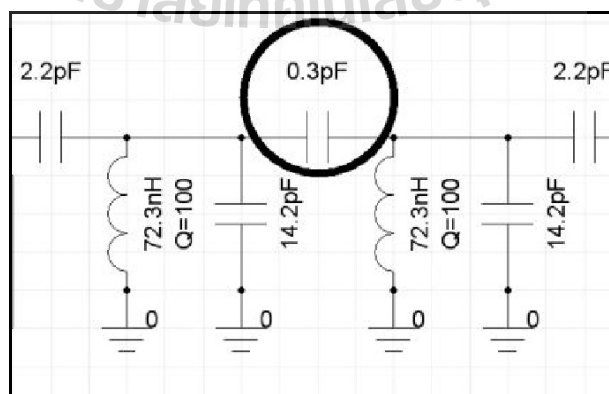
เนื้อหาในบทที่ 4 นี้ เป็นการรวบรวม ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณ รวมไปถึงวิธีการ วัตถุประสงค์ของตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ โดยจะนำวิธีการไปใช้ในการทดสอบคุณลักษณะสมบัติ ของอุปกรณ์ บทที่ 5 และ บทที่ 6 ส่วนของเนื้อหาในบทต่อไป จะกล่าวถึงตัวเก็บประจุ ตั้งแต่ ปรกติสัณัวรรณกรรม การออกแบบ การสร้าง การวัดผล และสรุปผล

## บทที่ 5

### การพัฒนาชิปตัวเก็บประจุคุณภาพความถี่สูงแบบฝังตัวในแม่พิมพ์ SU-8 โดยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์

#### 5.1 ปรีทศวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ความถี่ที่ใช้ในระบบสื่อสาร มีความถี่สูงในระดับ GHz เช่น โทรศัพท์มือถือ โทรศัพท์ผ่านดาวเทียม ระบบอินเทอร์เน็ต เป็นต้น วงจรของอุปกรณ์เหล่านี้ ถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง แต่ต้องมีประสิทธิภาพสูง และกระบวนการสร้างต้องมีต้นทุนต่ำ ส่วนประกอบของวงจรโดยทั่วไป มีอุปกรณ์แพสซีฟมากกว่า 80% (Frye, 1997) เพื่อให้ส่วนประกอบของวงจรสามารถบรรจุอุปกรณ์ได้หนาแน่นมากยิ่งขึ้น อุปกรณ์แพสซีฟ เหล่านี้ จึงถูกนำไปบรรจุลงบนวงจรรวมโดยตรง เพื่อให้วงจรมีขนาดเล็ก และลดการสูญเสียพลังงานที่ความถี่สูง ส่งผลให้การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตส่วนกรองสัญญาณเหล่านี้ เป็นที่สนใจของนักวิจัย โดยเฉพาะตัวเก็บประจุ ซึ่งในวงจรความถี่วิทยุ (RF) ค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้งาน โดยทั่วไป จะอยู่ในช่วง ในช่วง 0.05 pF ถึง 100 pF (Bahl, 2003) หน้าที่การทำงานของตัวเก็บประจุ ในวงจรความถี่สูง สามารถใช้งานได้หลายประเภท เช่น ใช้เป็นตัวแยกสัญญาณ หรือ decoupling (Goetz, 1996; Chahal, *et al.*, 1998) ใช้กรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการสวิตช์ (Downing, 1993) ใช้เปลี่ยนทางเดินสัญญาณ หรือ bypass (Cen, 1981) เป็นต้น รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจร ความถี่สูง



รูปที่ 5.1 ตัวเก็บประจุ coupling . ในวงจรความถี่สูง

ตัวเก็บประจุที่ใช้ในงานความถี่สูง มีหลายชนิดด้วยกัน แต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียต่างกันไป ปัจจัยหลัก ที่ใช้พิจารณาคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ ได้แก่ ค่าความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ ตัวประกอบคุณภาพ (Quality-factor) ความเป็นเชิงเส้น ค่าความจุแฝงของโครงสร้าง และความซับซ้อนของกระบวนการสร้าง ซึ่งตัวเหนี่ยวนำแต่ละประเภท จะมีข้อดีข้อเสียต่าง ๆ กันดังนี้

#### 5.1.1 ตัวเก็บประจุแบบใช้ออกไซด์ที่ขาคัดของ MOSFET

ตัวเก็บประจุชนิดนี้เป็นชนิดที่ให้ค่าความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่สูงที่สุด ในบางงานวิจัยพบว่ามีความจุสูงถึง  $6 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$  (National Semiconductor, 2001) แต่ความจุที่มากขึ้น จะมีชั้นไดอิเล็กตริกที่บางมาก ในงานวิจัยดังกล่าวมีความหนาเพียง 50 อังสตรอม ส่งผลให้มีแรงดันพังทลาย (breakdown voltage) ต่ำเพียง 2.5 V ข้อเสียอีกประการของตัวเก็บประจุชนิดนี้คือความไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อมีแรงดันเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาในการใช้งานในวงจรได้

#### 5.1.2 ตัวเก็บประจุแบบโลหะ-ฉนวน-โลหะ (MIM)

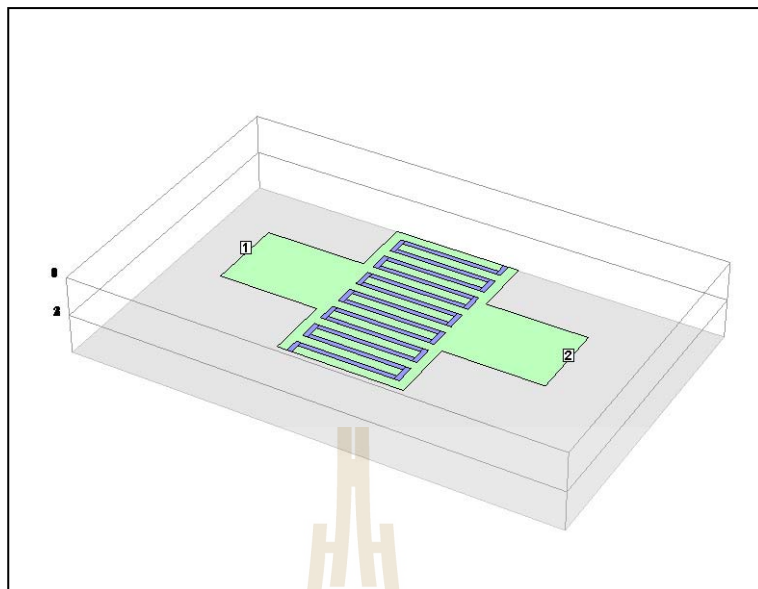
ตัวเก็บประจุชนิดนี้นิยมสร้างบนวงจรรวมชั้นบนสุด เนื่องจากโครงสร้างมีความบาง และการสร้างไว้ชั้นบนสุด ยังช่วยลดค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นตัวนำเทียบกับกราวนด์ ซึ่งสามารถลดได้ประมาณ 2% ตัวเก็บประจุชนิดนี้ มีความเป็นเชิงเส้น และมีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ น้อยมาก (Babcock, *et al*, 2001) และค่าความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่เท่ากับ  $0.8 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$  ตัวเก็บประจุนี้ จึงนิยมสร้างบนวงจรรวม CMOS แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการสร้างตัวเก็บประจุชนิดนี้ค่อนข้างซับซ้อน และมีขนาดค่อนข้างใหญ่

#### 5.1.3 ตัวเก็บประจุแบบ Poly-insulator gate poly

ตัวเก็บประจุชนิดนี้จะมีค่าความจุไฟฟ้าแฝงเทียบกราวนด์ประมาณ 18% ซึ่งต่างจากตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีค่าความจุไฟฟ้าแฝงเทียบกราวนด์ประมาณ 2% ถึง 20% ซึ่งตัวเก็บประจุชนิดนี้ ค่อนข้างมีปัญหาในเรื่องของค่าความต้านทานอนุกรมที่มีค่าสูง

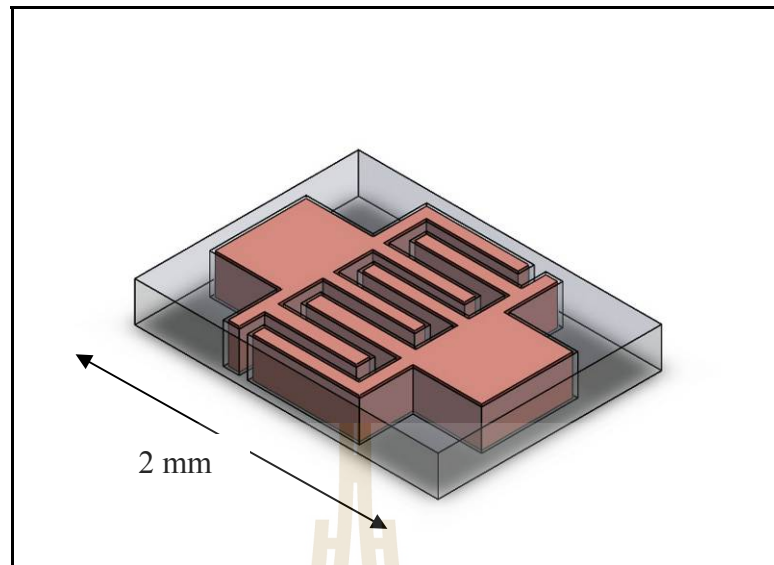
#### 5.1.4 ตัวเก็บประจุแบบ Interdigital electrodes (IDC)

ตัวเก็บประจุชนิดนี้เป็นโครงสร้างที่น่าสนใจ คือ สามารถสร้างได้ง่าย โดยทั่วไป จะสร้างด้วยโครงสร้างแบบแบนราบบนวงจรรวม และเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าด้วยการสร้างแบบหลายชั้น ตัวเหนี่ยวนำชนิดนี้ มีค่าความจุไฟฟ้าแฝงเทียบกับกราวนด์ต่ำ และมีสัญญาณรบกวนต่ำ นอกจากนี้ หากใช้เทคโนโลยีการสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูงจะสามารถเพิ่มความจุไฟฟ้าได้ตามความสูงที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่าง โครงสร้างดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ตัวเก็บประจุแบบ Interdigital electrode แบบแบนราบ

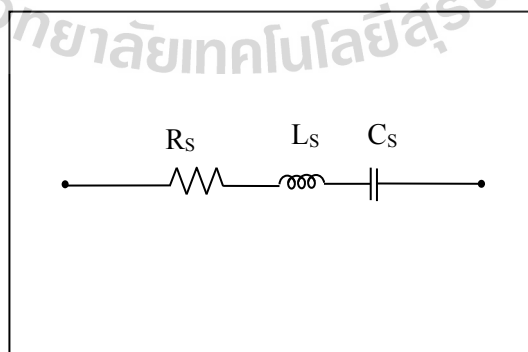
จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติข้างต้น ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกออกแบบสร้างตัวเก็บประจุโดยใช้โครงสร้างแบบ Interdigital electrode เนื่องจากมีค่าความจุไฟฟ้าแฝงต่ำ กระบวนการสร้างได้ง่าย และหากสร้างด้วยกระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ จะสามารถสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูง จึงช่วยเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าให้สูงขึ้น ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกโครงสร้างนี้ ในการพัฒนาเป็นตัวเก็บประจุแบบชิป สำหรับใช้งานในย่านความถี่วิทยุ ด้วยโครงสร้างแบบ Interdigital สร้างด้วยกระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ร่วมกับเทคโนโลยีการสร้างโครงสร้างตัวนำฝังในแม่พิมพ์ที่ได้พัฒนาขึ้น โครงสร้างที่ได้ จะเป็นชิปตัวเก็บประจุ สามารถนำไปบรรจุบนวงจรรวมในภายหลัง และเชื่อมด้วยกระบวนการ กลับชิป (flip-chip) โดยไม่ต้องมีการกำจัดแม่พิมพ์ออก แม่พิมพ์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง และพอลิเมอร์ที่ฝังอยู่ภายใน จะช่วยเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าให้สูงขึ้นประมาณ 3 เท่าของแกนอากาศ และการเชื่อมต่อด้วยวิธีการกลับชิปจะช่วยลดค่าความจุไฟฟ้าแฝงระหว่างโครงสร้างของตัวเก็บประจุ และฐาน ช่วยให้ตัวเก็บประจุมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น ตัวอย่างโครงสร้างตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 5.3 จะเห็นว่า โครงสร้างของอิเล็กโทรดจะฝังอยู่ในแม่พิมพ์พอลิเมอร์ สามารถสร้างขึ้นมาพร้อมกันได้จำนวนมาก (batch fabricated) จากนั้นจึงตัดชิ้นสำหรับเชื่อมต่อด้วยกระบวนการกลับชิป และตัดแยก และในงานที่ต้องการตัวเก็บประจุแบบช่องอากาศ สามารถทำการสกัดสารไวแสงทิ้งในภายหลังได้



รูปที่ 5.3 ตัวเก็บประจุแบบ Interdigital electrode แบบชิป สัดส่วนสูง

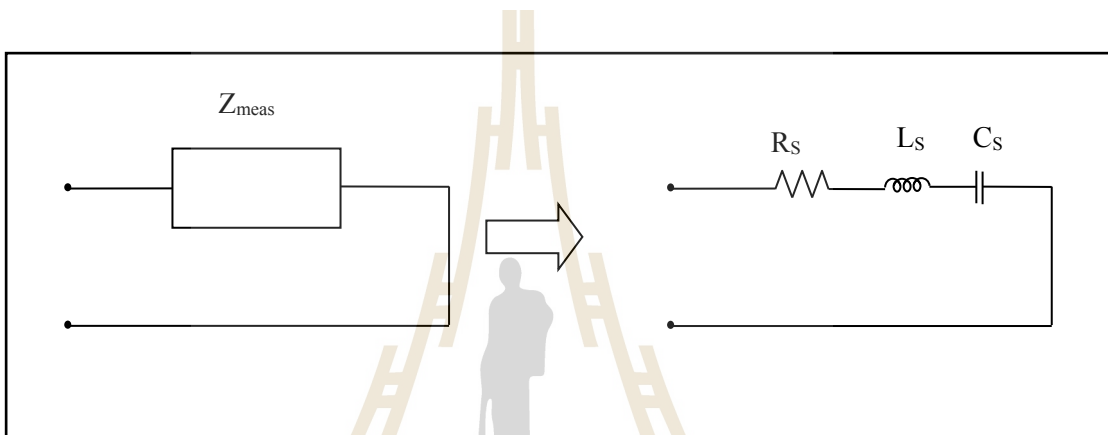
## 5.2 ทฤษฎีและการออกแบบ

ตัวเก็บประจุสำหรับใช้งานในย่านความถี่วิทยุ จะมีค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วง pF ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความจุไฟฟ้าแฝง ที่เกิดจากโครงสร้างของตัวเก็บประจุจะมีผลค่อนข้างมาก โดยทั่วไปในการวิเคราะห์ตัวเก็บประจุ จะแทนด้วยแบบจำลอง LUMP เพื่อสะท้อนคุณสมบัติทางกายภาพ เช่นในรูปที่ 5.4 จะเป็นแบบจำลองอย่างง่าย ประกอบไปด้วย ค่าความจุไฟฟ้าอนุกรม ตัวเหนี่ยวนำอนุกรม และค่าความต้านทานอนุกรม (equivalence series resistance: ESR)



รูปที่ 5.4 Lump model of RF capacitors

ในการวัดผลด้วย VNA เมื่อพิจารณาแบบจำลองแบบ 1 พอร์ต ดังรูปที่ 5.5 ค่าที่ได้จากการวัด จะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ ที่ประกอบไปด้วยส่วนจริง และส่วนจินตภาพ เมื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) วงจรสมมูลจะประกอบไปด้วย อิมพีแดนซ์สามส่วน ที่เป็นส่วนของ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า สามารถแยกออกได้ดังสมการที่ 5.2 เพื่อนำแต่ละส่วนไปคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งต้องใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization) ส่วนประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุ จะสามารถประเมินด้วยตัวประกอบคุณภาพ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง พลังงานงานที่สะสม ต่อพลังงานสูญเสียในแต่ละรอบ ดังสมการที่ 5.5 ถึง 5.6



รูปที่ 5.5 การแปลงแบบจำลอง 1 พอร์ตสำหรับตัวเก็บประจุ เพื่อสะท้อนลักษณะทางกายภาพ

$$Z_s = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (5.1)$$

$$Z_s = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (5.2)$$

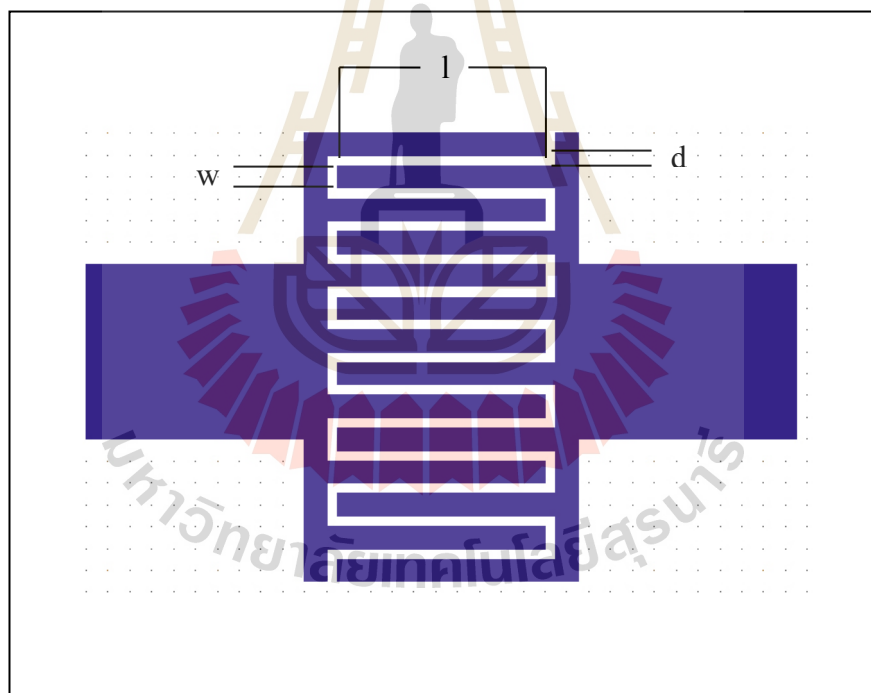
$$\text{Re}(Z_s) = R \quad (5.3)$$

$$\text{Im}(Z_s) = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (5.4)$$

$$Q = \frac{\text{Im}(Z_{in})}{\text{Re}(Z_{in})} \quad (5.5)$$

$$Q = \frac{1}{2\pi f C R_s} \quad (5.6)$$

การออกแบบโครงสร้างของตัวเก็บประจุในงานวิจัยนี้ จะออกแบบโครงสร้างให้มีขนาดไม่เกิน  $4 \text{ mm}^2$  ตามมาตรฐานชิปของวงจรรวม และด้วยข้อจำกัดของกระบวนการสร้างลวดลายในงานวิจัยนี้ จึงสามารถสร้างช่องของไดอิเล็กตริก มีค่าต่ำสุดได้เพียง  $30 \text{ }\mu\text{m}$  โครงสร้างที่ทำการออกแบบมีขนาดตามรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าตัวเก็บประจุ จะมีแขนยื่นออกมาทั้งสองด้าน เพื่อใช้สำหรับเชื่อมต่อเข้ากับวงจรรวม หรือ แผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งจากโครงสร้างนี้ สามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ 5.8 ดังนั้น จากโครงสร้าง สามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้า จากโครงสร้างที่ออกแบบ ได้ดังตารางที่ 5.1 จะเห็นว่า ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.95 ถึง 7.8 สำหรับตัวเก็บประจุชนิดไดอิเล็กตริกอากาศ และ SU-8 ตามลำดับ



รูปที่ 5.6 โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบชีหวี

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (5.7)$$



$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r [(w + l)(2n - 1) + 4dn] \cdot th}{d} \quad (5.8)$$

เมื่อ	$w$	คือ ความกว้างของอิเล็คโทรด
	$l$	คือ ความยาวของอิเล็คโทรด
	$n$	คือ จำนวนรอบ
	$d$	คือ ช่องระหว่างซี่อิเล็คโทรด
	$A$	คือ พื้นที่ระหว่างซี่อิเล็คโทรด
	$th$	คือ ความสูงของอิเล็คโทรด

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ออกแบบสร้าง

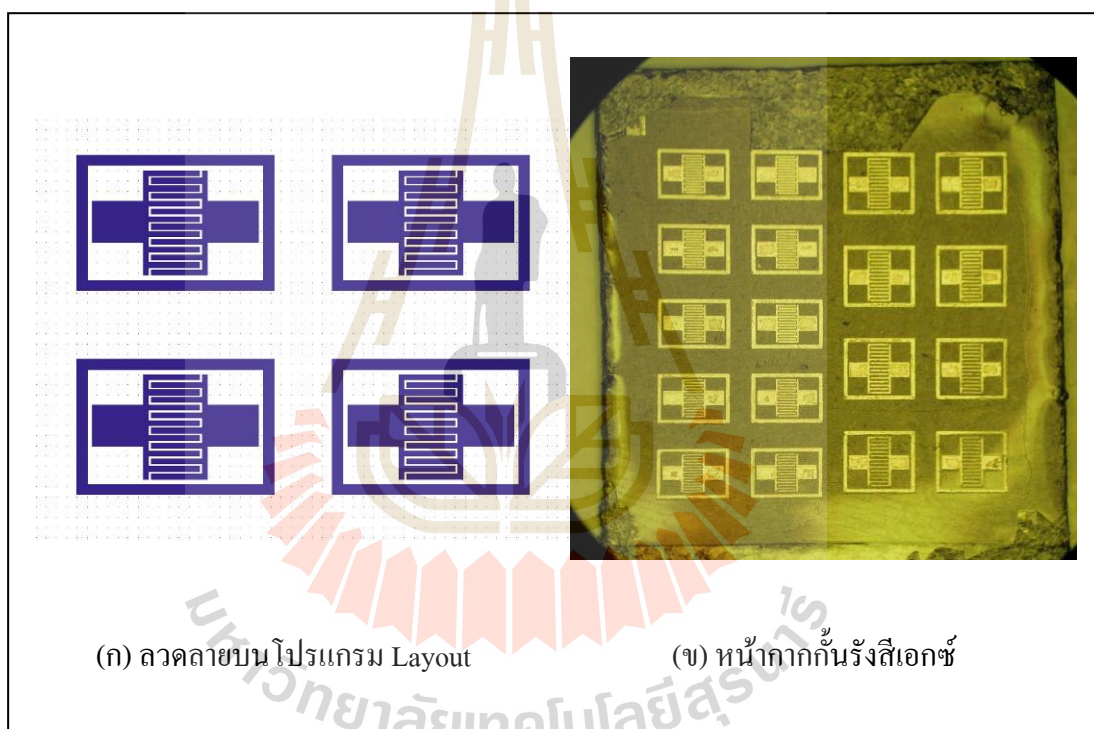
$w$	115 $\mu\text{m}$
$l$	950 $\mu\text{m}$
$n$	7 $\mu\text{m}$
$d$	23 $\mu\text{m}$
$\varepsilon_r$	2 - 4
$C_{\text{AIR}}$	1.95 pF
$C_{\text{SU-8}}$	3.90 pF - 7.8 pF

### 5.3 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวเก็บประจุในงานวิจัยส่วนนี้ ประยุกต์ใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ เพื่อสร้างแผ่นสารไวแสง SU-8 ที่มีขั้วตัวเก็บประจุฝังอยู่ภายใน สามารถนำไปติดลงบนวงจรรวมได้ ตัวเก็บประจุมีโครงสร้างแบบสัดส่วนสูง จึงได้ค่าความเก็บประจุสูงกว่าโครงสร้างอิเล็คโทรดบาง ในกระบวนการสร้างแต่ละครั้ง สามารถสร้างตัวเก็บประจุได้จำนวนมากพร้อมกัน ขั้นตอนการสร้างทั้งหมด มีดังนี้

ในขั้นแรกต้องออกแบบลวดลายด้วยโปรแกรม Layout Editor เพื่อนำไปใช้สร้างฟิล์มทึบแสง ลวดลายที่ออกแบบสร้างได้เล็กที่สุดประมาณ 30  $\mu\text{m}$  ดังรูปที่ 5.7 (ก) จากนั้นนำฟิล์มทึบแสงที่ได้ ผ่านกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต เพื่อสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ โครงสร้างของหน้ากากประกอบไปด้วยฐานแกรไฟต์อ่อน เคลือบด้วยสารไวแสง SU-8 เพื่อเป็นแม่พิมพ์ และใช้โลหะเงิน เป็นวัสดุกั้นรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 5.7 (ข)

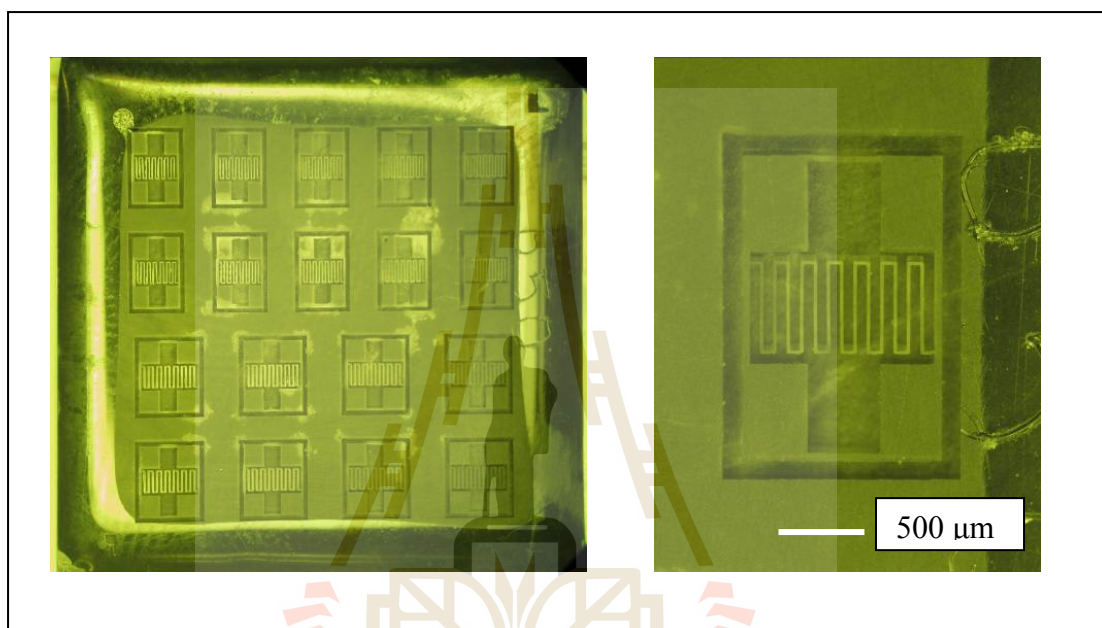
เมื่อได้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์แล้ว ในขั้นตอนต่อไปต้องเตรียมชิ้นงานสารไวแสงหนาเพื่อสร้างเป็นแม่พิมพ์ กระบวนการเริ่มจาก นำฐานแกรไฟต์ เคลือบด้วยสารไวแสงหนา  $400\ \mu\text{m}$  จากนั้นอบที่  $95\ \text{ องศาเซลเซียส}$   $13\ \text{ ชั่วโมง}$  จากนั้นอบรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน  $22\ \text{ J/cm}^2$  ผ่านหน้ากากเงินหนา  $50\ \mu\text{m}$  อบที่  $95\ \text{ องศาเซลเซียส}$   $20\ \text{ นาที}$  ปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อไม่ให้ชิ้นงานโก่งตัวจากความเค้น จากนั้นจึงล้างสารไวแสงออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสงเป็นเวลา  $2\ \text{ ชั่วโมง}$  ล้างต่อด้วย อะซิโตน และน้ำเปล่า เพื่อให้ชิ้นงานสะอาดไม่เป็นคราบของน้ำยาล้างที่ผิวของแกรไฟต์ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ อบที่  $50\ \text{ องศาเซลเซียส}$   $30\ \text{ นาที}$  เพื่อให้ชิ้นงานแห้ง จะได้แม่พิมพ์สารไวแสงหนาดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 ลวดลายที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Layout Editor และหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์

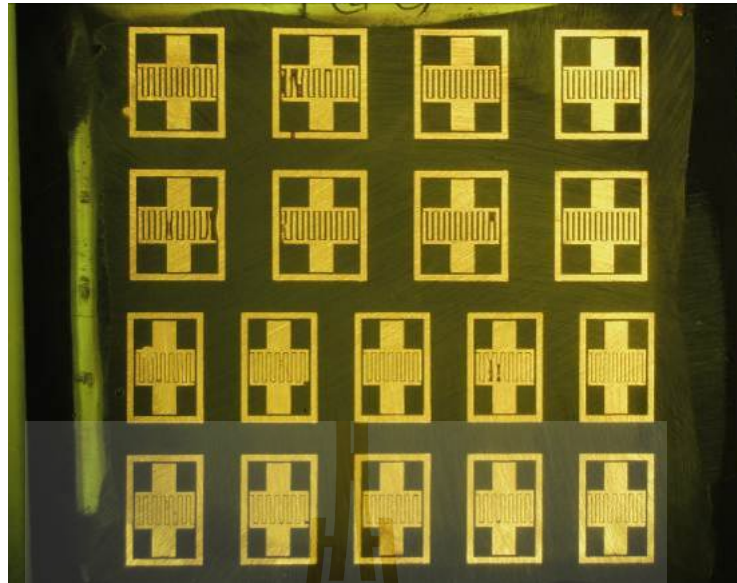
ขั้นตอนต่อไปเป็นการชุบทองแดงลงในแม่พิมพ์ SU-8 ในขั้นแรก นำแม่พิมพ์ติดทับด้วยเทปกาวโดยรอบ เพื่อให้ชิ้นงาน นำไฟฟ้าเฉพาะบริเวณที่จะชุบโลหะลงในแม่พิมพ์ จากนั้นนำแม่พิมพ์ หยอดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์เนื่องจากมีแรงตึงผิวน้อยกว่าน้ำ จะช่วยไม่ให้เกิดฟองอากาศขึ้นในแม่พิมพ์ และนำไปจุ่มน้ำ DI ในขั้นตอนนี้ หากยังมีฟองอากาศอยู่ในแม่พิมพ์ ให้นำชิ้นงานจุ่มในน้ำ แล้วใช้คลื่นอัลตราโซนิกในโหมด degas กำจัดฟองออกไป จากนั้นนำชิ้นงานจุ่มใน

น้ำยาชุบทองแดง และชุบด้วยกระแสเริ่มต้น  $30 \text{ mA/cm}^2$  เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นชุบต่อด้วยกระแส  $10 \text{ mA/cm}^2$  จนล้น ซึ่งทองแดงมีอัตราเกิดอยู่ที่  $0.5 \mu\text{m}$  ต่อนาที หลังจากชุบจนล้น และจัดเรียง จะได้โครงสร้างตัวนำในแม่พิมพ์ SU-8 ดังรูปที่ 5.10 และในขั้นตอนสุดท้าย จึงขัดส่วนฐานของชิ้นงานออก เพื่อให้ได้โครงสร้างตัวนำ ฟังในแม่พิมพ์พอลิเมอร์ SU-8 กระบวนการสร้างทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11

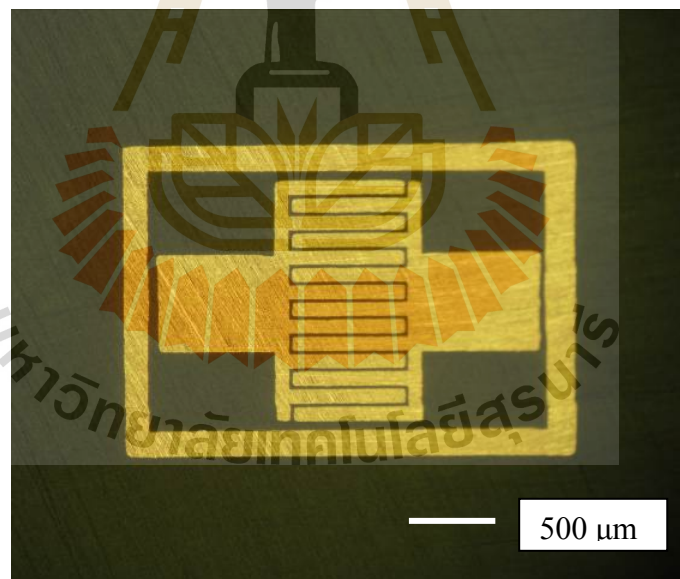


รูปที่ 5.8 แม่พิมพ์สารไวแสงหนา  $400 \mu\text{m}$  จากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์

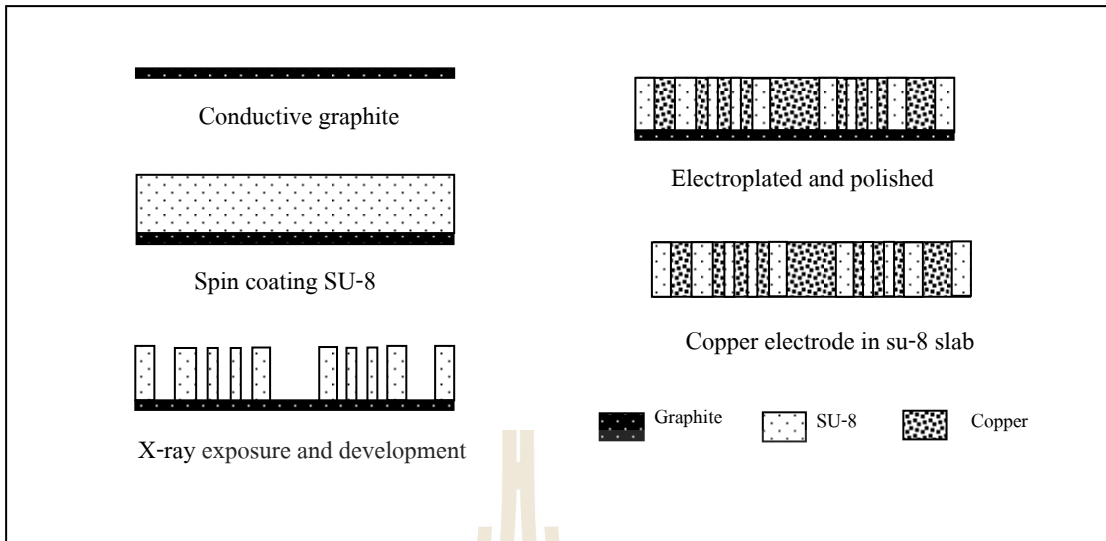
ในการนำชิปตัวเก็บประจุไปใช้งาน ต้องทำการเชื่อมต่อชิ้นงานเข้ากับวงจรรวมหรือแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งสามารถใช้วิธีการวางบอลตะกั่ว (solder ball) ลงบนโครงสร้าง ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการ batch process ที่ใช้ในอุตสาหกรรม การสร้างบอลตะกั่วโดยทั่วไปมีสองวิธี คือ การสกรีนด้วยหน้ากาก และการวางด้วยเครื่องสร้างบอลตะกั่ว ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบวางบอลตะกั่ว ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งหลังจากวางได้ตำแหน่งแล้ว จึงให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ลูกบอล จะยึดติดกับโครงสร้าง สามารถนำชิ้นงานไปติดกับวงจรได้ทันที และความสูงของลูกบอล จะช่วยลดค่าความจุไฟฟ้าระหว่างชิ้นงานและส่วนฐานได้



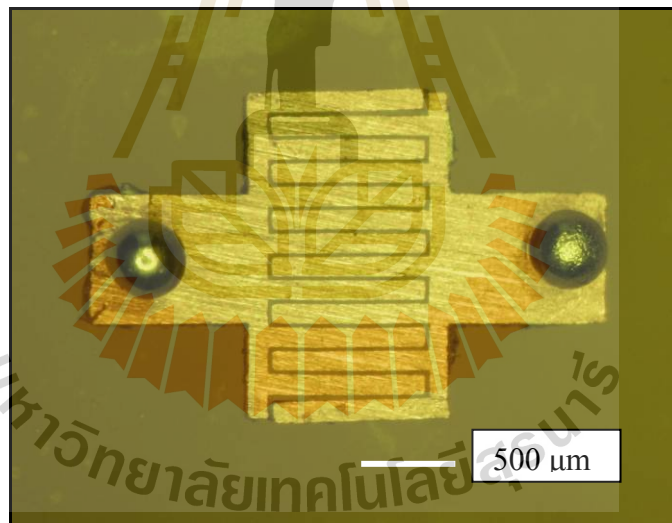
รูปที่ 5.9 ตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นพร้อมกันในครั้งเดียว บนพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว



รูปที่ 5.10 ตัวเก็บประจุในแม่พิมพ์ SU-8 หลังการชุบทองแดง และจัดเรียง

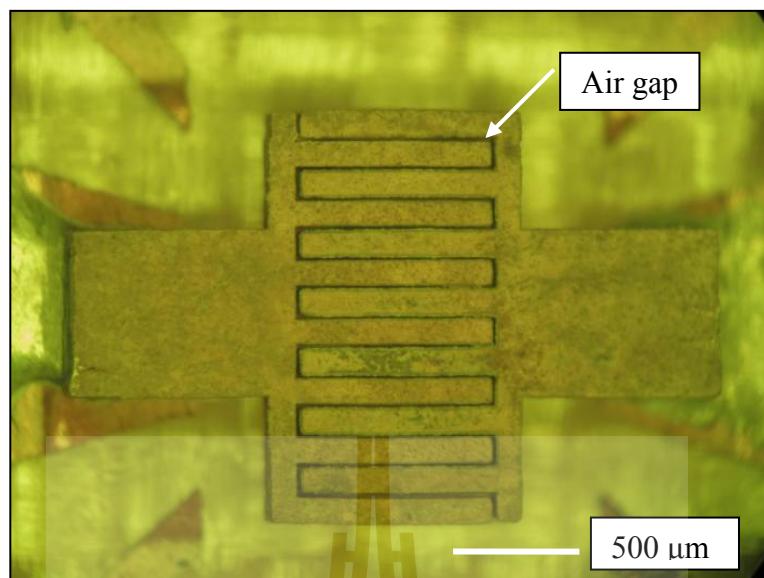


รูปที่ 5.11 กระบวนการสร้างตัวเก็บประจุ แบบฝังในแม่พิมพ์



รูปที่ 5.12 การเชื่อมลูกบอลตะกั่วที่ตัวเก็บประจุ สำหรับการทำ flip-chip

ในการนำไปใช้งาน หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุ สามารถนำชิ้นงานที่ติดลงบนฐานแล้ว นำไปสกัดแม่พิมพ์พอลิเมอร์ออกได้ ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งผลของการสกัดแม่พิมพ์ จะทำให้ตัวเก็บประจุ มีค่าความจุไฟฟ้าลดลง แต่ในส่วนของตัวประกอบคุณภาพ และจุด SRF จะได้ทำการทดสอบคุณลักษณะสมบัติ ในส่วนของการวัดผลต่อไป ซึ่งคาดว่าจะมีค่าสูงกว่าไดอิเล็กตริกที่เป็นพอลิเมอร์



รูปที่ 5.13 ตัวเก็บ SUT-CA ประจุหลังการสกัดแม่พิมพ์ SU-8 ออกแล้ว

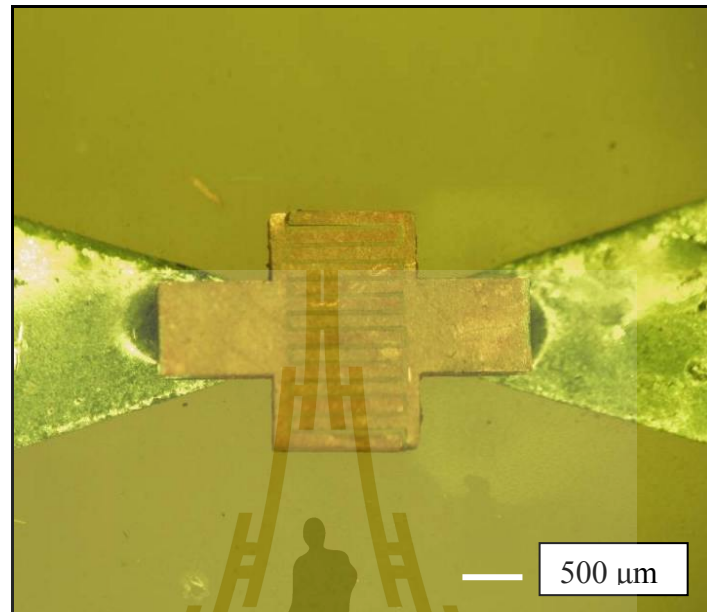
#### 5.4 ผลการวัด สรุป และวิเคราะห์

ตัวเก็บประจุในงานวิจัยนี้ ออกแบบเพื่อใช้งานที่ความถี่สูงในระดับ GHz ในการวัดคุณลักษณะสมบัติ ต้องวัดที่ความถี่สูง ด้วยเครื่อง Vector Network Analyzer ในงานนี้ ได้ทำการวัดแบบ 1 พอร์ต ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปสร้างแบบจำลอง ดังรูปที่ 5.4 ชิ้นงานที่ต้องการวัด จะถูกนำไปติดบนแผ่นฐานวงจรรวมที่ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 5.14 โครงสร้างของตัวเก็บประจุที่ติดบนฐานจะยกจากส่วนฐาน ด้วยบอลตะกั่ว ดังรูปที่ 5.15 ซึ่งแผ่นวงจรพิมพ์จะถูกเชื่อมเข้ากับข้อต่อ SMA ซึ่งสามารถรองรับความถี่ในการวัดได้ถึง 10 GHz

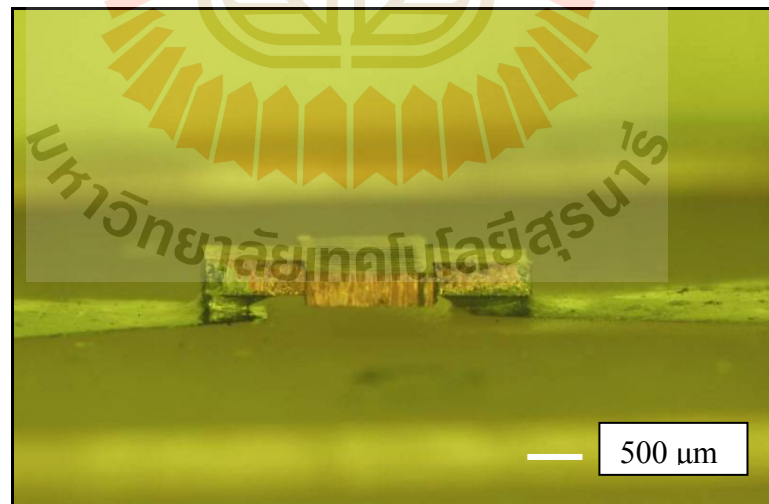
ในขั้นตอนการวัด ต้องทำการปรับเทียบเครื่อง VNA ด้วยชุดปรับเทียบมาตรฐาน เพื่อกำจัดผลของสาย และข้อต่อต่าง ๆ ซึ่งในงานความถี่สูงจะมีผลต่อการวัดอย่างมาก รูปที่ 5.16 เป็นเครื่อง VNA ที่ใช้ทดสอบ ชื่อรุ่น HP 8277D สามารถวัดได้ที่ความถี่ 50 MHz จนถึง 40 GHz ซึ่งในงานนี้จากการทดสอบวัดเบื้องต้น พบว่าจุด SRF มีค่าต่ำกว่า 10 GHz ดังนั้นจะวัดที่ความถี่ในช่วงไม่เกิน 10 GHz ซึ่งคาดว่าจะสามารถครอบคลุมจุด SRF ได้

จากการวัดค่าพารามิเตอร์ S และพิจารณาจาก Smith chart ในรูปที่ 5.18 พบว่า ตัวเก็บประจุมีจุด SRF ใกล้เคียงกันทั้งแบบช่องอากาศ และ SU-8 แต่ในการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุไฟฟ้า ต้องใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการวัดแบบ 1 พอร์ต ดังนั้นจะใช้การแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพออกจากกัน และทำการหาค่าความจุไฟฟ้า และค่าความเหนี่ยวนำ โดยตรวจสอบความถูกต้องด้วยการวาดกราฟเทียบกัน

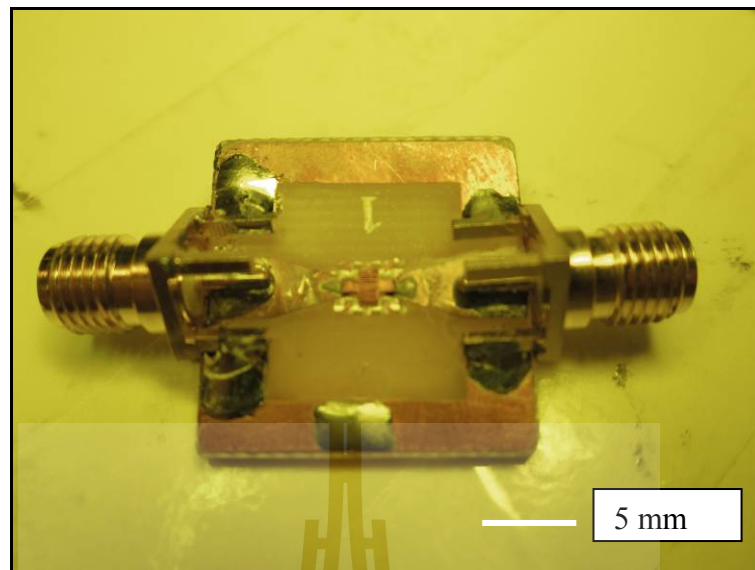
ระหว่างค่าที่วัดจริง และค่าที่ได้จากการหาคำตอบ ดังรูปที่ 5.19 และ 5.20 จะเห็นว่าเส้น โค้งทับกัน สนิทในช่วงแรก และจะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยหลังจากจุด SRF



รูปที่ 5.14 ภาพถ่ายด้านบนแสดงการเชื่อมตัวเก็บประจุเข้ากับชุดทดสอบ



รูปที่ 5.15 ภาพถ่ายด้านข้างแสดงการเชื่อมตัวเก็บประจุ เข้ากับชุดทดสอบ



รูปที่ 5.16 การเชื่อมต่อตัวเก็บประจุ เข้ากับชุดทดสอบพร้อม SMA

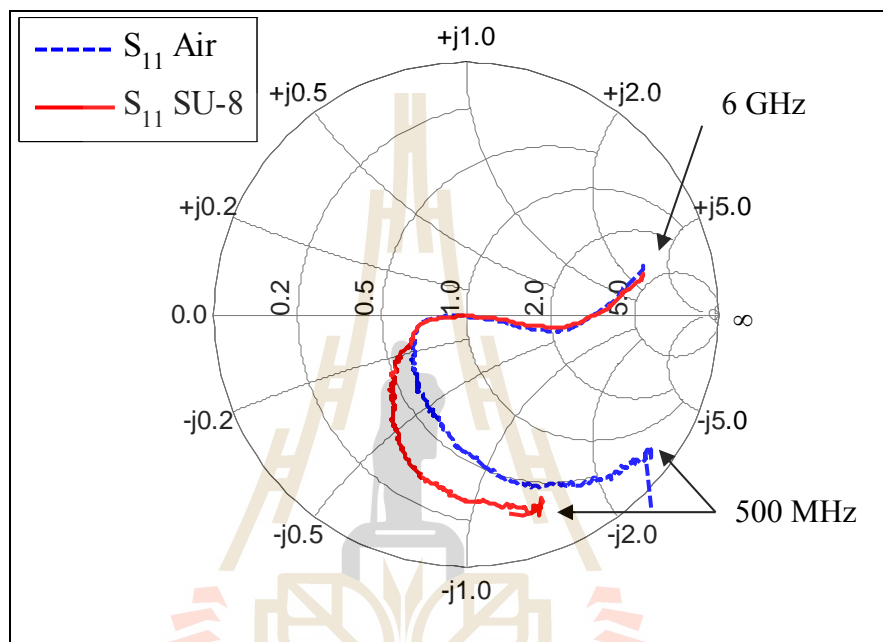


รูปที่ 5.17 Vector Network Analyzer HP 8277D 50 MHz - 40GHz

เมื่อได้เส้นโค้งที่ใกล้เคียงกันแล้ว จึงนำค่าความจุไฟฟ้า ที่ได้ไปวาดกราฟ ดังรูปที่ 5.21 จะเห็นว่า ตัวเก็บประจุชนิด SU-8 มีค่าความจุไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ ส่วนแบบช่องอากาศ จะมีค่าเพิ่ม

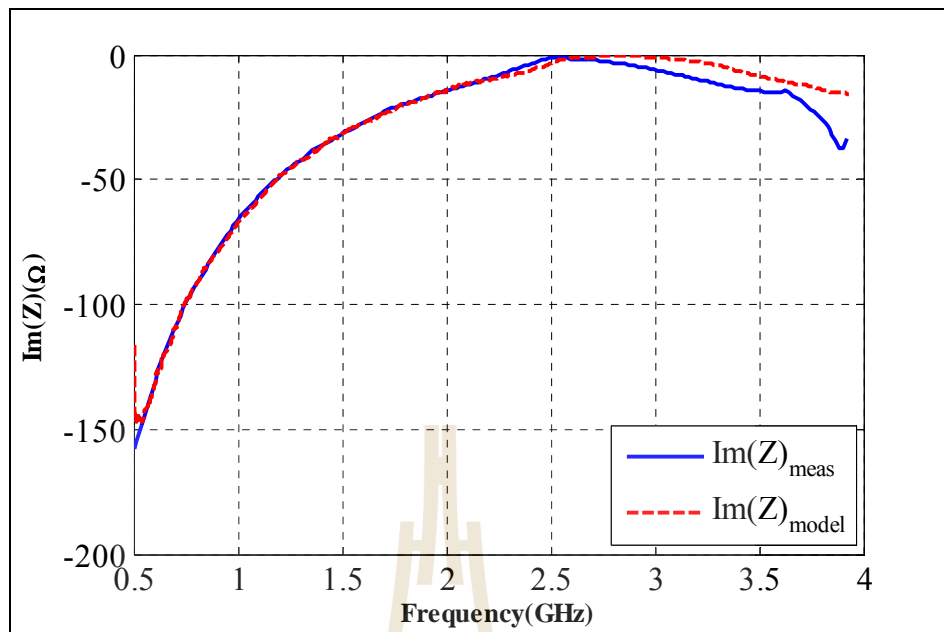


สูงขึ้นตามความถี่ ส่วนค่าความเหนี่ยวนำ จะมีค่าลดลงตามความถี่ และลดลงอย่างรวดเร็วที่ความถี่ประมาณ 2.5 GHz และในขั้นตอนสุดท้าย เพื่อให้แน่ใจว่า แบบจำลองที่ได้ เป็นแบบจำลองที่ถูกต้อง จึงนำค่าความจุไฟฟ้า ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทาน ที่ได้จากการคำนวณ มารวมเป็นค่าอิมพีแดนซ์ จากนั้น หาขนาดแล้วนำไปเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 5.23 และ 5.24 ซึ่งจะเห็นว่า กราฟมีแนวโน้มเดียวกัน ดังนั้นค่าที่คำนวณ ได้จึงถือว่าเป็นค่าที่ถูกต้อง

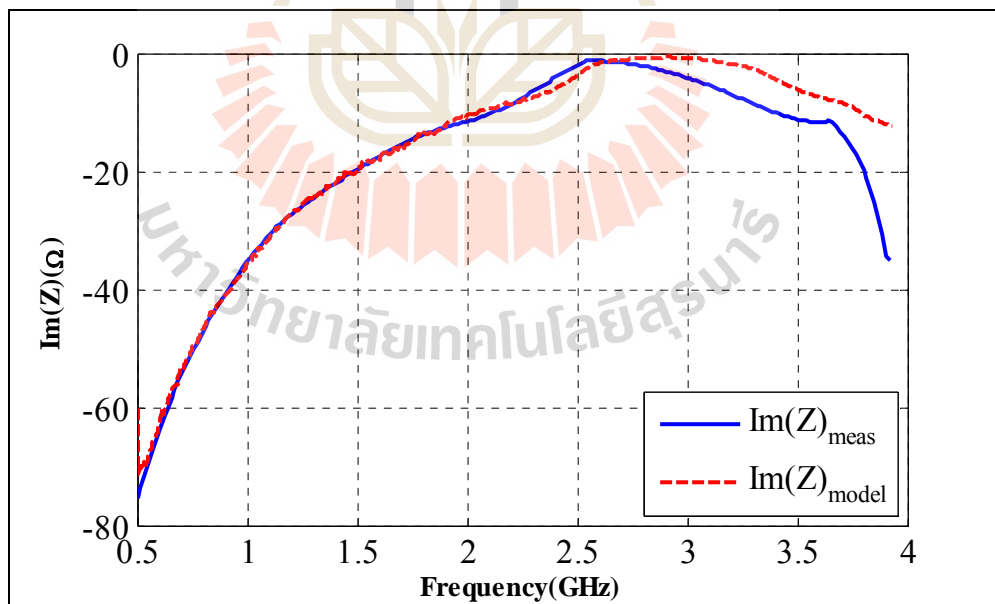


รูปที่ 5.18  $S_{11}$  ของตัวเก็บประจุช่องอากาศ และ SU-8

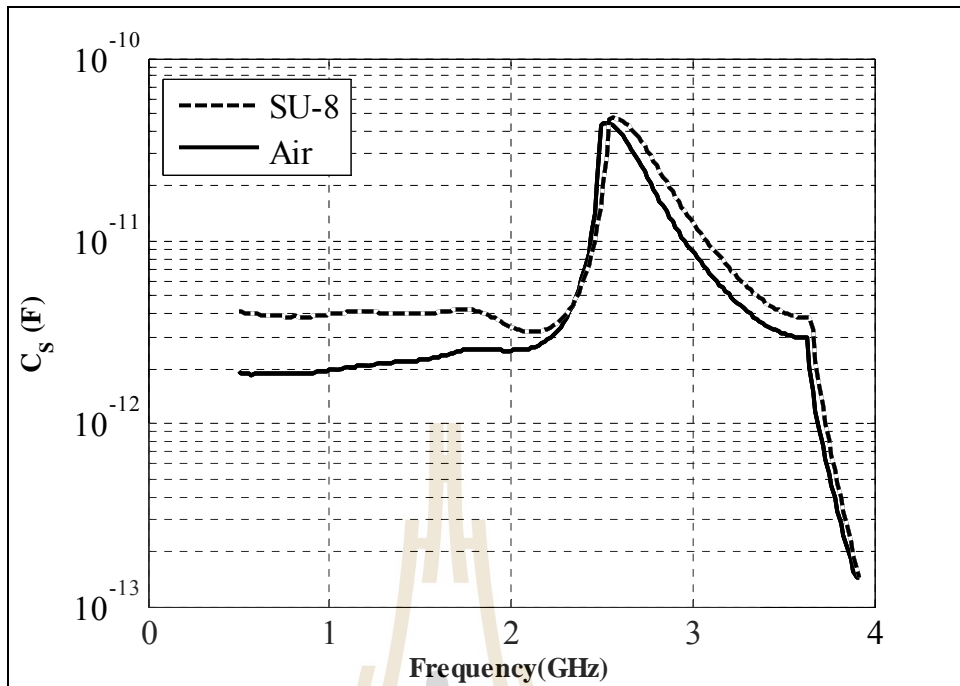
สำหรับการวิเคราะห์จุด SRF ของตัวเก็บประจุ ตำแหน่งที่เกิด SRF ต้องพิจารณารูปขนาดของอิมพีแดนซ์ เนื่องจากที่จุด SRF ส่วนจินตภาพจะหักล้างกันไป ส่งผลให้ขนาดของอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งจากรูปที่ 5.23 และ 5.24 จะได้ จุด SRF ที่ 1.8 GHz และ 2.2 GHz สำหรับตัวเก็บประจุแบบ SU-8 และอากาศ ส่วนค่าตัวประกอบคุณภาพในงานวิจัยนี้ สามารถวัดได้ที่ความถี่ต่ำสุดเพียง 0.8 GHz เนื่องจากเครื่องมือวัดไม่สามารถวัดที่ความถี่ต่ำกว่านี้ได้ ทำให้ได้ค่าตัวประกอบคุณภาพสูงสุดที่ 4 และ 2 สำหรับตัวเก็บประจุ SUT-CS และ SUT-CA ตามลำดับ สามารถสรุปค่าที่วัดได้จากตัวเก็บประจุในงานวิจัยนี้ ดังตาราง ที่ 5.1



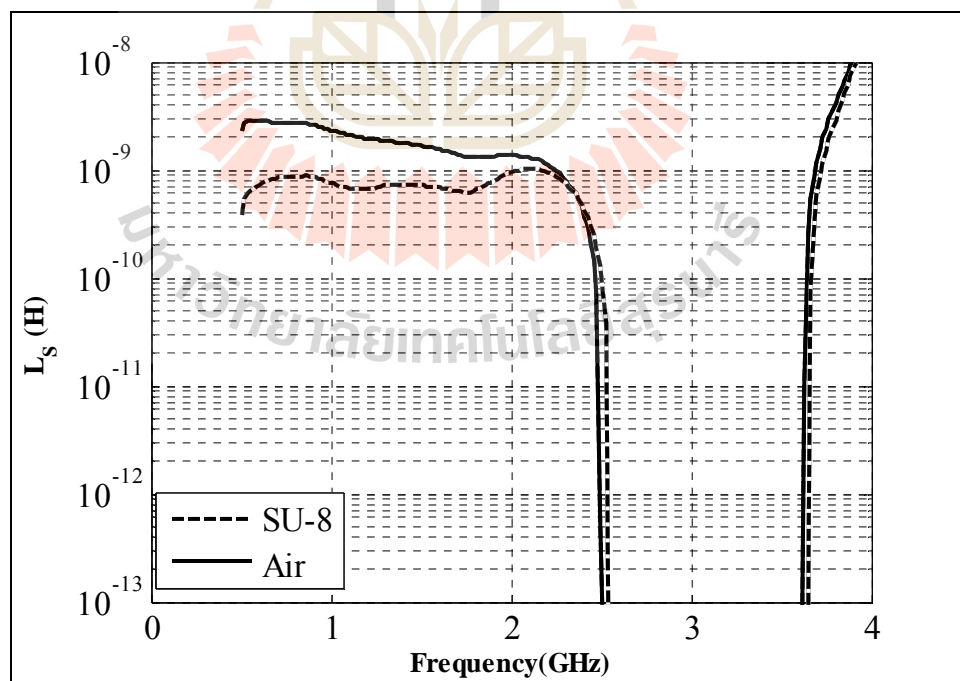
รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบส่วนจินตภาพของตัวเก็บประจุ SUT-CA  
ที่ได้จากการวัด และการสร้างแบบจำลอง



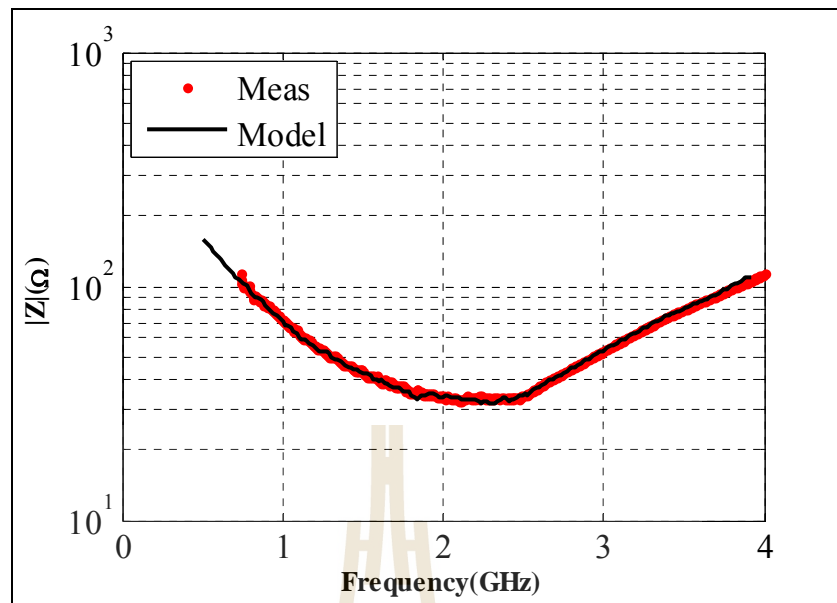
รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบส่วนจินตภาพของตัวเก็บประจุ SUT-CS  
ที่ได้จากการวัด และการสร้างแบบจำลอง



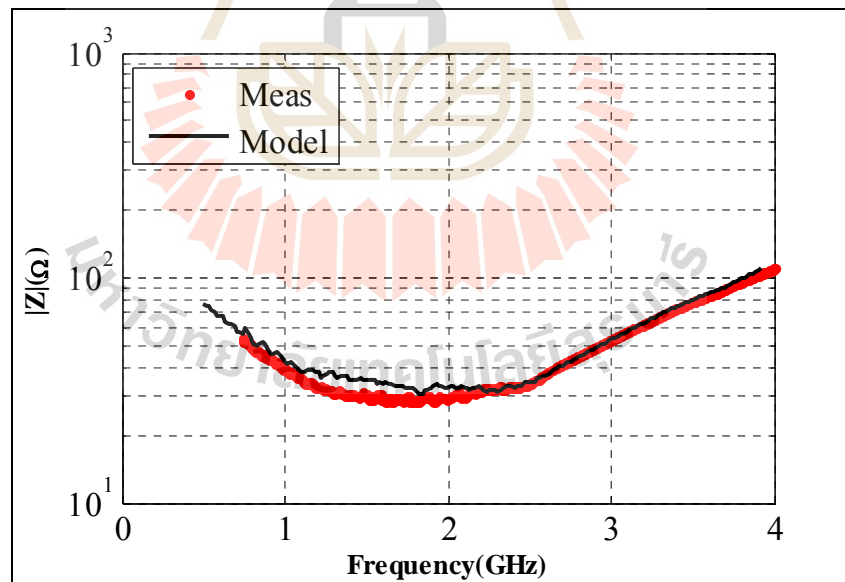
รูปที่ 5.21 ค่าความจุไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง



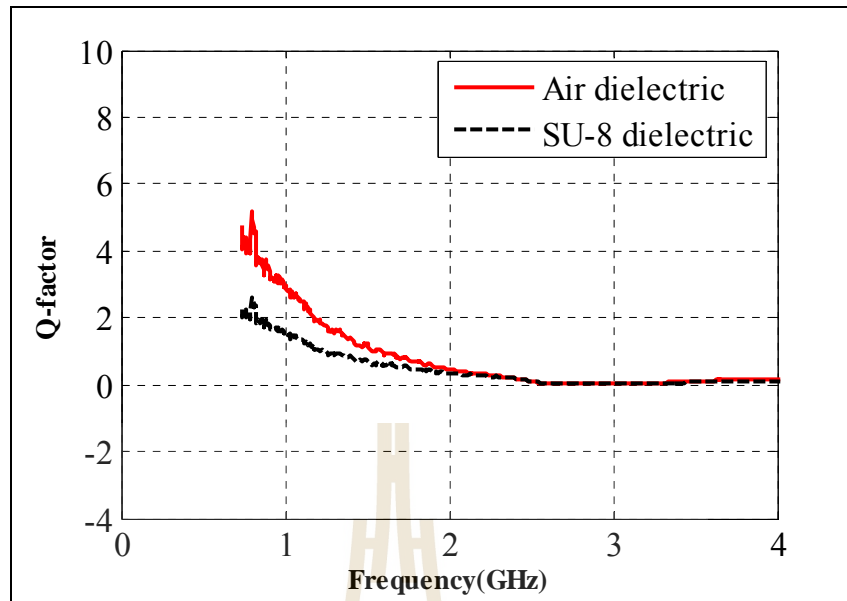
รูปที่ 5.22 ค่าความเหนี่ยวนำอนุกรมที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง



รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไดอิเล็กตริกอากาศ SUT-CA ที่ได้จากการวัด และการสร้างแบบจำลอง โดยการแปรค่า  $L_s$  และ  $C_s$



รูปที่ 5.24 เปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุไดอิเล็กตริก SU-8 SUT-CS ที่ได้จากการวัด และการสร้างแบบจำลอง โดยการแปรค่า  $L_s$  และ  $C_s$



รูปที่ 5.25 ตัวประกอบคุณภาพของตัวเก็บประจุ

ตารางที่ 5.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง

ไดอิเล็กตริก	$Q_{\max}@f$ (GHz)	SRF (GHz)	C (pF)
SU-8	4 @ 0.85	1.8	3.98
Air	2 @ 0.85	2.2	1.99

จากเนื้อหาที่ได้กล่าวมาในบทนี้ แสดงให้เห็นว่า การพัฒนากระบวนการสร้างตัวนำแบบฝังในแม่พิมพ์พอลิเมอร์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งพอลิเมอร์ที่หุ้มตัวนำจะมีประโยชน์โดยตรง คือ ช่วยเพิ่มค่าความจุไฟฟ้า และเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง โครงสร้างตัวเก็บประจุที่ได้สามารถเคลื่อนย้ายไปบรรจุลงบนวงจรรวมหรือแผ่นวงจรพิมพ์ได้ทันที ซึ่งเนื้อหาในส่วนต่อไป จะนำกระบวนการเดียวกันนี้ ประยุกต์สร้างตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในช่วงความถี่ไม่เกิน 20 MHz ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวในบทถัดไป

## บทที่ 6

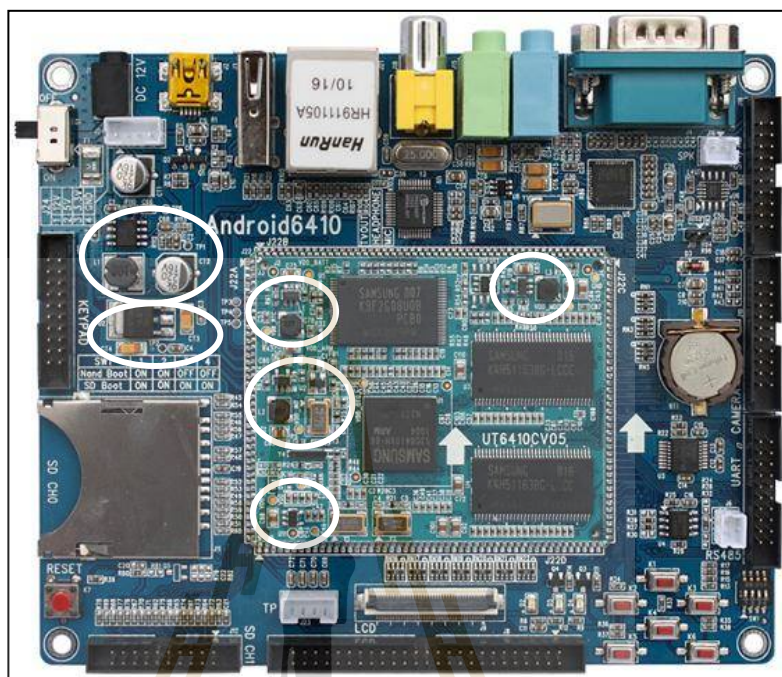
# ตัวเหนี่ยวนำอุตสาหกรรมกำลัง ระบบกล-ไฟฟ้าอุตสาหกรรม สำหรับ วงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

### 6.1 บทนำ

เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ได้กลายมาเป็นสิ่งจำเป็นในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ตั้งแต่อุปกรณ์ให้ความบันเทิง อุปกรณ์ติดต่อสื่อสาร ตลอดจนเครื่องมือในการทำงาน ระบบอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ให้มีขนาดที่เล็กลง แต่ให้ประสิทธิภาพการทำงาน และความเร็วสูงขึ้น วงจรถูกสร้างให้อยู่ในรูปของวงจรรวม (Integrated circuit : IC) ซึ่งสามารถบรรจุวงจรจำนวนมากลงบนชิปขนาดจิ๋วได้ ด้วยเหตุนี้ เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เช่นคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และเครื่องมือสื่อสารต่าง ๆ จึงได้รับการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว การทำงานของวงจรมีความซับซ้อนมากขึ้น และแบ่งวงจรเป็นหลายส่วน เพื่อแยกการทำงาน เช่น หน่วยแสดงผล หน่วยประมวลผล หน่วยความจำ เซลล์รับภาพ วงจรสื่อสาร และหน่วยที่ใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งส่วนต่าง ๆ เหล่านี้ ต้องการระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 3.3 โวลต์ แต่ด้วยข้อจำกัดในเรื่องขนาด และความสะดวกในการพกพา อุปกรณ์เหล่านี้จึงถูกออกแบบให้ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เพียงแหล่งเดียวเท่านั้น ส่งผลให้วงจรที่ทำหน้าที่แปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามามีส่วนสำคัญเป็นอย่างมาก ดังตัวอย่างในรูปที่ 6.1 แสดงวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงบนบอร์ดพัฒนาแอนดรอยด์ (Android development board) จะเห็นว่า มีวงจรแปลงแรงดันมากถึง 6 ชุด เพื่อจ่ายให้กับส่วนต่าง ๆ บนบอร์ด

วงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Power converters) ที่นิยมใช้โดยทั่วไป มีสามประเภท ได้แก่ วงจรแปรผันแบบเชิงเส้น (linear converter) วงจรแปรผันแบบสวิตช์เก็บประจุ (switching capacitive converter) และวงจรแปรผันแบบสวิตช์เหนี่ยวนำ (switching inductive converter) ในยุคแรกวงจรที่ใช้เป็นวงจรแบบเชิงเส้น วงจรมีเพียงทรานซิสเตอร์ และวงจรป้อนกลับ ไม่ต้องใช้ตัวเก็บประจุ หรือ ตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นวงจรนี้จึงสามารถออกแบบให้อยู่ในรูปวงจรรวมทั้งหมด ทำให้วงจรมีขนาดเล็กและราคาถูก แต่อย่างไรก็ตาม วงจรแบบเชิงเส้นนี้มีประสิทธิภาพการทำงาน (efficiency) และความหนาแน่นกำลังต่ำ (power density) โดยเฉพาะเมื่อผลต่างแรงดันของด้านขาเข้าและขาออกมีค่าสูง วงจรจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่า 50% ดังนั้น แม้ว่าวงจรจะมีขนาดเล็ก แต่ด้วยวงจรมีประสิทธิภาพการทำงานต่ำ วงจรจึงต้องการอุปกรณ์ระบายความร้อน

ขนาดใหญ่ ในปัจจุบันวงจรนี้จึงมีการใช้งาน เมื่อคำนึงถึงต้นทุนเป็นหลัก โดยที่ประสิทธิภาพ และขนาดไม่ใช่ปัจจัยหลักในการออกแบบใช้งาน

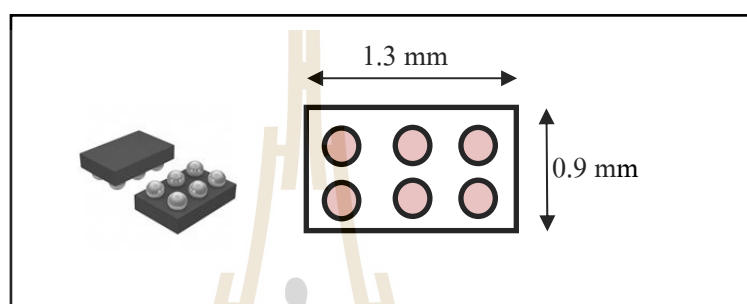


รูปที่ 6.1 แสดงวงจร DC-DC converter บนบอร์ดพัฒนาเชิงพาณิชย์

วงจรประเภทต่อมา คือ วงจรแบบสวิตช์-เก็บประจุ ทำงานโดยอาศัยการเติมประจุ และคายประจุของตัวเก็บประจุ ข้อดีคือ วงจรใช้เพียงอุปกรณ์สวิตช์ วงจรป้อนกลับ และตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็กในช่วง pF เท่านั้น วงจรจึงมีขนาดเล็ก และมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าแบบเชิงเส้น แต่ข้อเสียของวงจรนี้ คือ วงจรสามารถออกแบบใช้งานที่ก่าลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก เนื่องจากเมื่อใช้งานที่ก่าลังไฟฟ้าสูง ความสามารถในการคงค่าแรงดันจะลดลง แต่หากออกแบบให้วงจรมีการคงค่าแรงดันได้ดีขึ้น จะทำให้วงจรมีประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลง ซึ่งโดยทั่วไปวงจรจะมีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดไม่เกิน 80% (Ngo and Webster, 1994; Makowski and Maksimovic, 1995)

วงจรแบบสุดท้ายคือ วงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์-เหนี่ยวนำ ได้มีการเริ่มต้นใช้งานตั้งแต่ปี 1990 เป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูงที่สุด นิยมใช้ในวงจรที่ต้องการประสิทธิภาพการทำงาน และความหนาแน่นก่าลังงานสูง (Chumlei *et al.*, 2007) ส่วนประกอบของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์-เหนี่ยวนำ ประกอบไปด้วยสามส่วน คือ ส่วนควบคุม

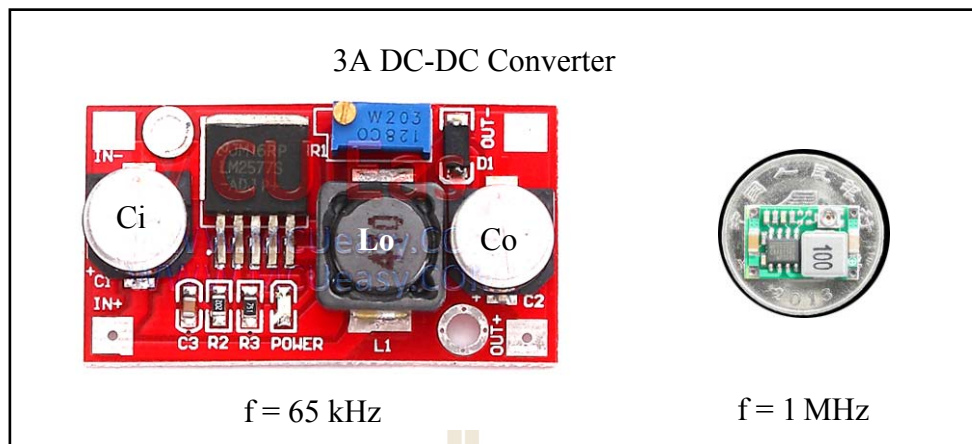
(controller unit) ส่วนสวิตช์ (switching unit) และส่วนกรองสัญญาณ (filter) ซึ่งเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมในปัจจุบัน สามารถออกแบบ และสร้างวงจรทั้งสองส่วนนี้ ให้อยู่ในรูปวงจรรวม วงจรทั้งสองส่วนจึงได้ถูกรวมเข้าด้วยกัน ส่งผลให้วงจร มีขนาดเล็กกลงมาก ดังรูปที่ 6.1 แสดงวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชิงพาณิชย์แบบสวิตช์ เหนี่ยวนำ (ROHM Semiconductor BU9000X 5.5V to 2.5V 1A @ 6 MHz) จะเห็นว่าวงจรนี้ มีขนาดเพียง  $1.2 \text{ mm}^2$  และ ความสูงน้อยกว่า 0.5 mm เท่านั้น



รูปที่ 6.2 วงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชิงพาณิชย์แบบ switching inductive converter (ROHM Semiconductor BU9000X 5.5V to 2.5V 1A @ 6 MHz)

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาสวนประกอบในการใช้งานวงจรในส่วนที่สาม คือ ส่วนตัวกรองสัญญาณ ที่ประกอบไปด้วย ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ส่วนนี้ยังคงมีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะที่ความถี่ระดับ kHz ค่าความเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้าที่ต้องการยังต้องมีค่าสูง แนวทางการพัฒนาของนักวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบัน จึงมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มความถี่ของวงจร เพื่อลดขนาดของตัวกรองเหล่านี้ โดยอาจเทียบเป็นปริมาณความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (power density ( $\text{W}/\text{m}^3$ )) วงจรที่มีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงกว่า จึงสามารถใช้งานได้หลากหลาย โดยเฉพาะ การประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพาขนาดเล็ก ซึ่งกำลังเป็นที่นิยม ดังนั้นวงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเชิงพาณิชย์แบบสวิตช์-เหนี่ยวนำ ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน จึงทำงานอยู่ในช่วงความถี่ 10 kHz ถึง 6 MHz ซึ่งความถี่ทำงานของวงจร มีผลอย่างมากต่อขนาดของวงจร ดังตัวอย่างในรูปที่ 6.2 เปรียบเทียบชุดแปรผันแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตช์-เหนี่ยวนำเชิงพาณิชย์ ระหว่าง ชุดที่ทำงานที่ความถี่ 65 kHz และ 1 MHz มีพิกัดกำลังที่ 30W เท่ากัน จะเห็นว่าวงจรที่ใช้ความถี่สูงกว่า มีขนาดเล็กลงอย่างมากโดยที่ประสิทธิภาพสูงสุดของทั้งสองวงจรยังคงมากกว่า 85%

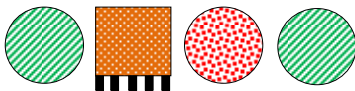
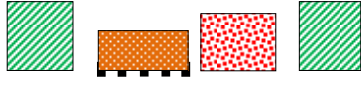
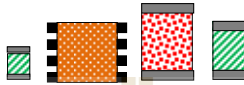












รูปที่ 6.3 วงจร DC-DC เซมิคอนดักเตอร์ ที่ทำงานที่ความถี่ 65 kHz และ 1 MHz

ในการออกแบบวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์-เหนี่ยวนำ เมื่อความถี่สูงขึ้น ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ จะมีค่าลดลง ตามสมการที่ 6.1 (ROHM Semiconductor) เมื่อค่าความเหนี่ยวนำลดลง นั้นหมายถึงตัวเหนี่ยวนำจะมีจำนวนรอบลดลง ส่งผลให้มีขนาดเล็กลงด้วย ทำให้นักวิจัยเกิดแนวคิดในการบรรจุตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็ก ร่วมกับชิพส่วนควบคุม และส่วนสวิตช์ หรือเรียกว่า ระบบ Power supply on chip (PwrSoC) มีความถี่ใช้งานตั้งแต่ 5 MHz ขึ้นไป รูปที่ 6.3 แสดงพัฒนาการของระบบ PwrSoC เปรียบเทียบความถี่ (frequency) ขนาด (form factor) และความสูง (profile) ของวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Orlando *et al.*, 2006) เริ่มจากวงจรด้านบนสุด เป็นวงจรที่ทำงานที่ความถี่ในช่วง kHz จะเห็นว่า ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ มักมีขนาดใหญ่ ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ และมีความหนามากกว่า 10 มิลลิเมตร ส่วนในรูปที่ 6.3 ถึง (2) เมื่อความถี่อยู่ในช่วง 1 MHz จะเห็นว่า วงจรมีขนาดเล็ก และบางลงอย่างมาก โดยทั่วไปมีความหนาน้อยกว่า 5 mm ในรูปที่สาม เริ่มเข้าสู่ยุคของ MEMS inductor จะเห็นว่าเริ่มมีการบรรจุ ตัวเหนี่ยวนำเข้าไปในตัวถังของวงจรรวม ซึ่งในเชิงพาณิชย์ จะเรียกวงจรรวมนี้ว่า Inductor less dc-dc converter หมายถึงวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้ตัวเหนี่ยวนำ แต่ในความเป็นจริง ได้มีการบรรจุตัวเหนี่ยวนำไว้ภายใน ตัวอย่างของบริษัทที่จำหน่าย ตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ ได้แก่ บริษัท Enpirion ตัวอย่างวงจรรายในดังรูปที่ 6.4

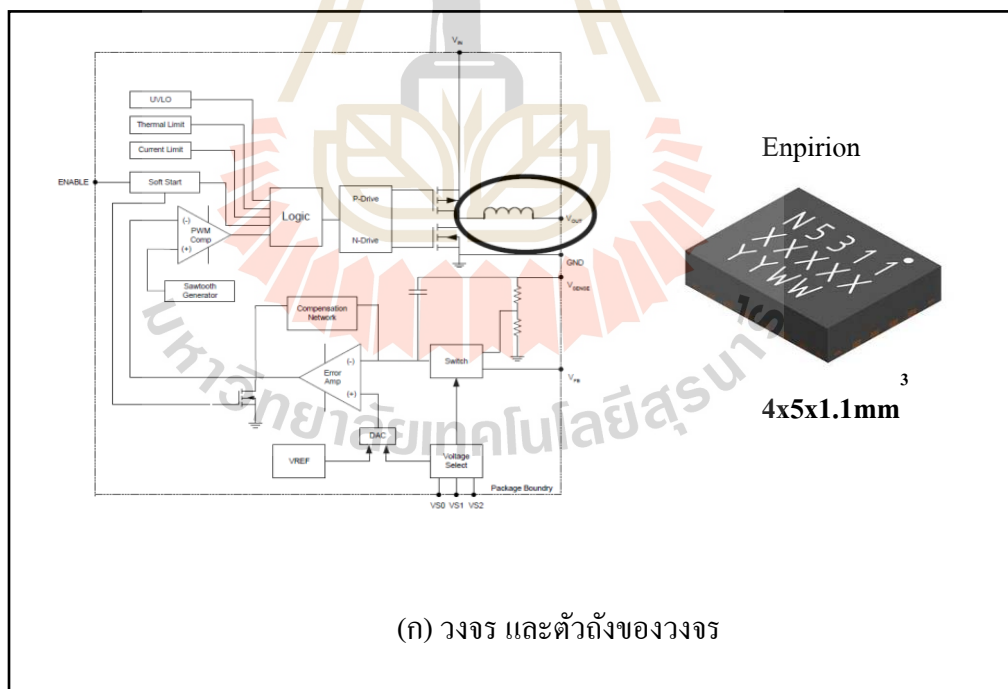
$$L = \frac{(V_{in} - V_{out}) \cdot V_{out}}{V_{in} \cdot f_{sw} \cdot r \cdot I_{out}} \quad (6.1)$$

	Top view	Side view
(1) $f < 100$ kHz Height $> 10$ mm		
(2) $f = 1$ MHz Height $< 5$ mm		
(3) $f = 5$ MHz Height $< 2$ mm		
(4) $f = 20$ MHz Height $< 0.8$ mm		
(5) $f = 50$ MHz Height $< 0.5$ mm		
		

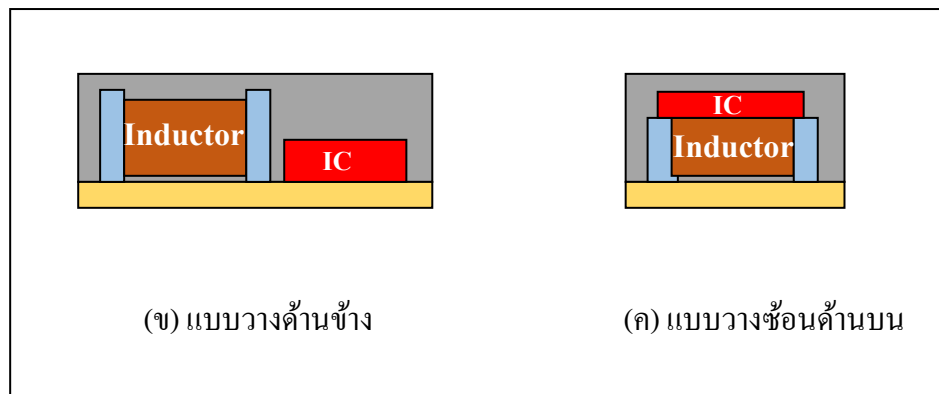
รูปที่ 6.4 แสดงแนวทางการพัฒนางจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ในยุคต่อมา เมื่อนักวิจัยสามารถสร้างวงจร ให้สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงมากขึ้นใน ระดับ 20 MHz ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจร จึงมีค่าอยู่ในระดับนาโนเฮนรี (nH) เท่านั้น ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำในระดับนี้ ตัวเหนี่ยวนำจะมีจำนวนขดลวด ไม่เกิน 10 รอบ นักวิจัยจึงเริ่มสนใจที่จะพัฒนา ตัวเหนี่ยวนำ ให้มีขนาดเล็ก (small form factor) และบาง (low-profile) เพื่อให้สามารถบรรจุไว้ด้านบนของแผ่นวงจรรวม เรียกว่า on-chip inductor โดยมีเป้าหมายคือ ความหนาของวงจรทั้งหมดน้อยกว่า 0.8 mm ดังรูปที่ 6.3 (4) ซึ่งในปัจจุบันนี้ ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปรผันแรงดัน ที่ความถี่มากกว่า 20 MHz ขึ้น ไปส่วนใหญ่จะอยู่ในชั้นวิจัย เนื่องจากกำลังงานสูญเสียในแกน และในอุปกรณ์สวิตช์ ยังมีค่ามาก

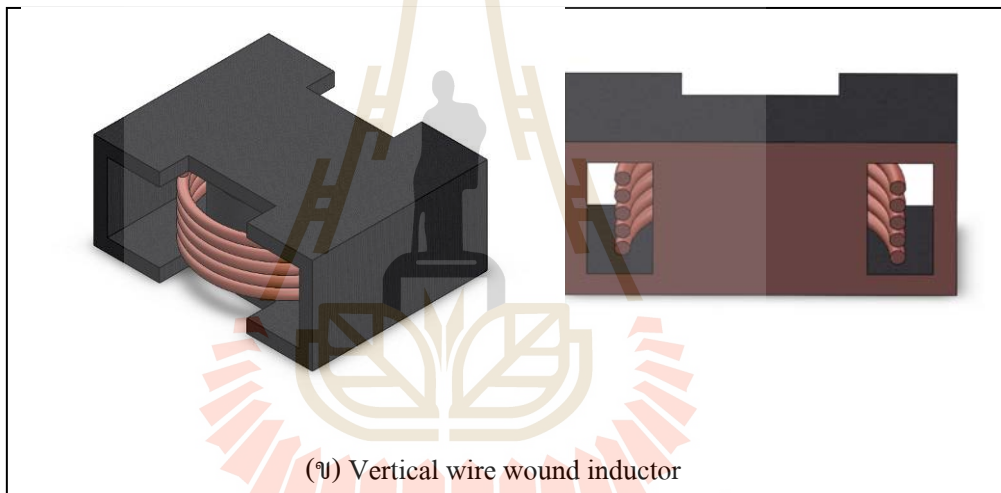
อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการมีค่าอยู่ในระดับ 100 ถึง 1,000 nH แต่การที่จะสร้างตัวเหนี่ยวนำให้มีค่าดังกล่าวด้วยขนาดและความสูงน้อยกว่า 1 mm ยังเป็นข้อจำกัด ในการสร้าง ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ตัวเหนี่ยวนำยังคงมีขนาดใหญ่ คือ ตัวเหนี่ยวนำยังต้องมีแกนเพื่อเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำให้สูงขึ้นซึ่งถ้าใช้จำนวนรอบเท่ากันแต่เป็นแกนอากาศ ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้ มีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 nH เท่านั้น ดังนั้น แกนที่ใช้ต้องเป็นวัสดุที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง (high permeability) เพื่อช่วยเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับค่า permeability ตัวเหนี่ยวนำโดยทั่วไปจึงมีโครงสร้าง ดังรูปที่ 6.5 จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาความสูง โครงสร้างต้องมีความสูงของชั้นแกนด้านบน ส่งผลให้เหลือความสูงของชั้นขดลวดลดลงอีก นักวิจัยจึงนิยมใช้โครงสร้างขดลวดแบบสปริงกันหอย (spiral) แทนแบบขดโซลินอยด์ เพื่อให้มีชั้นของขดลวดเพียงชั้นเดียว ดังรูปที่ 6.6 ส่วนรูปที่ 6.7 แสดงโครงสร้างโดยทั่วไปของตัวเหนี่ยวนำเชิงพาณิชย์ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า ตัวเหนี่ยวนำที่มีจำหน่ายโดยทั่วไป จะมีความสูงมากกว่า 1 mm จึงเหมาะสำหรับการใช้บรรจุบนแผ่นวงจรพิมพ์ (printed circuit board) มากกว่าการบรรจุลงบนวงจรรวม



รูปที่ 6.5 แสดงวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดบรรจุตัวเหนี่ยวนำ ของ Enpirion



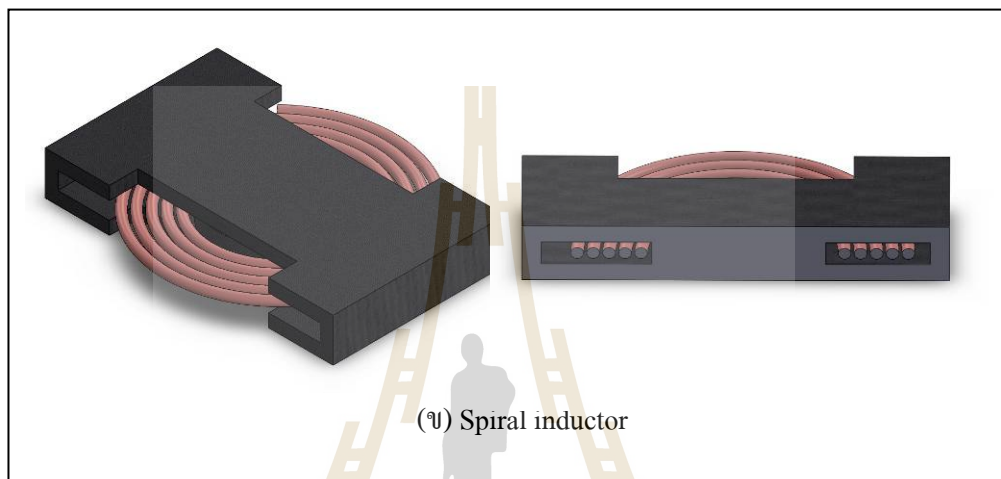
รูปที่ 6.5 แสดงวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดบรรจุตัวเหนี่ยวนำ ของ Enpirion (ต่อ)



รูปที่ 6.6 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำชนิดมีแกนเป็นวัสดุ high permeability แบบ helix และ spiral

จากรูปที่ 6.6 จะเห็นว่า ตัวเหนี่ยวนำชนิดขดสปริงกันหอย จะมีความสูงน้อยกว่าแบบพันในแนวตั้งมาก ทำให้นักวิจัยส่วนใหญ่ มักออกแบบตัวเหนี่ยวนำจุลภาคสำหรับบรรจุบนวงจรรวมด้วยโครงสร้างดังกล่าว แต่การสร้างขดลวดขนาดเล็กให้ได้ค่าความต้านทานต่ำ ยังทำได้ยาก ทำให้การออกแบบใช้งานจริง ยังประสบปัญหาค่าความต้านทานของขดลวด เนื่องจากการสร้างด้วยเทคโนโลยีฟิล์มบางโดยทั่วไป ขดลวดที่สร้างขึ้นมักจะมีความหนาไม่มาก ส่งผลให้ค่าความต้านทานกระแสตรงมีค่าสูง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของตัวเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำกระแสตรง จะมีไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านมากกว่ากระแสสลับ ทำให้การออกแบบมักจะคำนึงถึง

กำลังสูญเสียที่เกิดจากกระแสตรงเป็นหลัก ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ ทฤษฎี และการวัดผล นักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันจึงได้พัฒนาตัวเหนี่ยวนำจุลภาค โดยเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทานกระแสตรงเป็นหลัก ในบางงานวิจัยจะเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าความเหนี่ยวนำ ต่อ ความต้านทานกระแสตรง (Orlando *et al.*, 2006) ซึ่งจะต่างจากตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ระดับ GHz ที่ใช้การเปรียบเทียบค่า Q-factor เป็นหลัก



รูปที่ 6.6 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำชนิดมีแกนเป็นวัสดุ high permeability แบบ helix และ spiral (ต่อ)



รูปที่ 6.7 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำเชิงพาณิชย์ แบบ SMD

ในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้ข้อดีของแสงซินโครตรอน ที่มีความสามารถในการสร้างโครงสร้างสามมิติ ให้มีความสูงมากกว่าความกว้าง (high-aspect ratio) ในปัจจุบันสามารถสร้างขดลวดที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง ได้มากถึง 10 เท่า ซึ่งหากนำมาใช้สร้างขดลวดจะสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้วยการเพิ่มความสูง โดยที่ขนาดของตัวเหนี่ยวนำไม่เพิ่มขึ้น แต่ ยังคงสามารถออกแบบความสูงให้น้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตรได้ โดยค่าความต้านทานของขดลวด เป็นไปตามสมการที่ 6.2 และรูปที่ 6.8 แสดงค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ชนิด 3 รอบ ที่ความหนาของขดลวด 0 ถึง 500  $\mu\text{m}$  จะเห็นว่า ที่ความสูง 300  $\mu\text{m}$  เส้นตัวนำกว้าง 30  $\mu\text{m}$  ขดลวดจะมีค่าความต้านทานกระแสตรงที่ 20 m $\Omega$  เท่านั้น ซึ่งมีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับตัวเหนี่ยวนำเชิงพาณิชย์ และตัวเหนี่ยวนำจุลภาคในงานวิจัยอื่น ๆ

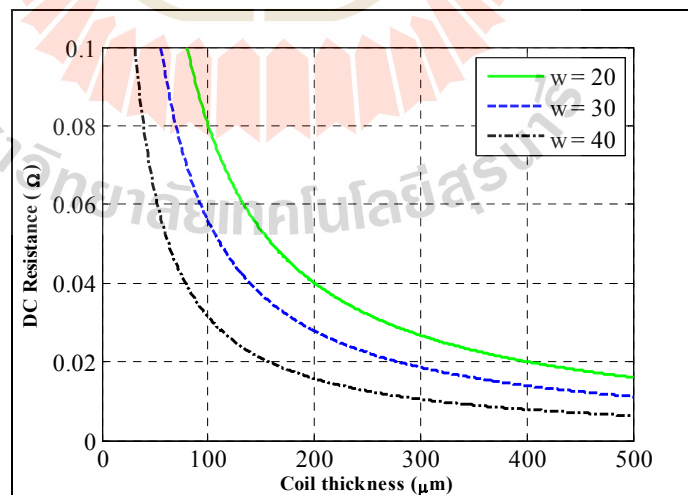
$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (6.2)$$

เมื่อ R คือ ค่าความต้านทาน มีหน่วยเป็น ( $\Omega$ )

$\rho$  คือ ค่าสภาพต้านทาน ( $\Omega/\text{m}$ )

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ( $\text{m}^2$ )

l คือ ความยาวของตัวนำ (m)

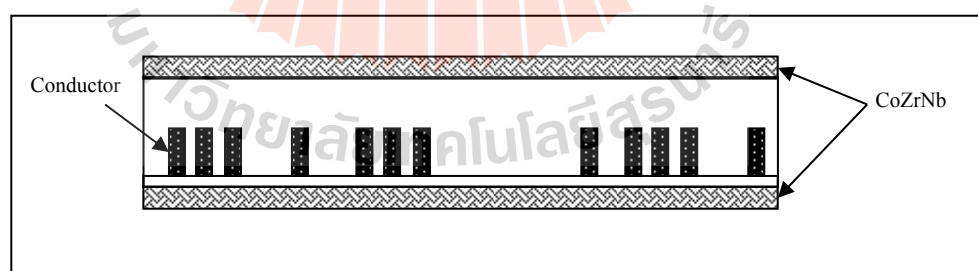


รูปที่ 6.8 แสดงค่าความต้านทานของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ 3 รอบ ที่ความหนาของขดลวด 0 ถึง 500  $\mu\text{m}$

จากแนวทางในการวิจัยที่ได้ศึกษาดังกล่าว จะเห็นได้ว่า ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์สำคัญในวงจรแปรผันแรงดันไฟฟ้า แบบ สวิตช์เหนี่ยวนำ ประสิทธิภาพโดยรวมของวงจร ขึ้นอยู่กับตัวเหนี่ยวนำ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าด้านขาออก จะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งหมด แต่ในการใช้งานจริงเมื่อมีการจ่ายโหลด กระแสที่ไหลผ่านส่วนใหญ่ เป็นกระแสตรง นักวิจัยจึงให้ความสำคัญกับค่าความต้านทานกระแสตรง มากกว่าค่าความต้านทานกระแสสลับ ส่วนคุณสมบัติสำคัญทางด้านโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำสำหรับบรรจุนวมนวกรวม คือ ขนาด และความสูง ซึ่งโดยทั่วไปควรมีความสูงไม่เกิน 1 mm ขนาดในช่วง  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  จนถึง  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  แต่ในการที่จะสร้างตัวเหนี่ยวนำให้มีค่าความต้านทานกระแสตรงต่ำ และค่าความเหนี่ยวนำสูงด้วยพื้นที่จำกัดดังกล่าว เป็นสิ่งที่นักวิจัยได้พัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในหัวข้อถัดไป จะได้กล่าวถึงงานวิจัยของตัวเหนี่ยวนำจุลภาคตั้งแต่อดีต จนถึงปัจจุบัน โดยเปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทานกระแสตรงต่อพื้นที่ เป็นหลัก

## 6.2 ปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

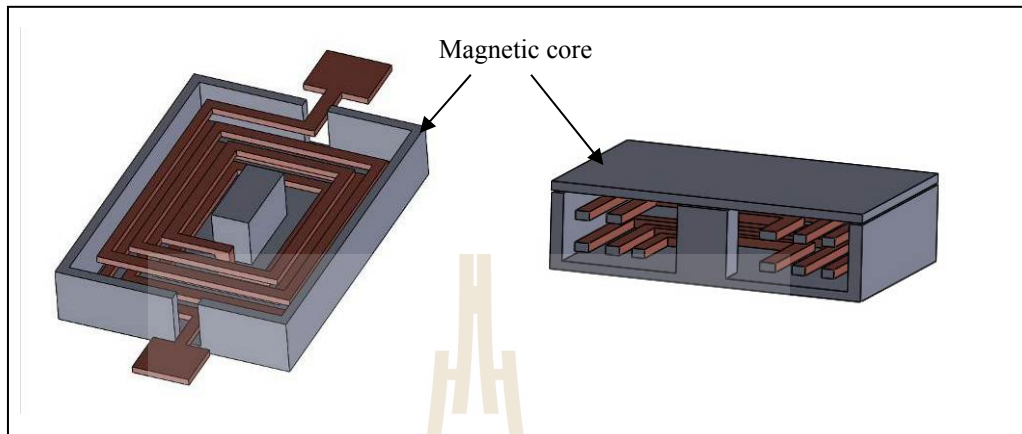
ในปี 1994 Sato ได้ออกแบบตัวเหนี่ยวนำโครงสร้างคล้ายแซนดวิช มีขดลวดวางซ้อนกัน และเคลือบวัสดุ CoZrNb ทั้งด้านบนและด้านล่างของขดลวด ดังรูปที่ 6.9 ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดพื้นที่  $3.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$  ค่าความต้านทานกระแสตรง  $3.1 \Omega$  ค่าความเหนี่ยวนำ  $1 \mu\text{H}$  ตัวประกอบคุณภาพเท่ากับ 10 ที่ความถี่ 10 MHz ในงานวิจัยนี้ จะเห็นว่าตัวเหนี่ยวนำมีค่าความต้านทานค่อนข้างสูงเนื่องจากขดลวดสร้างด้วยการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมหนาเพียง  $10 \mu\text{m}$



รูปที่ 6.9 ตัวเหนี่ยวนำโครงสร้างแซนดวิชของ Sato (1994)

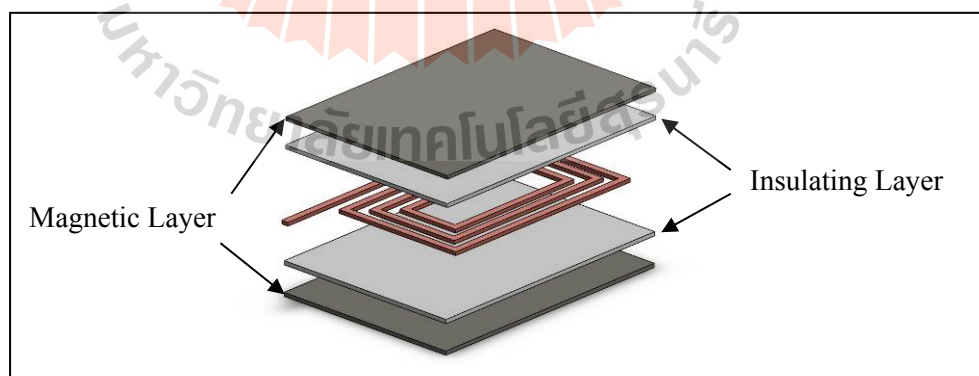
ในปี 1998 C. Ahn และ M. Allen นำเสนอการสร้างตัวเหนี่ยวนำสามรูปแบบได้แก่ แบบขดสปริงกันหอย แบบขดโซลินอยด์ และแบบทอรอยด์ โดยใช้โลหะ Permalloy เป็นแกน โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำมีขนาดพื้นที่  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  พบว่าโครงสร้างแบบทอรอยด์ได้ค่าความต้านทานต่ำสุด

ที่  $240 \text{ m}\Omega$  ค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด  $220 \text{ nH}$  ตัวประกอบคุณภาพเท่ากับ 1 ที่ความถี่  $1 \text{ MHz}$  ตัวอย่าง  
โครงสร้างแบบ โซลินอยด์ ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 Spiral type inductive structure ของ Ahn (1998)

ในปี 2000 Y. Takayama และคณะ ได้นำเสนอ การสร้างและประยุกต์ใช้งาน ตัวเหนี่ยวนำ  
แบบขดสปริงในระนาบ บนพื้นที่  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  โดยปิดทับด้วยแผ่นแม่เหล็ก  $\text{CoHfTaPd}$  ทั้งบนและ  
ล่าง ได้ค่าความต้านทาน  $800 \text{ m}\Omega$  และค่าความเหนี่ยวนำ  $960 \text{ nH}$  โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำดังรูปที่  
6.11

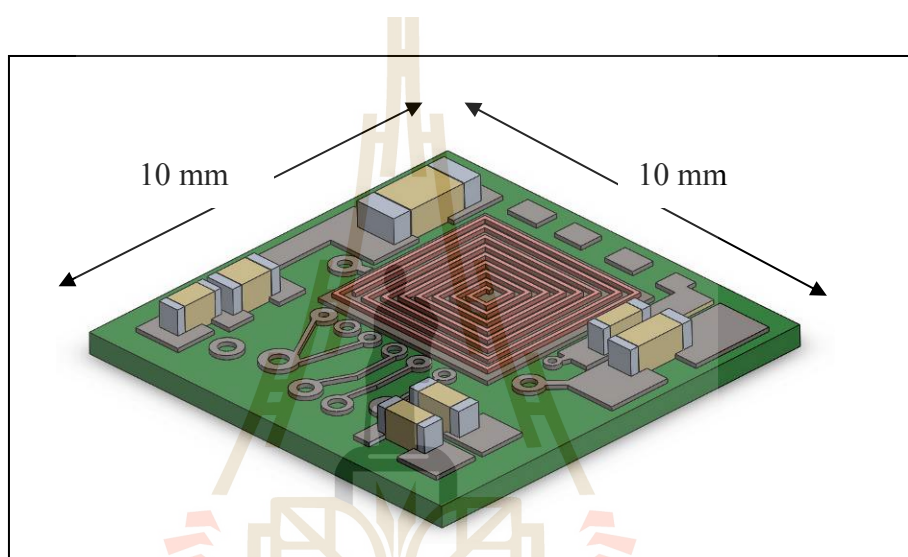


รูปที่ 6.11 ตัวเหนี่ยวนำแบบขดสปริง ปิดทับด้วยแผ่นวัสดุ

High permeability ของ Takayama (2000)



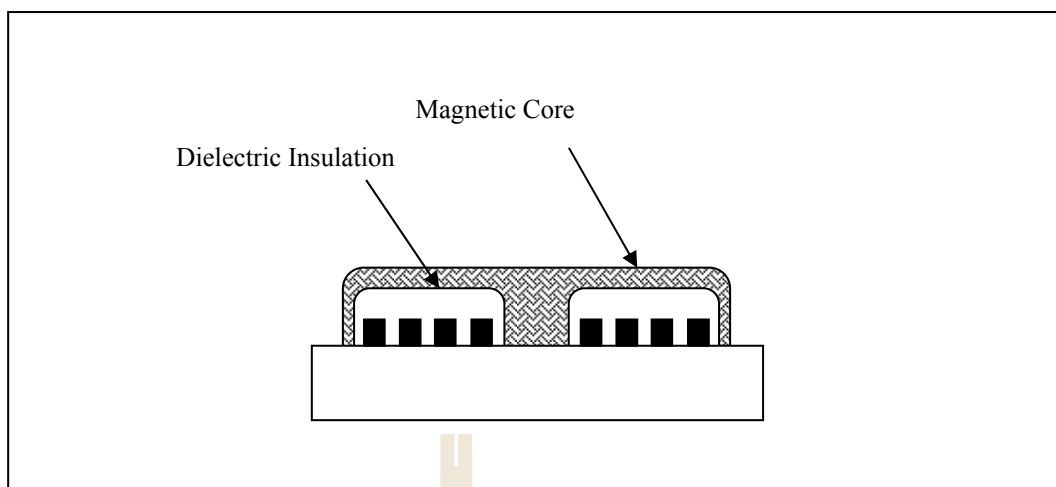
ในปี 2000 H. Nakasawa และคณะ นำเสนอการสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบขดสปริงวางในระนาบ และประยุกต์ใช้งานโดยบรรจุตัวเหนี่ยวนำไว้บนวงจรรวม ตัวเหนี่ยวนำมีขนาด  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  โดยมีค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ  $800 \text{ m}\Omega$  และค่าความเหนี่ยวนำ  $960 \text{ nH}$  วัดค่าตัวประกอบคุณภาพได้เท่ากับ 4.3 ที่ความถี่  $3 \text{ MHz}$  รูปที่ 6.12 แสดงรูปร่างของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเหนี่ยวนำเมื่อบรรจุลงบนวงจรรวม นอกจากนี้ เมื่อทดสอบใช้งาน พบว่าวงจรนี้ให้ประสิทธิภาพเท่ากับ 80% ให้กำลังขาออกเท่ากับ  $1 \text{ W}$  โดยแปลงแรงดันจาก  $5 \text{ V}$  เหลือ  $3 \text{ V}$  วงจรสวิตช์ด้วยความถี่เท่ากับ  $3 \text{ MHz}$



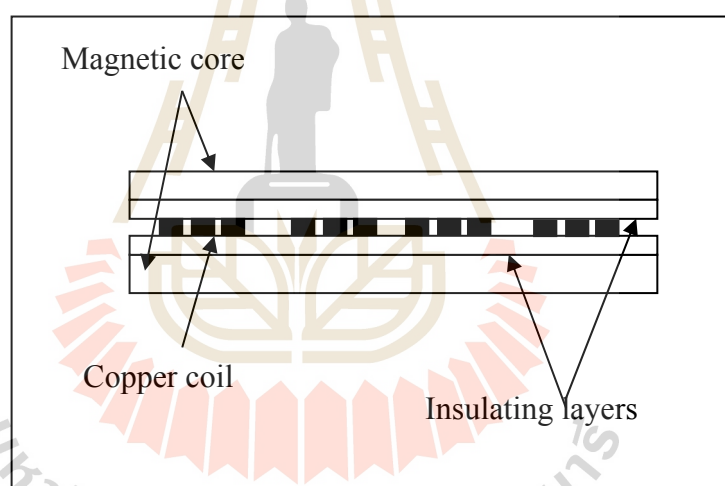
รูปที่ 6.12 DC-DC converter module and Spiral type inductive structure ของ Nakasawa และคณะ (2000)

ในปี 2001 Daniel J. Sadler และคณะ ได้ออกแบบสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบ ขดสปริงก้นหอย ด้วยกระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ใช้วัสดุ  $\text{NiFe}$  เป็นแกน ตัวเหนี่ยวนำใช้พื้นที่  $4.2 \times 4.2 \text{ mm}^2$  ได้ค่าความเหนี่ยวนำ  $1.14 \mu\text{H}$  ค่าความต้านทานกระแสตรง  $4.6 \Omega$  โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 6.13

ในปี 2002 K. H. Kim และคณะ นำเสนอการสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบขด วางในระนาบ ตัวเหนี่ยวนำมีขนาด  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  ใช้วัสดุแม่เหล็ก  $\text{FeBN}$  เคลือบด้วยการสปัตเตอร์ริงได้ค่าความต้านทาน  $1 \Omega$  และค่าความเหนี่ยวนำ  $1 \mu\text{H}$  ค่าตัวประกอบคุณภาพเท่ากับ 4 ที่ความถี่  $5 \text{ MHz}$  และได้ทดสอบใช้งานกับวงจร DC-DC Buck converter ได้ประสิทธิภาพของวงจรที่ 80% ดังรูปที่ 6.14

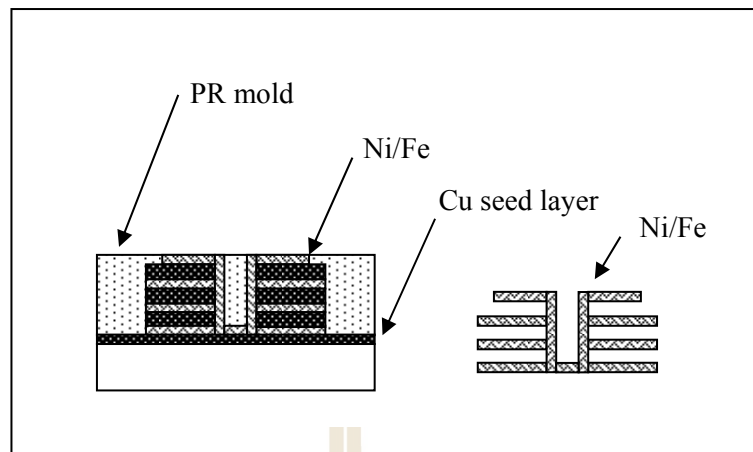


รูปที่ 6.13 UV-LIGA Spiral type inductor ของ Daniel J. Sadler และคณะ (2001)



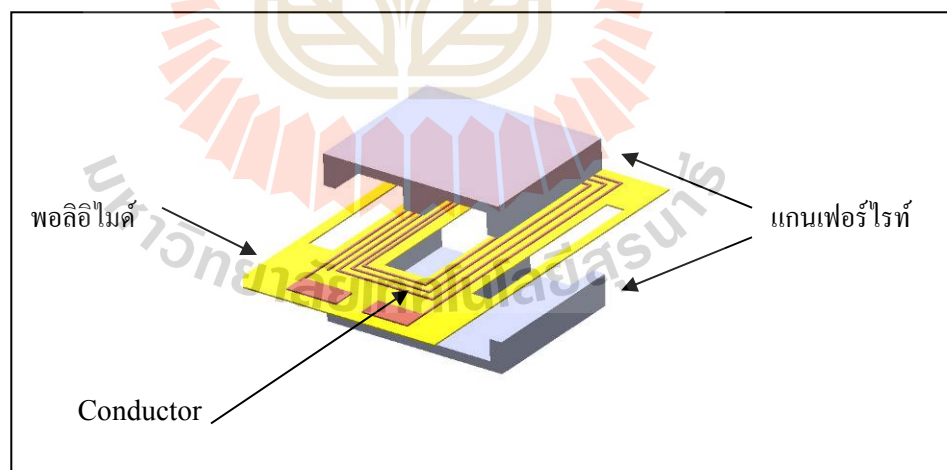
รูปที่ 6.14 ภาพตัดขวางตัวเหนี่ยวนำแบบขดสปริงคู่ ที่มีโครงสร้างแกนแบบเซนวิช  
ของ Kim และคณะ (2002)

ในปี 2003 J. W. Park และ M. Allen นำเสนอการสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบหลายชั้น โดยมี Permalloy เป็นแกน ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดบ้นพื้นที่  $11.5 \times 5.7 \text{ mm}^2$  ได้ค่าความต้านทาน  $150 \text{ m}\Omega$  และค่าความเหนี่ยวนำ  $2.3 \mu\text{H}$  ตัวประกอบคุณภาพ เท่ากับ 9.2 ที่ความถี่ 3 MHz นอกจากนี้ ยังได้ทดสอบใช้งานจริงด้วยวงจร DC-DC Boost converter ทำงานที่ความถี่ 2.2 MHz ได้กำลังงานขาออกเท่ากับ 1.9 W วงจรให้ประสิทธิภาพเท่ากับ 71% รูปที่ 6.15 แสดง โครงสร้างของ ตัวเหนี่ยวนำแบบหลายชั้น โครงสร้างนี้มีความหนา  $700 \mu\text{m}$



รูปที่ 6.15 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบหลายชั้น J. W. Park และ M. Allen (2003)

ในปี 2003 M. Saidani และ M. A. M. Gijs นำเสนอการสร้างตัวเหนี่ยวนำสร้างบนแผ่นฟิล์มพอลิอิมิด์ และสร้างแกนแม่เหล็กเฟอร์ไรท์นำมาประกอบเข้าด้วยกันแบบชุด สำหรับโครงสร้างที่เล็กที่สุดได้ค่าความต้านทาน  $2 \Omega$  และค่าความเหนี่ยวนำ  $2.1 \mu\text{H}$  ตัวประกอบคุณภาพ 9.2 ที่ความถี่ 3 MHz รูปที่ 6.16 แสดง โครงสร้างและขนาดของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรท์



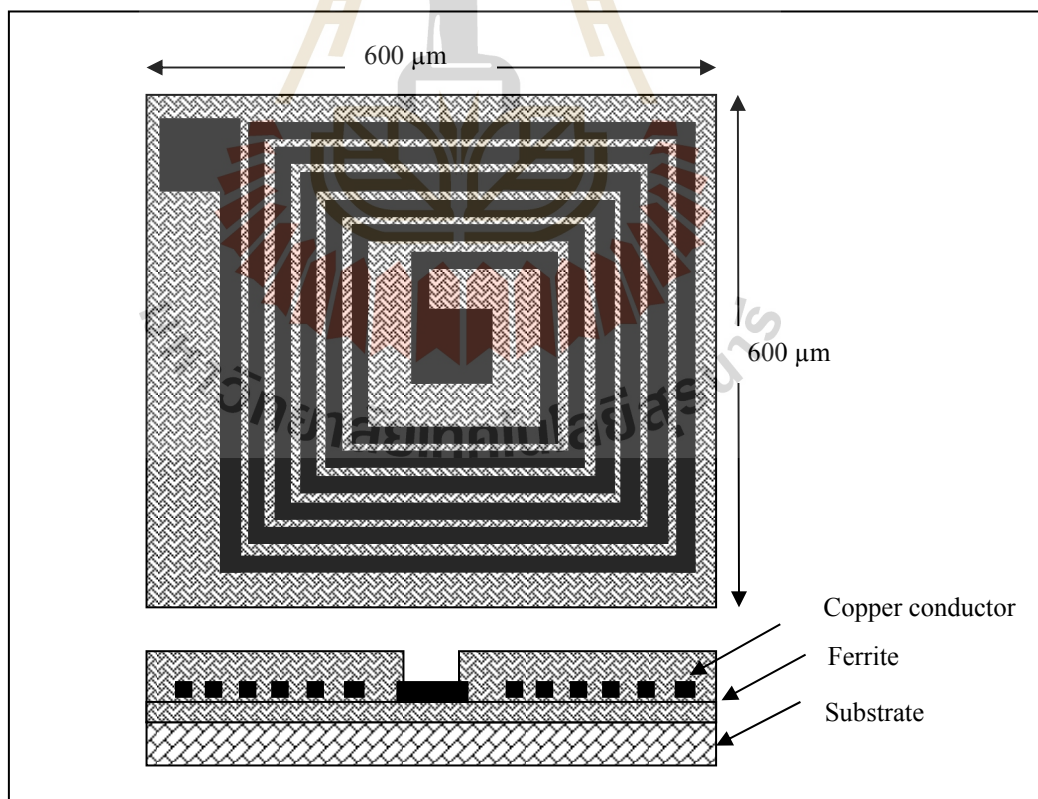
รูปที่ 6.16 แสดง โครงสร้าง และขนาดของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรท์ ของ

M. Saidani และ M. A. M. Gijs (2003)

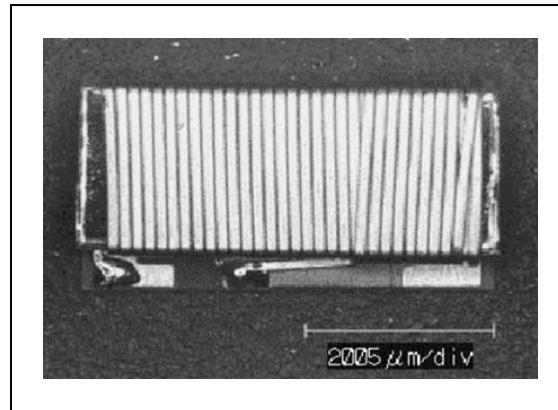
ในปี 2003 Erik J. Brandon และคณะ ได้นำเสนอโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำแบบแกนตัวชีขดลวดถูกเคลือบด้วยพอลิอิมิด์ และสารไวแสง SU-8 เพื่อเป็นฉนวน จากนั้น ชุบโลหะ NiFe ด้านบน และด้านล่างของโครงสร้าง ตัวเหนี่ยวนำมีพื้นที่  $13 \text{ mm}^2$  ได้ค่าความต้านทานกระแสตรง  $5.9 \Omega$  ความเหนี่ยวนำ  $3.2 \mu\text{H}$  ตัวประกอบคุณภาพ 13 ที่ความถี่ 1 MHz

ในปี 2003 Yasutaka Fukuda และคณะ ได้สร้างตัวเหนี่ยวนำแบบขดสปริงกันหอย และใช้วัสดุ Ferrite เป็นแกนดังรูปที่ 6.17 จะเห็นว่า ฟลักซ์สามารถวิ่งผ่านช่องว่างระหว่างเส้นตัวนำ และแกนเซรามิกมีความต้านทานสูง ทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีตัวประกอบคุณภาพสูงถึง 34.4 ที่ความถี่ 5 MHz ตัวเหนี่ยวนำมีขนาด  $36 \text{ mm}^2$  ค่าความต้านทานกระแสตรง  $670 \text{ m}\Omega$  ความเหนี่ยวนำ  $1.4 \mu\text{H}$

ในปี 2004 Fumihiko Sato และคณะ ได้ออกแบบวงจรลดระดับแรงดัน โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบฟิล์มบาง และบรรจุรวมกับวงจร ตัวเหนี่ยวนำมีพื้นที่  $11.8 \text{ mm}^2$  ได้ค่าความต้านทานกระแสตรง  $1.4 \Omega$  ความเหนี่ยวนำ  $5 \mu\text{H}$  เมื่อนำไปทดสอบใช้งาน พบว่า ได้ค่าประสิทธิภาพของวงจรสูงสุดที่ 90% และ 70% สำหรับแรงดันขาออกเท่ากับ 2 V และ 0.8 V ตามลำดับ รูปที่ 6.18 แสดงโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้

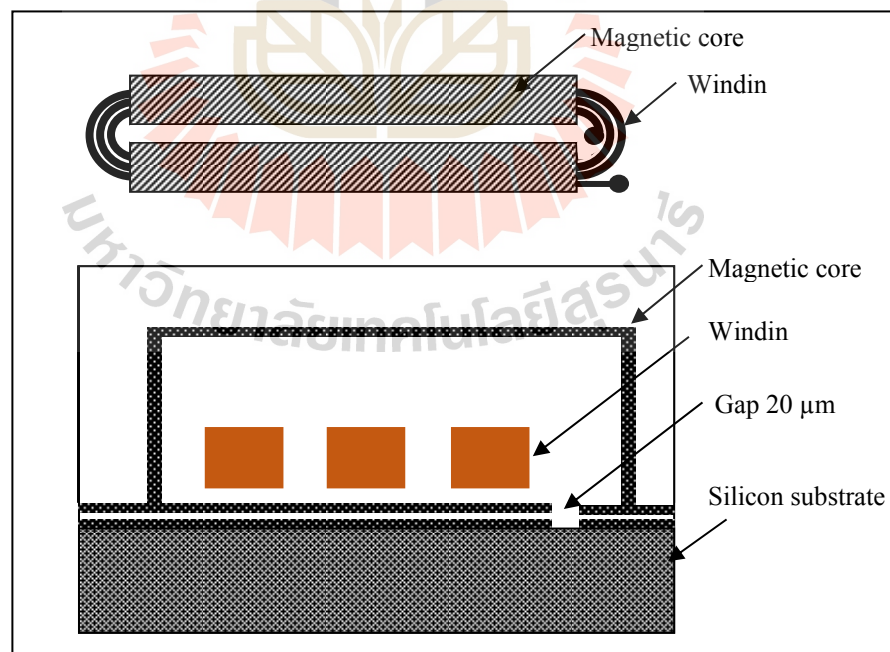


รูปที่ 6.17 แสดง โครงสร้างและขนาดของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรท์ของ Fukuda (2003)



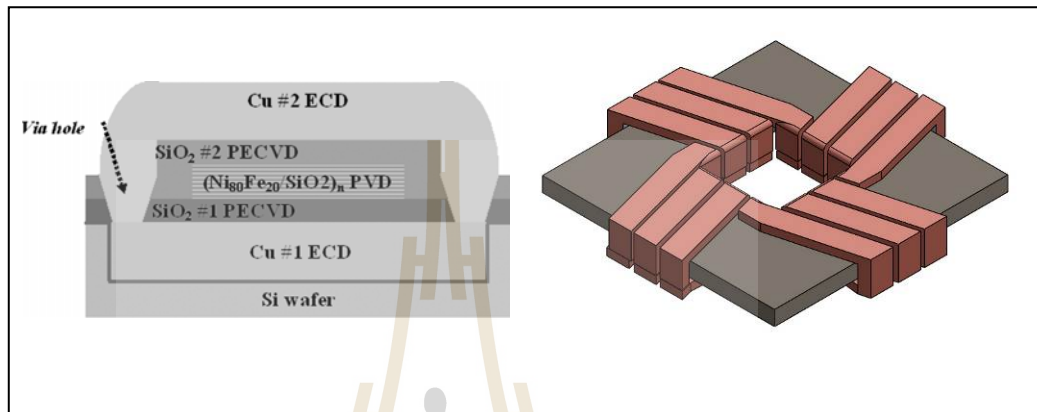
รูปที่ 6.18 แสดงโครงสร้างและขนาดของตัวเหนี่ยวนำชนิดฟิล์มบางของ Fumihiko Sato (2004)

ในปี 2005 Ningning Wang และคณะ ออกแบบสร้างตัวเหนี่ยวนำบนซิลิกอน มีค่ากระแสอิ่มตัวที่ 500 mA และ 700 mA สำหรับโครงสร้างชนิดมีช่องอากาศ และไม่มีช่องอากาศ ตามลำดับ ตัวเหนี่ยวนำมีพื้นที่ 13 mm<sup>2</sup> ได้ค่าความต้านทานกระแสตรง 261 mΩ ความเหนี่ยวนำ 160 nH ตัวประกอบคุณภาพ 6 ที่ความถี่ 4 MHz รูปที่ 6.19 แสดงตัวเหนี่ยวนำบนซิลิกอนของ N.Wang



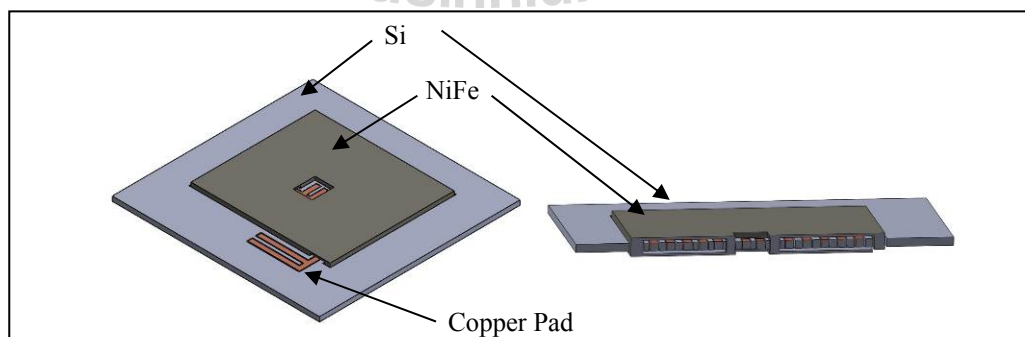
รูปที่ 6.19 แสดงโครงสร้างและขนาดของตัวเหนี่ยวนำตัวเหนี่ยวนำบนซิลิกอนของ Ningning Wang และคณะ (2005)

ในปี 2006 B. Orlando และคณะ นำเสนอโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำทอรอยด์แบบแบนราบ ดังรูปที่ 6.20 โครงสร้างมีความหนาเพียง  $200\ \mu\text{m}$  ลักษณะโครงสร้างเป็นทองแดงพันไปบนวงแหวน Permalloy มีขนาดพื้นที่  $5.6 \times 5.6\ \text{mm}^2$  มีค่าความต้านทาน  $95\ \text{m}\Omega$  และค่าความเหนี่ยวนำ  $459\ \text{nH}$  ที่ความถี่  $10\ \text{MHz}$



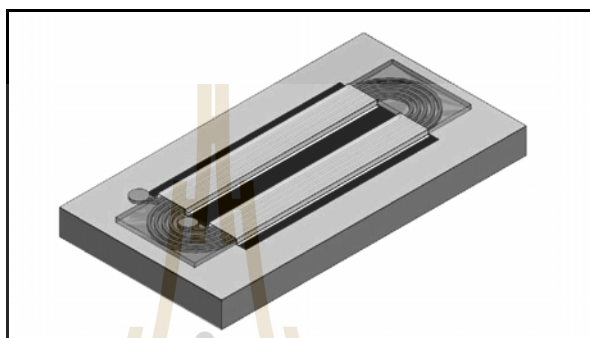
รูปที่ 6.20 แสดงโครงสร้างและขนาดของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรท์  
ของ B. Orlando และคณะ (2006)

ในปี 2007 M. Wang และคณะ นำเสนอการสร้างตัวเหนี่ยวนำโดยใช้ขดลวด หนา  $200\ \mu\text{m}$  ด้วยการกัดซิลิกอน แล้วชุบโลหะทองแดงลงไป จากนั้นชุบ Permalloy ทั้งสองด้าน โครงสร้างเป็นดังรูปที่ 6.21 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำมีพื้นที่  $4.5 \times 4.5\ \text{mm}^2$  ได้ค่าความต้านทาน  $23\ \text{m}\Omega$  และค่าความเหนี่ยวนำ  $729\ \text{nH}$



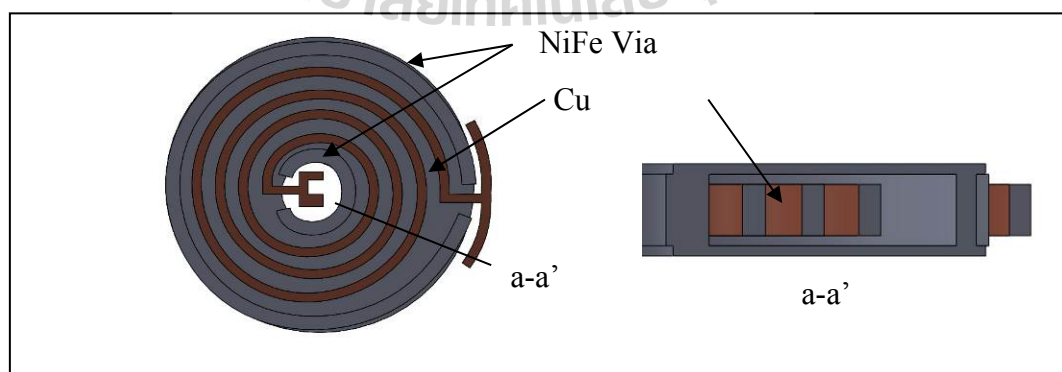
รูปที่ 6.21 แสดงโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำที่หุ้มด้วย Permalloy ของ M. Wang และคณะ (2007)

ในปี 2008 T. O'Donnell และคณะ นำเสนอตัวเหนี่ยวนำ 3 โครงสร้าง สำหรับใช้งานที่ความถี่ในระดับ 20 MHz สร้างบนฐานซิลิกอน ดังรูปที่ 6.22 เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นตัวเหนี่ยวนำมีค่าความเหนี่ยวนำลดลงเพียง 10% ที่ความถี่ 30 MHz โครงสร้างมีพื้นที่ 6.4 8.5 และ 9.4 mm<sup>2</sup> ได้ค่าความต้านทานกระแสตรง 133 218 และ 430 mΩ ความเหนี่ยวนำ 100 200 และ 300 nH และได้ทดสอบใช้งานในวงจรลดแรงดัน พบว่าวงจรให้ประสิทธิภาพสูงสุดถึง 93%



รูปที่ 6.22 แสดงโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำบนซิลิกอน ของ T. O'Donnell และคณะ (2008)

ในปี 2011 M. Wang และคณะ นำเสนอการสร้างตัวเหนี่ยวนำโดยการกัดซิลิกอน บวกกับการใช้สารไวแสง SU-8 เพื่อสร้างเป็นโครงสร้างทอรอยด์ ซึ่งขั้นตอนการสร้างค่อนข้างซับซ้อน วัสดุแม่เหล็กใช้ Permalloy เช่นกัน โครงสร้างมีพื้นที่ 3 x 3 mm<sup>2</sup> วัสดุค่าความต้านทานได้เท่ากับ 9.1 mΩ และค่าความเหนี่ยวนำ 135 nH รูปที่ 6.23 แสดงโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ เส้นลวดมีความสูง 200 μm



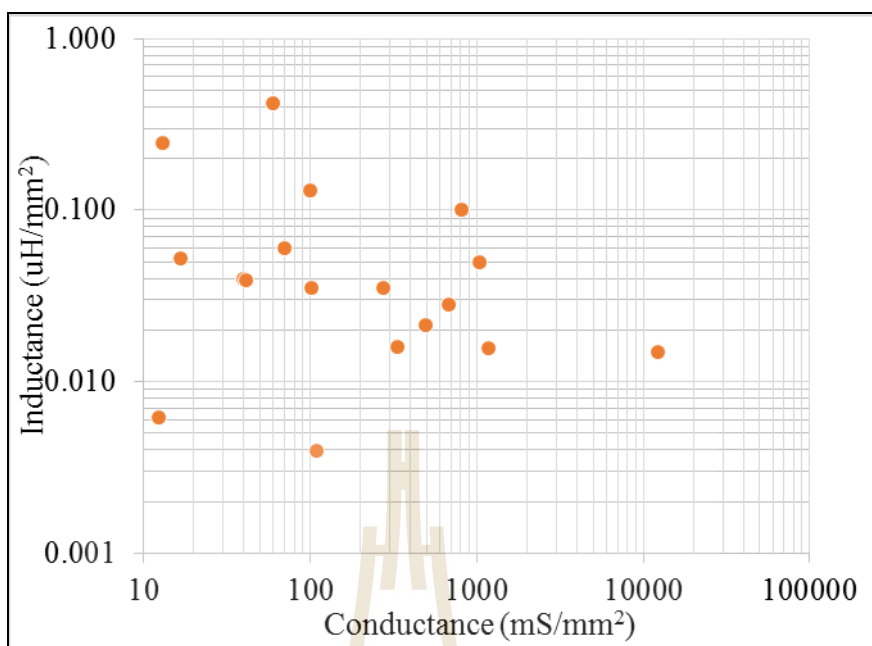
รูปที่ 6.23 แสดงโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำทรงทอรอยด์ที่มีแกนเป็น Permalloy M. Wang (2011)

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพื่อให้ง่ายในการเปรียบเทียบค่าความต้านทานกระแสตรง และค่าความเหนี่ยวนำ ต่อพื้นที่ จึงนำมาสรุปได้ดังตารางที่ 6.1 และนำข้อมูลมาวาดกราฟเพื่อเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 6.24 ซึ่งจะเห็นว่าแนวทางการพัฒนาตัวเหนี่ยวนำของนักวิจัย คือ เพิ่มค่าความเหนี่ยวนำต่อพื้นที่ และลดค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอน เพื่อสร้างตัวเหนี่ยวนำให้มีขนาดเล็ก แต่มีค่าความต้านทานต่ำ และมีความเหนี่ยวนำต่อพื้นที่ สูงขึ้น ซึ่งจะกล่าวในส่วนของการออกแบบต่อไป

ตารางที่ 6.1 สรุปคุณลักษณะสมบัติของตัวความเหนี่ยวนำ ของงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ลำดับ ที่	ปี	Authors	Area (mm <sup>2</sup> )	Q <sub>max</sub> @ f (MHz)	L (uH)	L (uH/mm <sup>2</sup> )	R <sub>dc</sub> (Ω)	Conductance (mS/mm <sup>2</sup> )
1	1994	Sato et al.	19.3	10 @ 10	1.000	0.052	3.100	16.8
2	1998	Ahn. et al.	4.0	1.5 @ 1	0.400	0.100	0.308	811.7
			4.0	1.0 @ 1	0.220	0.050	0.240	1041.7
3	2000	Nakazawa et al.	16.0	4.3@3	0.960	0.060	0.900	69.4
4	2001	Daniel J. et al.	17.6	-	1.140	0.006	4.600	12.3
5	2002	Ki Hyeon Kim et al.	25.0	4@5	1.000	0.040	1.000	40.0
6	2002	J.W. Park et al.	304.0	50@0.1	1.200	0.004	0.030	109.6
7	2003	M. Saidani	4.0	<1	2.100	0.525	2.500	100.0
8	2003	Jin-Woo Park et al.	65.6	9.2@3	2.300	0.035	0.150	101.7
9	2003	Erik J. Brandon	13.0	1.3 @ 1	3.200	0.246	5.900	13.0
10	2003	Fukuda	36.0	34.4@5	1.400	0.039	0.670	41.5
11	2004	F. sato	4.4	-	5.000	1.136	1.400	60.1
12	2005	N. Wang	5.7	6@4	0.160	0.028	0.261	335.7
13	2006	B. Orlando	31.4	-	0.500	0.016	0.095	1174.8
14	2008	T. O'Donnell	6.4	-	0.100	0.016	0.133	490.6
			9.4	-	0.200	0.021	0.218	273.3
			8.5	-	0.300	0.035	0.430	673.4
15	2011	M. Wang	9.0	-	0.134	0.015	0.009	12210.0





รูปที่ 6.24 เปรียบเทียบค่าความเหนียวและค่าความนำ ต่อพื้นที่ ของตัวเหนียวในงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

### 6.3 การออกแบบตัวเหนียว

ตัวเหนียวในงานวิจัยนี้ เน้นการออกแบบเพื่อสร้างตัวเหนียว ที่มีค่าความต้านทาน กระแสตรงต่ำ โดยใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอน เพื่อสร้างชิ้นงานที่มีความสูงมากกว่าความ กว้าง (high-aspect ratio) จะเห็นได้จากงานวิจัยข้างต้น นักวิจัยต้องการสร้างตัวเหนียวที่มีค่า ความต้านทานต่ำ โดยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ หากออกแบบให้เส้นลวดมีความกว้าง มาก จะทำให้ตัวเหนียว ใช้พื้นที่มาก จึงไม่เหมาะที่จะบรรจุลงบนวงจรรวม นักวิจัยจึงนิยมสร้าง ขดลวดให้มีความกว้างไม่มาก เพื่อให้ตัวเหนียวมีขนาดเล็ก แต่จะออกแบบให้ลวดตัวนำมี ความสูงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 6.8 จะเห็นว่าเส้นลวดที่มีความหนามากกว่า จะมีค่าความต้านทานลดลง ตามสมการที่ 6.2 แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการในการสร้างโครงสร้างสามมิติ ให้มีความสูง ดังกล่าวยังสร้างได้ไม่ง่าย วิธีการสร้างของนักวิจัย มีหลายวิธี เช่น ใช้การกัดซิลิกอนเพื่อเป็นแม่พิมพ์ ของลวดทองแดง (Wang *et al.*, 2008) ซึ่งต้องมีการทำ deposition ชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังมีวิธีการกัดซิลิกอน แล้วเคลือบสารไวแสง SU-8 เป็นแม่พิมพ์ เพื่อเป็นฉนวน งานวิจัย ในส่วนนี้จึงมุ่งเน้น ไปที่การสร้างตัวเหนียวสำหรับวงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง โดย พิจารณาคูณสมบัติที่สำคัญสามประการ คือ ค่าความต้านทานกระแสตรง ค่าความเหนียว และ

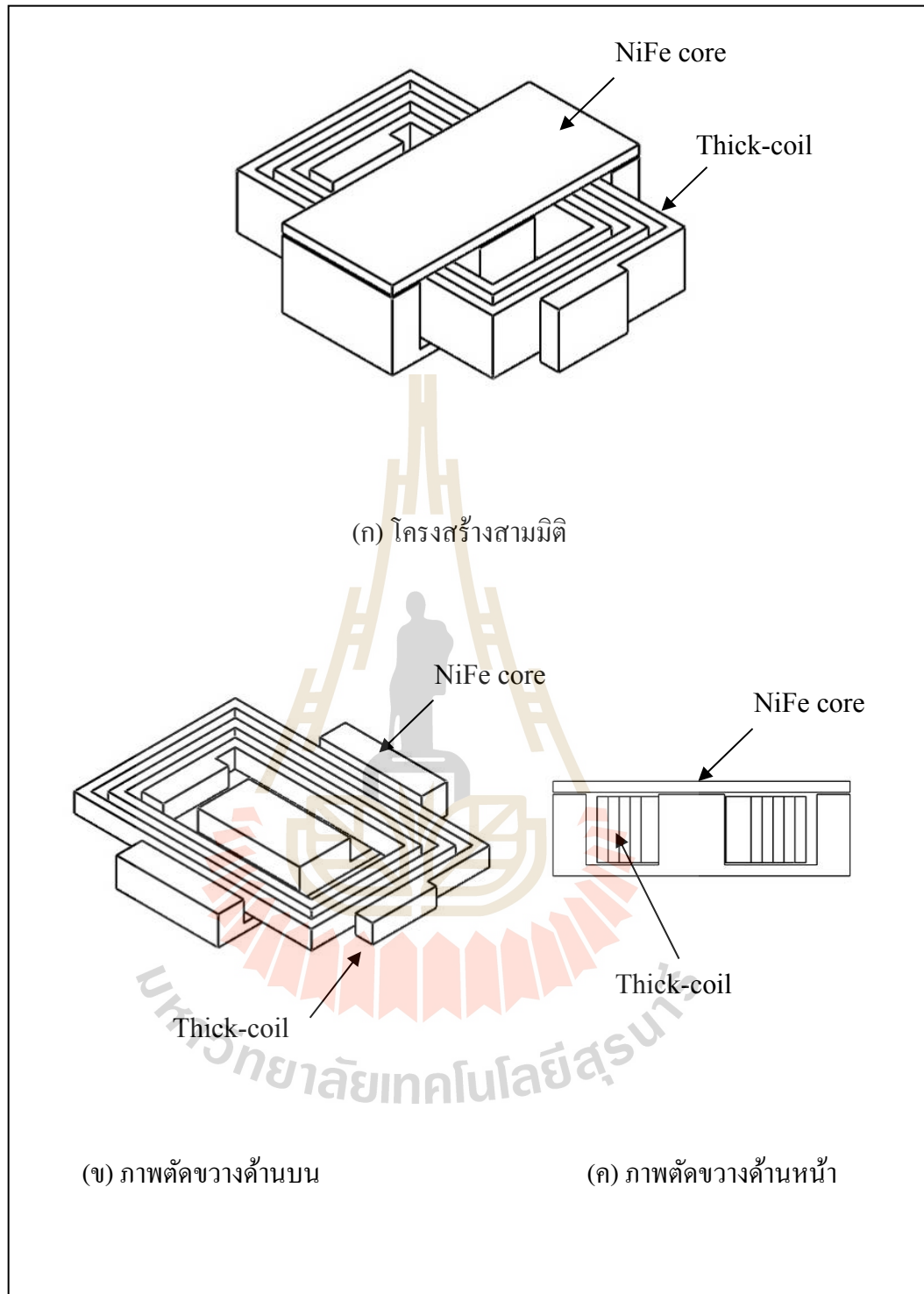
ค่ากระแสในตัว ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบสร้าง เน้นการใช้งานที่ความถี่ระดับ MHz ค่าความเหนี่ยวนำจึงออกแบบสร้างให้อยู่ในช่วง 50 ถึง 1500 nH ส่วนค่าความต้านทานไม่เกิน 500 mΩ และกระแสในตัว อยู่ในช่วง 100 ถึง 1000 mA ในงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำ 2 แบบ ซึ่งแบ่งโดยกระบวนการสร้างที่ต่างกัน คือ โครงสร้าง SUT-L1 ประยุกต์ใช้กระบวนการสร้างแบบวางซ้อน (stacking) เพื่อลดอัตราการเสียหายของชิ้นงาน โดยสร้าง โครงสร้างทีละชั้น แล้วจึงนำมาประกอบเข้าด้วยกัน ส่วน โครงสร้าง SUT-L2 เป็นการพัฒนากระบวนการสร้างให้มีความง่ายมากขึ้น แต่กระบวนการสร้าง โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำทั้งสองวิธี เน้นการออกแบบกระบวนการสร้างแบบเป็นชุด (batch process) ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำทั้งสองชนิด มีดังนี้

### 6.3.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L1

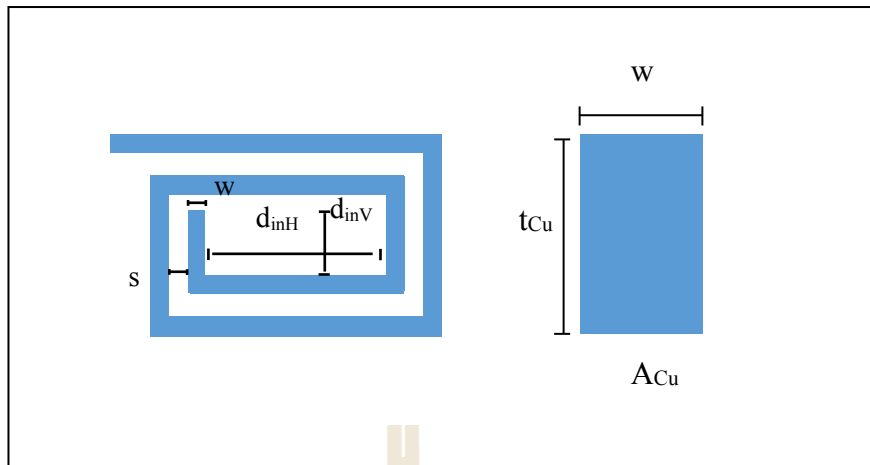
เมื่อพิจารณา โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 จะเห็นว่าต้องสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีแบบหลายชั้น แต่ด้วยความซับซ้อนของโครงสร้าง ทำให้มีข้อเสียคือ โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดความเสียหาย เมื่อผ่านกระบวนการหลายชั้นตอนมีมากขึ้น ดังนั้น ในงานวิจัยส่วนนี้ได้ออกแบบกระบวนการสร้างแบบใหม่ คือ แยกสร้าง โครงสร้างในแต่ละส่วนก่อน แล้วนำมาประกอบเข้าด้วยกันในภายหลัง แบ่งเป็น 3 ชุด คือ ชุดขดลวดทองแดง แกนด้านบน และแกนด้านล่าง โครงสร้างที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 6.25 จะเห็นว่า โครงสร้างมีลักษณะเป็นแกน E-I และมีขดลวดทองแดงฝังอยู่ภายใน และมีช่องอากาศ เพื่อเพิ่มกระแสในตัวให้มีค่าสูงขึ้น

ขดลวดทองแดงของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 เป็นขดลวดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 6.26 ในการคำนวณค่าความต้านทาน จำเป็นต้องทราบความยาวของขดลวด จากโครงสร้างดังกล่าว จะได้สมการความยาวของเส้นลวดตัวนำ ดังสมการที่ 6.3 และสามารถคำนวณค่าความต้านทานของเส้นลวดด้วยสมการที่ 6.4

เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อใช้งานตัวเหนี่ยวนำได้ง่าย จึงออกแบบจุดเชื่อมต่อสาย วัสดุตรงข้าม ดังนั้น ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบ จะเป็นจำนวนรอบ บวกกับครึ่งรอบ ซึ่งตัวเหนี่ยวนำที่ต้องการทดสอบสร้าง ต้องการค่าความเหนี่ยวนำในช่วง 100 nH จึงออกแบบสร้างชนิด 3.5 รอบ และ 5.5 รอบตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณค่าความต้านทาน จะได้เส้นกราฟของตัวต้านทานชนิด 3.5 รอบ เทียบกับความหนา ดังรูปที่ 6.27 จะเห็นว่า ที่ความหนา 400 μm เส้นตัวนำกว้าง 50 μm ตัวนำมีค่าความต้านทานน้อยกว่า 20 mΩ



รูปที่ 6.25 โครงสร้างจำลองของตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L1

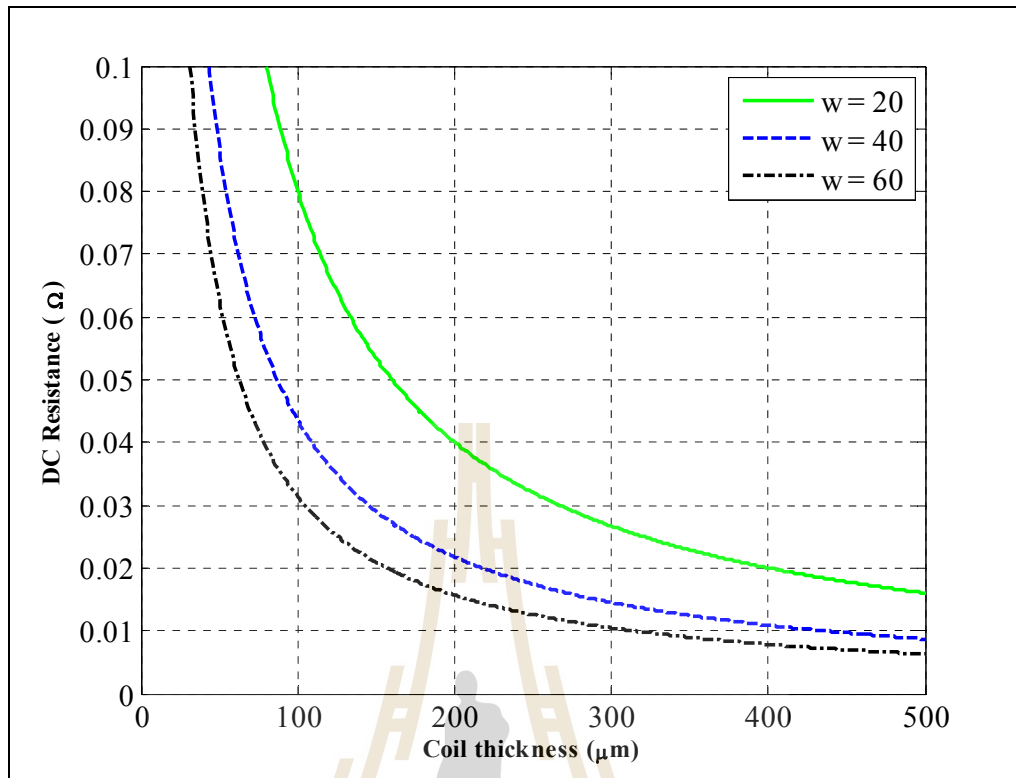


รูปที่ 6.26 โครงสร้างจำลองของขดลวดตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L1

$$l_{Cu} = [2 \cdot n \cdot d_{inV} + (2n^2 - n) \cdot (w + s)] + [2 \cdot n \cdot d_{inH} + (2n^2 - n) \cdot (w + s)] + 4nw \quad (6.3)$$

$$R_{DC} = \frac{\rho_{Cu}}{t_{Cu} \cdot w} [[2 \cdot n \cdot d_{inV} + (2n^2 - n) \cdot (w + s)] + [2 \cdot n \cdot d_{inH} + (2n^2 - n) \cdot (w + s)] + 4nw] \quad (6.4)$$

เมื่อ	$l_{Cu}$	คือ ความยาวเส้นลวด
	$R_{DC}$	คือ ความต้านทานเส้นลวด
	$n$	คือ จำนวนรอบ
	$d_{inV}$	คือ ความสูงแกนใน
	$d_{inH}$	คือ ความกว้างแกนใน
	$s$	คือ ระยะห่างระหว่างเส้นตัวนำ
	$w$	คือ ความกว้างเส้นตัวนำ
	$t_{Cu}$	คือ ความหนาของลวดตัวนำ
	$\rho_{Cu}$	คือ สภาพต้านทานของทองแดง



รูปที่ 6.27 ค่าความต้านทานของขดลวดเทียบกับความสูง ของตัวนำ

ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบสร้างในส่วนนี้ ออกแบบเส้นตัวนำให้มีความกว้าง 50  $\mu\text{m}$  เส้นตัวนำวางห่างกัน 50  $\mu\text{m}$  ความกว้างแกนใน 1700  $\mu\text{m}$  ความยาวแกนใน 1100  $\mu\text{m}$  เส้นลวดมีความหนา 400  $\mu\text{m}$  จากสมการที่ 6.4 สามารถคำนวณค่าความต้านทานกระแสดตรงของตัวเหนี่ยวนำได้ดังตารางที่ 6.2 โดยตัวเหนี่ยวนำมีค่าความต้านทานกระแสดตรง 20 m $\Omega$  และ 36 m $\Omega$  สำหรับตัวเหนี่ยวนำชนิด 3.5 และ 5.5 รอบตามลำดับ

ตารางที่ 6.2 ค่าความต้านทานกระแสดตรงจากการออกแบบตามโครงสร้าง SUT-L1

Inductor	$R_{DC \text{ Calc}}(\text{m}\Omega)$	Coil thickness ( $\mu\text{m}$ )	Coil width ( $\mu\text{m}$ )
3.5 turns	23.5	350	50
5.5 turn	32.5	350	50

ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำโดยทั่วไปสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.5 แต่ สำหรับตัวเหนี่ยวนำโครงสร้างนี้ แกนในแต่ละส่วน มีพื้นที่หน้าตัดต่างกัน คือ แกนที่อยู่ชั้นเดียวกับ ขดลวด ออกแบบให้มีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถชุบโลหะ NiFe ได้ง่าย และไม่เกิด

ฟองอากาศ ส่วนแกนด้านบนและด้านล่าง ออกแบบให้มีความหนาประมาณ 100 ถึง 150  $\mu\text{m}$  เป็นความหนาต่ำสุดเท่าที่สามารถสร้างได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาวงจรแม่เหล็กจากรูปที่ 6.28 จะเห็นว่าแกนมีหลายขนาด รวมไปถึงมีช่องอากาศในโครงสร้างด้วย ดังนั้น เพื่อให้ง่ายในการออกแบบ จึงเลือกใช้สมการที่ 6.6 .ในการคำนวณ จะเห็นว่า ผลรวมของค่า reluctance จะเป็นไปตามสมการที่ 6.8

คุณสมบัติสำคัญอีกประการของตัวเหนี่ยวนำที่ต้องออกแบบ คือ ค่ากระแสอิ่มตัวของแกน หมายถึง ความสามารถในการเก็บพลังงานของตัวเหนี่ยวนำ หากใช้เกินจุดอิ่มตัว จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำลดลงอย่างรวดเร็ว ค่ากระแสอิ่มตัวของแกนตัวเหนี่ยวนำ สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 6.9 หากแกนไม่เกิด skin effect ค่ากระแสอิ่มตัวจะสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 6.10 จากสมการนี้ จะเห็นว่า การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของแกน ไม่ได้เป็นการเพิ่มความสามารถในการรองรับกระแสของตัวเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r A_c N^2}{l_m} \quad (6.5)$$

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_T} \quad (6.6)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A_c} \quad (6.7)$$

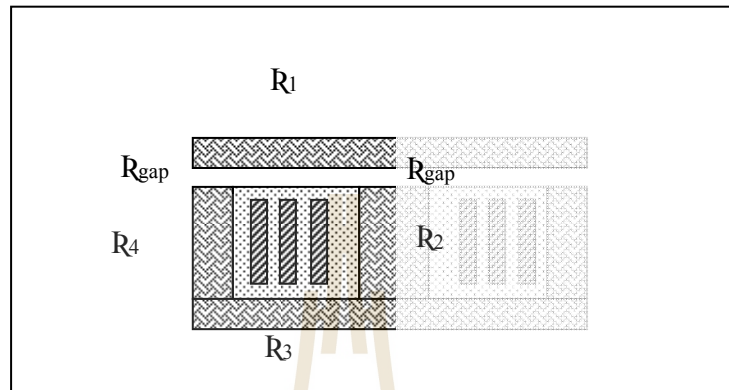
$$\mathfrak{R}_T = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 + \dots + \mathfrak{R}_n \quad (6.8)$$

$$I_{sat} = \frac{NB_{sat} A_c}{L} \quad (6.9)$$

$$I_{sat} = \frac{B_{sat} l_m}{\mu_0 \mu_r N} \quad (6.10)$$

$$I_{sat} = \frac{B_{sat} A_c \mathfrak{R}}{N} \quad (6.11)$$

- เมื่อ  $\mu_0$  คือ ค่า permeability ของอากาศมีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7} (H/m, Wb/A \cdot m)$   
 $\mu_r$  คือ ค่า permeability ของวัสดุมีค่าเท่ากับ 550  
 $\mathcal{R}$  คือ ค่า reluctance ของวัสดุ



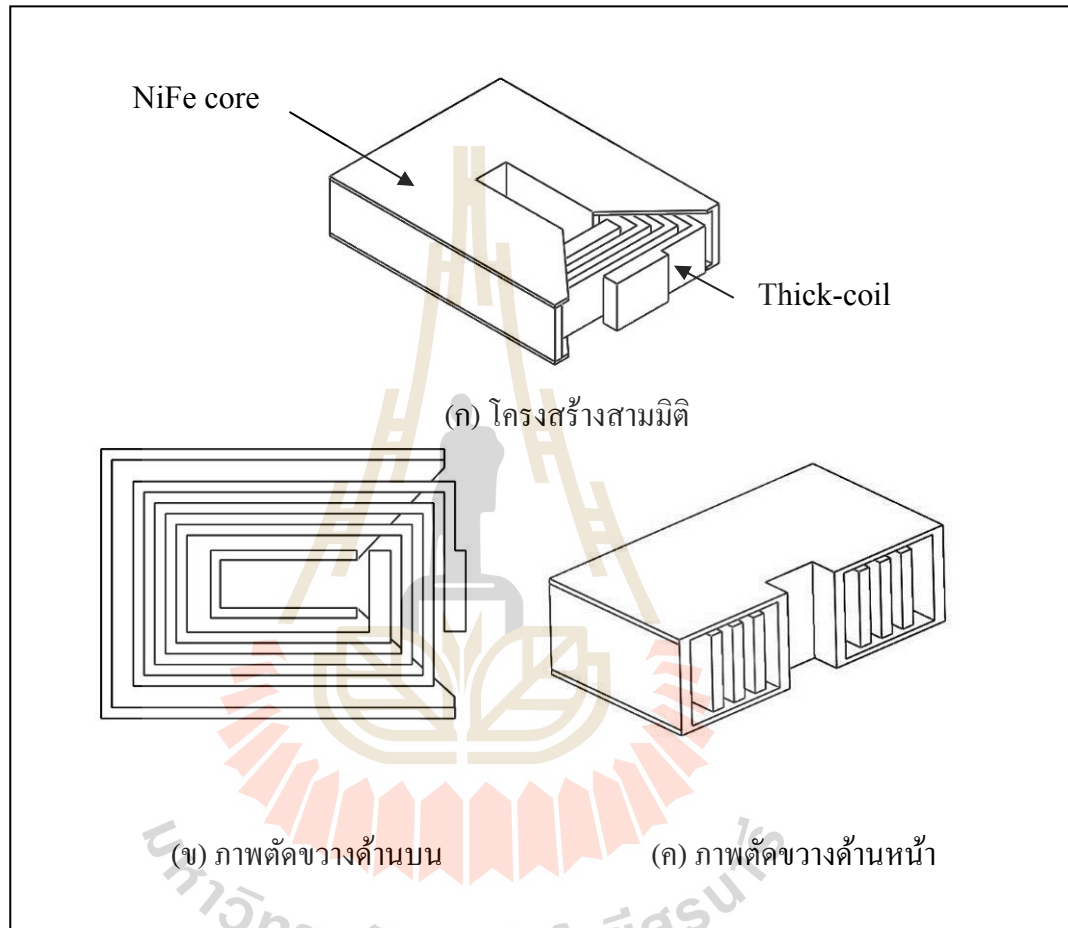
รูปที่ 6.28 แบบจำลองตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L1 สำหรับใช้คำนวณ

### 6.3.2 การออกแบบ ตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L2

ตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L2 เป็นตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบกระบวนการสร้างใหม่ เพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการสร้าง ตัวเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้น จะไม่ใช่ช่องอากาศในแกน ซึ่งส่งผลให้ตัวเหนี่ยวนำอิมิต์ที่กระแสดำกว่าตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 แต่ข้อดีของการไม่ใช่ช่องอากาศ คือ จะได้ค่าสภาพซึมซาบสัมพัทธ์ (effective permeability :  $\mu_e$ ) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นด้วย โครงสร้างที่ได้ออกแบบสร้าง เป็นดังรูปที่ 6.29 จะเห็นว่า โครงสร้างมีลักษณะเป็นขดลวดหนา ฟังอยู่ภายในเนื้อสารไวแสง และหุ้มด้วยโลหะ NiFe ซึ่งมีความหนาไม่เกิน  $20 \mu m$  ทำให้โครงสร้างนี้ มีความสูง น้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร และด้วยกระบวนการลิโกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ จะช่วยให้ตัวเหนี่ยวนำมีค่าความต้านทานกระแสตรงต่ำในระดับ มิลลิโอห์ม โดยใช้พื้นที่ไม่เกิน 25 ตารางมิลลิเมตร

ตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ที่ออกแบบสร้าง แบ่งเป็น 4 ชนิดด้วยกัน คือ 3 รอบ 5 รอบ 10 รอบ และ 16 รอบ ออกแบบเพื่อใช้งานที่ความถี่ในช่วง 1 ถึง 20 MHz ซึ่งในการคำนวณความยาวของเส้นตัวนำ สามารถใช้สมการร่วมกับโครงสร้าง SUT-L1 ได้ ดังนั้นจากสมการที่ 6.4 สามารถคำนวณค่าความต้านทานได้ดังตารางที่ 6.3 โครงสร้างที่ออกแบบ มีความสูง  $250 \mu m$  มีความกว้างของเส้นลวด  $30 \mu m$  จากตารางจะเห็นว่า ตัวเหนี่ยวนำชนิด 16 รอบ มีค่าความต้านทานสูงสุด คือ  $234 m\Omega$  และค่าความต้านทานต่ำสุด ที่  $23 m\Omega$  สำหรับตัวเหนี่ยวนำชนิด 3 รอบ แต่อย่างไรก็ตาม

ในการสร้างชิ้นงานจริง อาจมีความคลาดเคลื่อนของความกว้างเส้นตัวนำ เนื่องจากขั้นตอนการสร้างฟิล์มทึบแสง และการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ ดังนั้นในตอนท้ายจึงจะต้องวัดความต้านทานจากตัวเหนี่ยวนำที่สร้างได้จริง เทียบกับการคำนวณจากขนาดที่สร้างได้จริง เพื่อวิเคราะห์ผลอีกครั้ง



รูปที่ 6.29 ตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L2

ตารางที่ 6.3 ค่าความต้านทานกระแสตรงจากการคำนวณตามโครงสร้างที่ออกแบบ

Inductor	$R_{DC\ Calc}(m\Omega)$	Coil thickness ( $\mu m$ )	Coil width ( $\mu m$ )
3 turns	23.0	250	30
5 turn	43.7	250	30
10 turn	114.2	250	30
16 turn	234.4	250	30



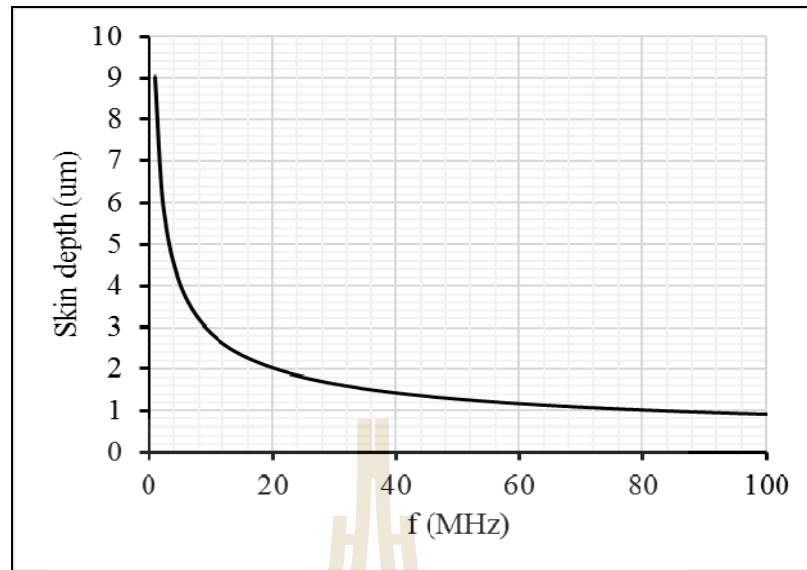
การออกแบบในขั้นถัดไป เป็นการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งจะต้องคำนึงถึงค่า magnetic skin depth ของโลหะ NiFe โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.12 จะเห็นว่า แกนที่ดีควรมีค่าความต้านทานสูง แต่อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ ใช้โลหะ NiFe ซึ่งสามารถชุบขึ้นรูปได้ด้วยไฟฟ้า แต่วัสดุมีค่าความนำไฟฟ้าสูง จึงทำให้เกิด skin effect ค่อนข้างสูงดังรูปที่ 6.30 และคุณสมบัติของ NiFe ที่สร้างขึ้นแสดงในตารางที่ 6.4 เมื่อพิจารณาที่ความถี่ต่าง ๆ จะเห็นว่า ที่ความถี่ 1 MHz แกนจะมีความหนาเพียง 9  $\mu\text{m}$  ดังนั้น ตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 จะออกแบบให้แกนมีความหนาไม่เกิน 10  $\mu\text{m}$  หากใช้ความหนามากกว่านี้ จะมีผลเสีย คือ กำลังสูญเสียในแกนจะมีค่าเพิ่มขึ้น จากกระแสของเอ็ดดี้ นอกจากนี้ เนื่องจากปัจจัยทางโครงสร้าง จากการทดสอบหุบโลหะ NiFe พบว่า ความหนา 10  $\mu\text{m}$  โครงสร้างมีความแข็งแรงเพียงพอ แผ่นโลหะไม่ฉีกขาดจากความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ ดังนั้น ในงานวิจัยส่วนนี้ จะสร้างแกนตัวเหนี่ยวนำให้มีความหนาประมาณ 10  $\mu\text{m}$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad (6.12)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ สภาพต้านทาน  
 $f$  คือ ความถี่ (Hz)  
 $\delta$  คือ ความลึกผิว (m)  
 $\mu_0$  คือ ค่า permeability ของอากาศ  
 $\mu_r$  คือ ค่า permeability ของวัสดุ

ตารางที่ 6.4 คุณสมบัติของวัสดุ NiFe ที่ได้จากการวัด

Electroplate Current density	5 mA/cm <sup>2</sup>
Permeability	550
Conductivity	5.66x10 <sup>6</sup> ( $\Omega\text{m}$ ) <sup>-1</sup>
Saturation Flux density	1.0 T
Skin depth @ 1 MHz	9.0 $\mu\text{m}$
Skin depth @ 5 MHz	4.0 $\mu\text{m}$
Skin depth @ 10 MHz	2.9 $\mu\text{m}$
Skin depth @ 20 MHz	2.0 $\mu\text{m}$



รูปที่ 6.30 Skin depth ของ NiFe เทียบกับค่าความถี่

จากโครงสร้างในรูปที่ 6.31 จะได้ขนาดพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของแกนตามสมการที่ 6.13 ซึ่งได้จากการหาสมการตามโครงสร้างดังกล่าว เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า เป็นผลคูณระหว่างความหนาของแกน คูณกับความยาวเส้นรอบวงเฉลี่ยของแกนตัวเหนี่ยวนำ ส่วนความยาวของวงจรแม่เหล็ก  $l_m$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.14 โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นไปตามรูปที่ 6.31

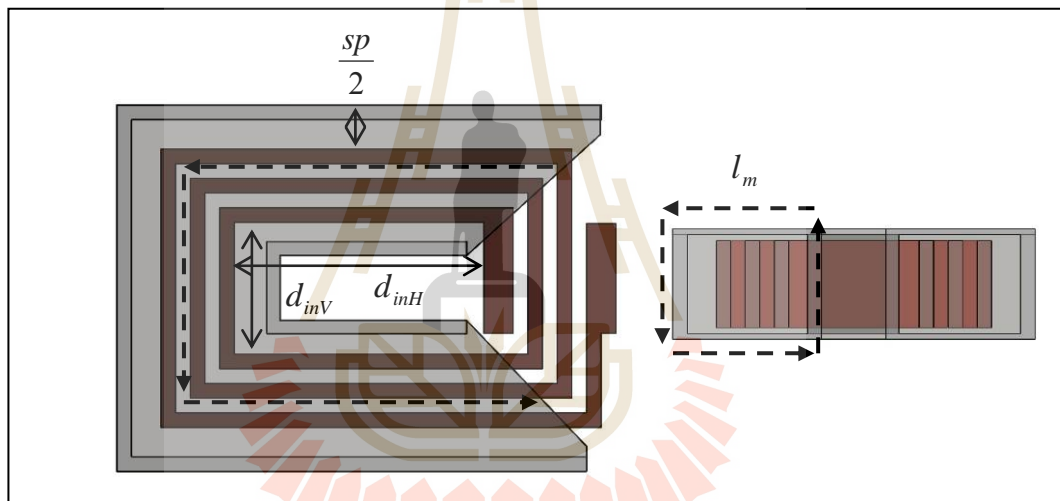
$$A_c = t \left\{ [2d_{inv} + (2n-3)(s+w)] + \frac{1}{2} [2d_{inH} + (2n-3)(s+w)] \right\} \quad (6.13)$$

$$l_m = 2[n(s+w) + 2sp + t_{Cu} + t_{insu}] \quad (6.14)$$

$$I_{sat} = \frac{n \cdot B_{sat} \cdot A_c}{L} = \frac{l_m \cdot B_{sat}}{\mu_0 \mu_r n} \quad (6.15)$$

เมื่อ  $A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน  
 $n$  คือ จำนวนรอบ  
 $d_{inv}$  คือ ความสูงแกนใน

เมื่อ	$d_{inH}$	คือ ความกว้างแกนใน
	$s$	คือ ระยะห่างระหว่างเส้นตัวนำ
	$w$	คือ ความกว้างเส้นตัวนำ
	$l_m$	คือ ความยาววงจรแม่เหล็ก
	$sp$	คือ ระยะระหว่างเส้นตัวนำและแกน
	$t_{Cu}$	คือ ความหนาของลวดตัวนำ
	$t_{insu}$	คือ ความหนาของชั้นฉนวนที่ใช้แยกขดลวดและแกน
	$I_{sat}$	คือ กระแสอิ่มตัวของแกน
	$B_{sat}$	คือ ความหนาแน่น ฟลักซ์อิ่มตัว



รูปที่ 6.31 พารามิเตอร์ โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานของเส้นลวดในรูปที่ 6.27 จะเห็นว่าที่ความหนาของเส้นลวด  $250\ \mu\text{m}$  เส้นลวดมีค่าความต้านทานต่ำกว่า 50 มิลลิโอห์ม เมื่อพิจารณาค่า skin depth ของลวดทองแดง จะพบว่า ที่ความถี่ 20 MHz เส้นลวดจะมีความลึกผิวเพียง  $32\ \mu\text{m}$  จึงไม่จำเป็นที่จะออกแบบเส้นลวดให้มีความกว้างมากกว่าค่าดังกล่าว นอกจากนี้ เพื่อให้ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดเล็ก จึงออกแบบให้เส้นตัวนำมีความกว้างต่ำสุดเท่าที่จะสามารถสร้างได้นั้นคือ  $30\ \mu\text{m}$  ขดลวดมีระยะห่างระหว่างเส้น  $30\ \mu\text{m}$  มีความหนา  $250\ \mu\text{m}$  ฉนวนที่เคลือบตัวนำหนา  $30\ \mu\text{m}$  ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด 0.9 ระยะห่างระหว่างแกนและตัวนำ  $60\ \mu\text{m}$  ความสูงแกนใน  $560\ \mu\text{m}$  ความกว้างแกนใน

880  $\mu\text{m}$  เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปคำนวณด้วยสมการที่ 6.13 ถึง 6.15 จะได้คุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวเหนี่ยวนำชนิด 3 5 10 และ 16 รอบ ตามตารางที่ 6.5

จากผลของการออกแบบตัวเหนี่ยวนำตามตารางที่ 6.5 เมื่อพิจารณาค่ากระแสอิ่มตัว จะเห็นว่า ตัวเหนี่ยวนำสามารถใช้ได้ที่กระแสสูงสุด 599 mA สำหรับตัวเหนี่ยวนำชนิด 3 รอบ และตัวเหนี่ยวนำชนิด 16 รอบสามารถใช้งานได้ที่กระแสสูงสุด 239 mA ซึ่งการวัดคุณลักษณะสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ จะอยู่ในหัวข้อถัดไป คือ การวัดค่าความต้านทานกระแสตรง การวัดค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับความถี่ และการวัดการอิ่มตัวของแกนที่ค่ากระแสในช่วง 0 ถึง 1 A

ตารางที่ 6.5 พารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ที่ออกแบบสร้าง

N (turn)	MPL, $l_m$ ( $\mu\text{m}$ )	f (MHz)	Skin depth of NiFe ( $\mu\text{m}$ )	Ac ( $\mu\text{m}^2$ )	L (nH)	I <sub>sat</sub> (mA)
3	1380	1	9.03	23,375	105.3	599
	1380	5	4.04	10,454	47.1	599
	1380	10	2.85	7,392	33.3	599
	1380	20	2.02	5,227	23.5	599
5	1620	1	9.03	26,624	283.8	422
	1620	5	4.04	11,907	126.9	422
	1620	10	2.85	8,419	89.8	422
	1620	20	2.02	5,953	63.5	422
10	2220	1	9.03	34,747	1,081.2	289
	2220	5	4.04	15,539	483.5	289
	2220	10	2.85	10,988	341.9	289
	2220	20	2.02	7,770	241.8	289
16	2940	1	9.03	44,494	2,676.3	239
	2940	5	4.04	19,898	1,196.9	239
	2940	10	2.85	14,070	846.3	239
	2940	20	2.02	9,949	598.4	239

#### 6.4 กระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้ ออกแบบสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ และอัลตราไวโอเล็ต เน้นการออกแบบกระบวนการสร้างแบบเป็นชุด (batch process) และเนื่องจากกระบวนการสร้างค่อนข้างซับซ้อน และเป็นกระบวนการลิโธกราฟีแบบหลายชั้น ซึ่งงานจึงมี

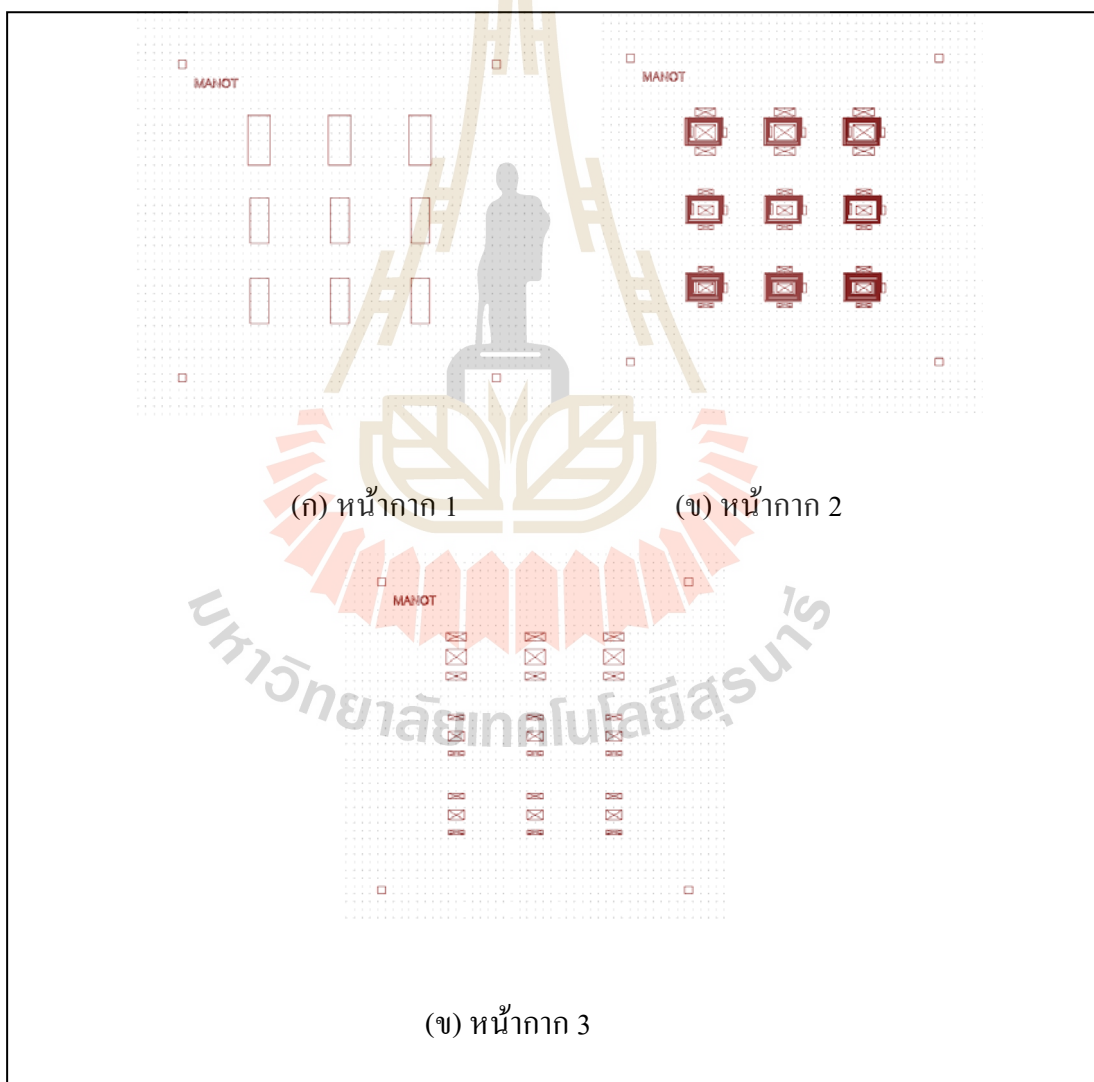
โอกาสเสียหายในระหว่างกระบวนการสร้างได้ง่าย ในส่วนนี้จึงได้พัฒนากระบวนการสร้างแบบใหม่ โดยแยกสร้างทีละส่วน แล้วจึงนำมาประกอบกันในภายหลัง ตัวเหนียวนำที่ออกแบบสร้างมีสองโครงสร้างด้วยกัน คือ ตัวเหนียวนำโครงสร้าง SUT-L1 ออกแบบโครงสร้างให้สามารถรองรับกระแสได้สูงถึง 1 A ด้วยการเพิ่มช่องอากาศขนาด 60  $\mu\text{m}$  เข้าไป โครงสร้างสร้างแยกทีละชั้น และนำมาประกอบเข้าด้วยกันในภายหลัง ส่วนตัวเหนียวนำอีกตัวคือ โครงสร้าง SUT-L2 เป็นตัวเหนียวนำที่ได้ออกแบบกระบวนการสร้างให้สร้างได้ง่าย และรวดเร็วกว่าโครงสร้างแรกลดขั้นตอนการชุบแกนโลหะลงเหลือเพียงครั้งเดียว และสามารถควบคุมความหนาของแกนตัวเหนียวนำได้ง่ายกว่า ซึ่งรายละเอียดการสร้างตัวเหนียวนำทั้งสองแบบ มีดังนี้

#### 6.4.1 กระบวนการสร้างตัวเหนียวนำโครงสร้าง SUT-L1

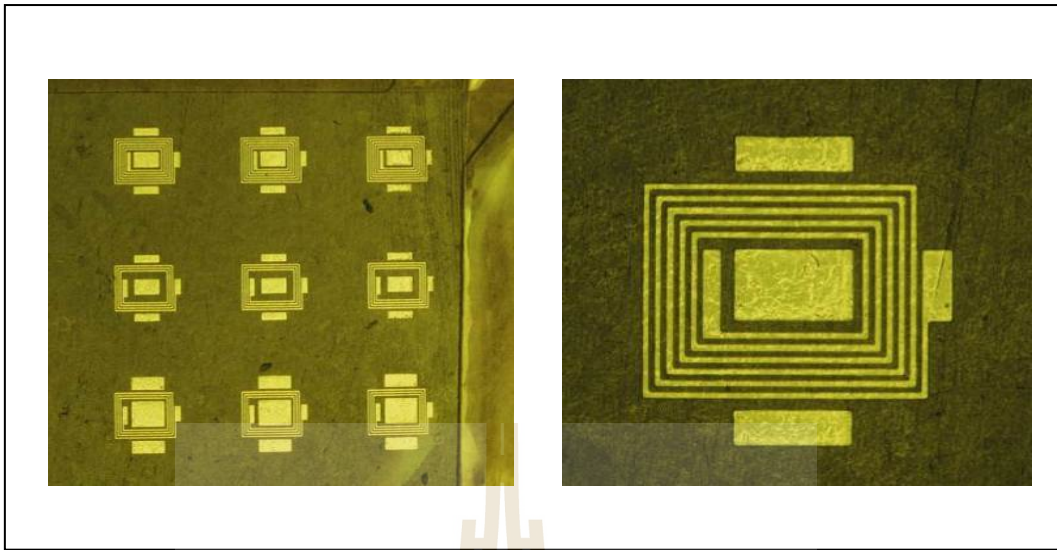
กระบวนการสร้างตัวเหนียวนำโครงสร้าง SUT-L1 เป็นกระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยเทคนิคลิโธกราฟีแบบหลายชั้น (multi-layer lithography) ซึ่งกระบวนการสร้างค่อนข้างซับซ้อน แต่มีข้อดี คือ สามารถสร้างชิ้นงานได้จำนวนมากในการสร้างแต่ละครั้ง โดยออกแบบกระบวนการสร้างแบบชุด (batch process) อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างหลายขั้นตอน มีโอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดความเสียหายได้มาก ในงานวิจัยส่วนนี้ จึงได้มีแนวคิดที่จะช่วยลดความเสียหายของชิ้นงานจากกระบวนการสร้างชิ้นงานแบบหลายชั้น ด้วยการสร้างแยกแต่ละชั้น และนำชิ้นงานมาประกอบเข้าด้วยกันในภายหลัง แต่สิ่งสำคัญคือ กระบวนการต้องไม่ทำให้คุณลักษณะสมบัติของชิ้นงานเปลี่ยนไป และกระบวนการสร้างต้องเป็นการสร้างแบบชุด ซึ่งหัวใจสำคัญของกระบวนการนี้คือ การสร้างสาร ใสแสง SU-8 แผ่นบาง เพื่อนำมาประกอบเข้าด้วยกันในภายหลัง ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ การพัฒนากระบวนการ กระบวนการนี้ นอกจากจะช่วยลดความเสียหายของชิ้นงาน ยังช่วยลดความซับซ้อน โดยกระบวนการสร้างแบ่งเป็น การสร้างขดลวดทองแดง การสร้าง NiFe ส่วนบน และการสร้าง NiFe ส่วนล่าง รายละเอียดในการสร้างชิ้นงานมีดังนี้

การสร้างชิ้นงาน โดยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ขั้นตอนแรกต้องออกแบบลวดลายโครงสร้างที่ต้องการ ด้วยโปรแกรม Layout editor ดังรูปที่ 6.32 จากนั้นนำโครงสร้างที่ได้พิมพ์ลงบนแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องพิมพ์ความละเอียด 2400 dpi จะได้ฟิล์มที่บดแสง ดังรูปที่ 6.33 และนำฟิล์มที่ได้ไปถ่ายทอดลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต เพื่อสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 6.33 จะเห็นว่าหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ ในงานวิจัยนี้ ใช้โลหะเงินเป็นวัสดุกั้นรังสีเอกซ์ และใช้แกรไฟต์อ่อน เป็นฐานโปรงรังสีเอกซ์ โดยมีกระบวนการสร้างดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 เมื่อได้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการเตรียมชั้นฟิล์มหนา 300 ถึง 500  $\mu\text{m}$  สำหรับแม่พิมพ์ส่วนของขดลวด เพื่อนำไปอบรังสีเอกซ์

ส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำสร้างโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์แบบชั้นเดียว บนแผ่นฐานแกรไฟต์อ่อน กระบวนการสร้างเริ่มจาก เคลือบสารไวแสง SU-8 หนา 300 ถึง 500  $\mu\text{m}$  ลงบนฐานแกรไฟต์อ่อน อบที่ 95 องศาเซลเซียส 13 ชั่วโมง จากนั้นอบรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 22  $\text{J}/\text{cm}^2$  ผ่านหน้ากากเงินหนา 50  $\mu\text{m}$  อบที่ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที ปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อไม่ให้ชิ้นงานโก่งตัวจากความเค้น จากนั้นจึงล้างสารไวแสงออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ล้างต่อด้วย อะซิโตน และน้ำเปล่า เพื่อให้ชิ้นงานสะอาดไม่เป็นคราบของน้ำยาดัดที่ผิวของแกรไฟต์ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ อบที่ 50 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อให้ชิ้นงานแห้ง จะได้แม่พิมพ์สารไวแสงหนาดังรูปที่ 6.34



รูปที่ 6.32 ลวดลายหน้ากาสวมชั้นของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 บนโปรแกรม Layout Editor

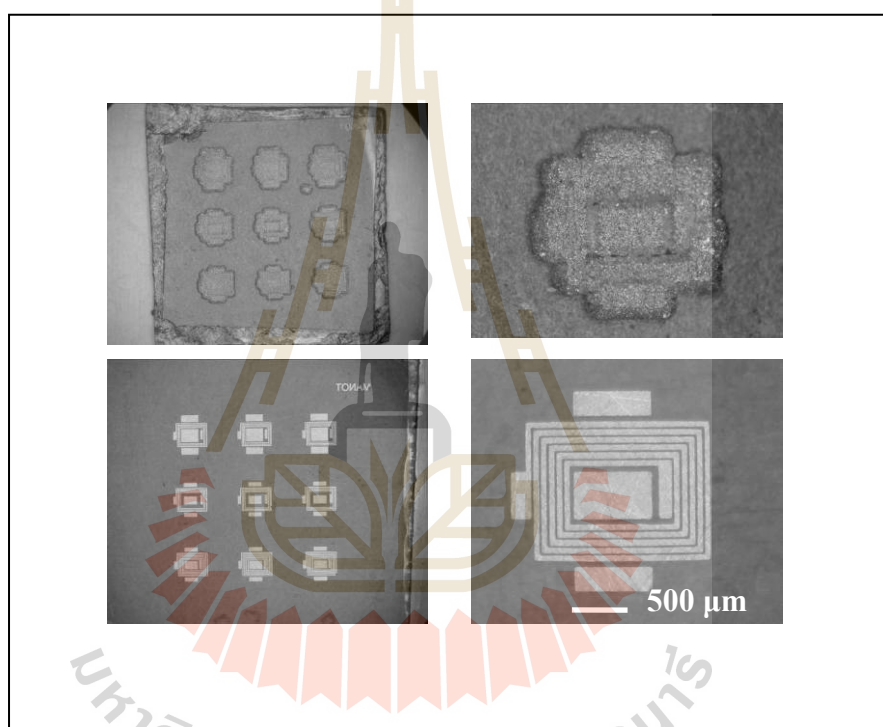


รูปที่ 6.33 หน้ากากกันรังสีเอกซ์บนฐานเกรไฟต์อ่อน



รูปที่ 6.34 แม่พิมพ์สารไวแสงหนา 350  $\mu\text{m}$  จากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์

เมื่อได้แม่พิมพ์ของสารไวแสงหนาแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการชุบทองแดงลงในแม่พิมพ์ในขั้นแรก นำแม่พิมพ์ติดทับด้วยเทปกาวโดยรอบ เพื่อให้ชั้นงาน นำไฟฟ้าเฉพาะบริเวณที่จะชุบโลหะลงในแม่พิมพ์ จากนั้นนำแม่พิมพ์ หยดด้วยแอลกอฮอล์เนื่องจากมีแรงดึงผิวน้อยกว่าน้ำช่วยไม่ให้เกิดฟองอากาศ ขึ้นในแม่พิมพ์ และนำไปจุ่มน้ำ DI ในขั้นตอนนี้ หากยังมีฟองอากาศอยู่ในแม่พิมพ์ ให้นำชั้นงานจุ่มในน้ำ แล้วใช้คลื่นอัลตราโซนิกในโหมด degas กำจัดฟองออกไป จากนั้นนำชั้นงานจุ่มในน้ำยาชุบทองแดง และชุบด้วยกระแสเริ่มต้น  $30 \text{ mA/cm}^2$  เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นชุบต่อด้วยกระแส  $10 \text{ mA/cm}^2$  จนสิ้น ซึ่งทองแดงมีอัตราเกิดอยู่ที่  $0.5 \mu\text{m}$  ต่อนาที

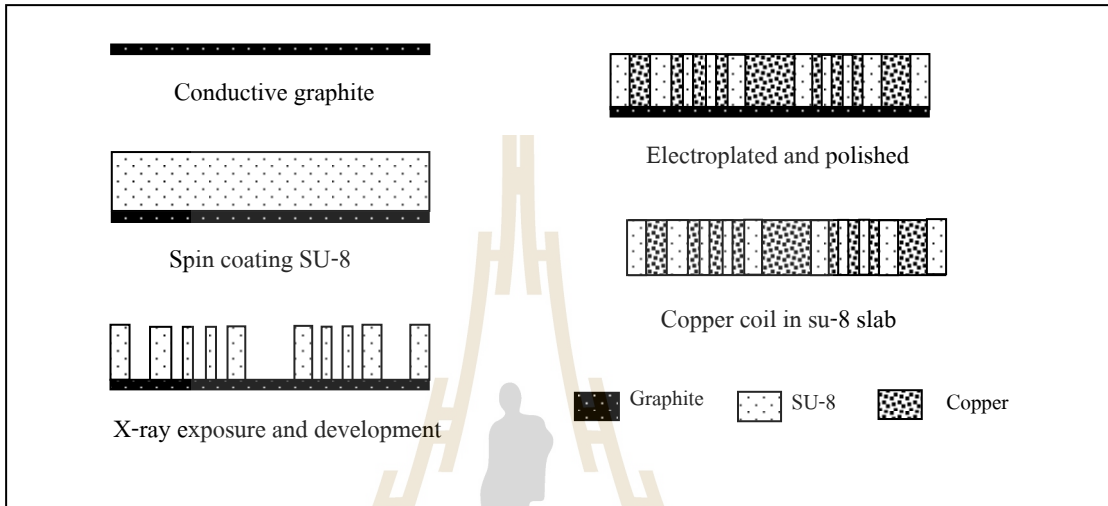


รูปที่ 6.35 ขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ในแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 หลังการชุบทองแดง และขัดเรียบ

ขั้นตอนต่อไปนำชั้นงาน ขัดทองแดงที่ล้นออกให้เรียบ จะได้ขดลวดทองแดงฝังอยู่ในแม่พิมพ์ SU-8 ดังรูปที่ 6.35 จะเห็นว่า บริเวณส่วนกลางของโครงสร้าง จะมีทองแดงขนาดใหญ่ ซึ่ง คือ แม่พิมพ์ของแกนตัวเหนี่ยวนำ ที่สร้างขึ้นมาพร้อมกัน โดยจะชุบทองแดงขึ้นพร้อมขดลวด แต่จะกัดเพื่อให้เกิดช่องว่างด้วยสารเคมีในภายหลัง ใช้เวลาในการกัด 5 นาที ซึ่งจะเร็วกว่าการเจาะภายหลังด้วยพลาสมาเนื่องจาก ใช้เวลาถึง 50 ชั่วโมง หลังจากขั้นตอนการขัดเรียบ จึงกำจัดฐานแกรไฟต์อ่อนด้วยการขัด ซึ่งในขั้นตอนการขัดด้านบนและขัดด้านล่าง



จะสูญเสียความหนาโดยรวม ประมาณ 50  $\mu\text{m}$  ดังนั้น ในกระบวนการสร้าง ต้องออกแบบความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น 50  $\mu\text{m}$  ทุกครั้ง รูปที่ 6.36 แสดงภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างขดลวดทองแดงของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะได้แผ่น SU-8 หนา 300  $\mu\text{m}$  ที่มีขดลวดทองแดงฝังอยู่ด้านใน ดังรูปที่ 6.37

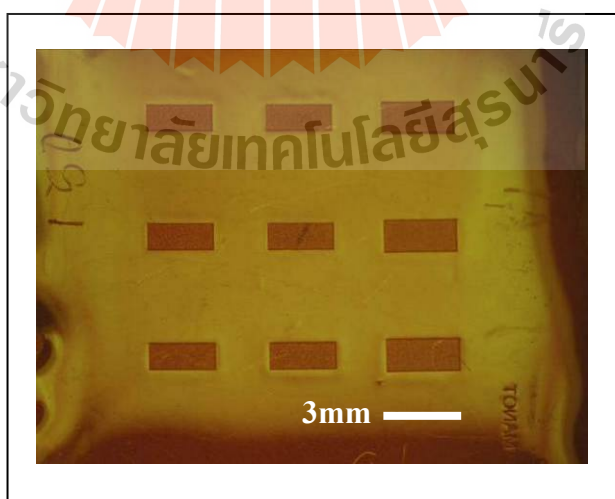


รูปที่ 6.36 กระบวนการสร้างขดลวดเหนี่ยวนำ

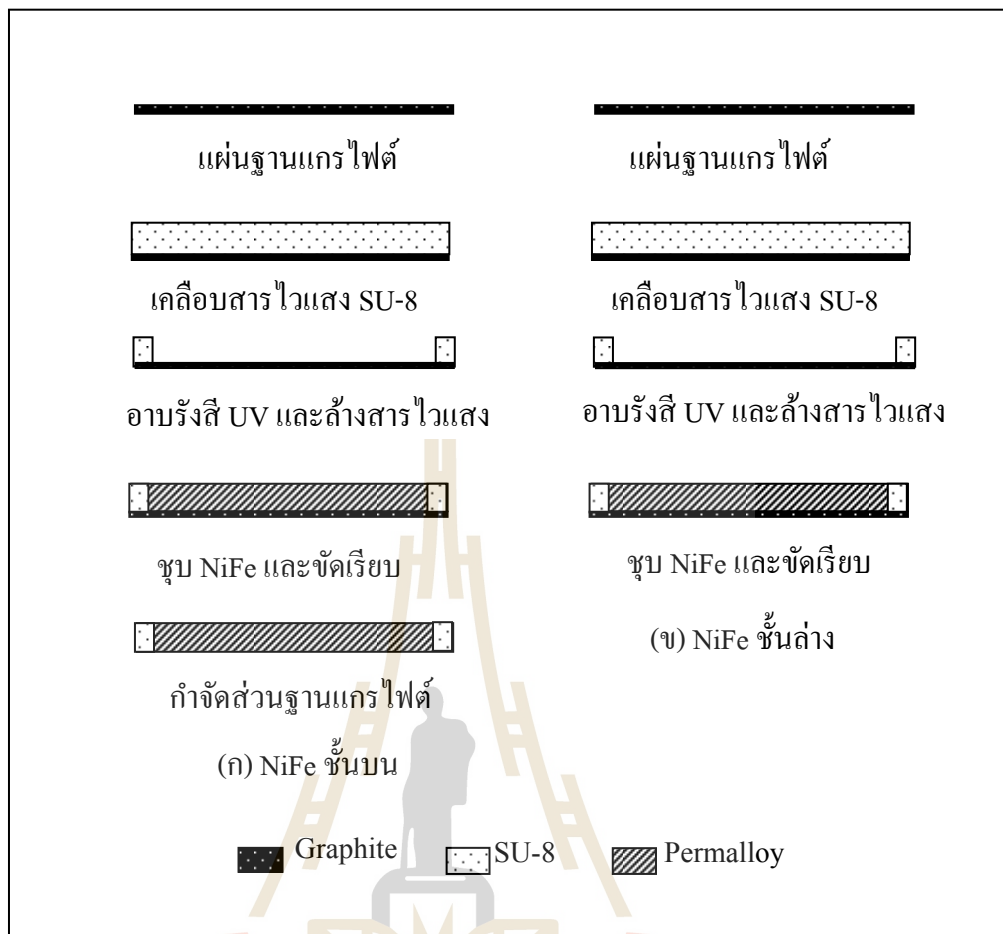


รูปที่ 6.37 ขดลวดทองแดงในแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8

โครงสร้างในส่วนต่อไป คือ โครงสร้างแผ่น NiFe ที่อยู่ส่วนบนและล่างของตัวเหนี่ยวนำ เนื่องจากโครงสร้างในส่วนนี้มีขนาดอยู่ในระดับมิลลิเมตร จึงสามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ รูปที่ 6.31 แสดงลวดลายฟิล์มที่บแสงของแผ่น NiFe สำหรับใช้เป็นหน้ากักในการอบแสงยูวีลงบนสารไวแสง กระบวนการสร้างในส่วนของแกน permalloy (Ni:Fe) ทั้งในส่วนบน และส่วนล่าง จะใช้กระบวนการสร้างแบบเดียวกับกระบวนการสร้างขดลวด เพียงแต่ กระบวนการสร้างแกนชั้นล่าง ไม่ต้องกำจัดส่วนฐานทิ้งไป กระบวนการขึ้นรูป NiFe นั้นขึ้นรูปโดยการชุบด้วยไฟฟ้า ใช้ส่วนผสมของสารเคมี เพื่อให้ได้อัตราส่วน Ni:Fe 80:20 ดังที่ได้กล่าวในกระบวนการในบทที่ 3 กระบวนการสร้างเริ่มจากนำแผ่นแกรไฟต์หนาเคลือบสารไวแสงให้มีความหนา 300  $\mu\text{m}$  จากนั้นอบด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบรังสียูวี ด้วยพลังงาน 6  $\text{J}/\text{cm}^2$  นำไปอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที และปล่อยให้เย็น จากนั้นนำไปล้างสารไวแสง เพื่อให้เกิดหลุมของแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 ดังรูปที่ 6.38 จากนั้นล้างอะซิโตน และน้ำ DI อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อใช้ชิ้นงานแห้ง ขึ้นต่อไปจึงชุบโลหะ NiFe ลงในแม่พิมพ์ด้วยกระแส 1  $\text{mA}/\text{cm}^2$  จนสิ้นดังรูปที่ 6.40 ในขั้นตอนนี้ ต้องควบคุมกระบวนการชุบเพื่อให้ได้ค่า permeability สูง และเพื่อไม่ให้เกิดฟองขึ้นในเนื้อโลหะ ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 ขั้นสุดท้ายจึงขัดโลหะส่วนที่ล้นออก และกำจัดส่วนฐานเพื่อให้ได้โลหะ NiFe ฟุ้งอยู่ในสารไวแสงดังรูปที่ 6.40 แต่สำหรับโลหะ NiFe ชั้นล่างยังคงเหลือส่วนฐานไว้เพื่อใช้เป็นฐานของกระบวนการต่อไป กระบวนการสร้างชิ้นงานในส่วนนี้แสดงได้ดังรูปที่ 6.39

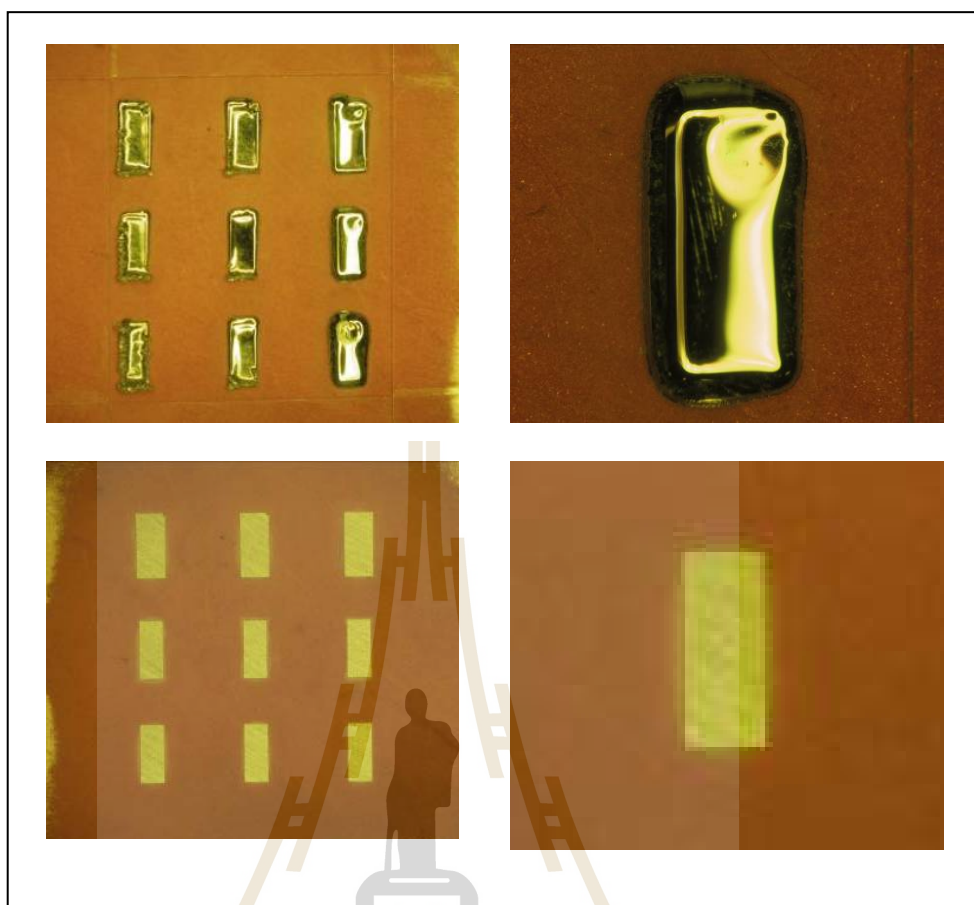


รูปที่ 6.38 แม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 สำหรับชุบโลหะ NiFe



รูปที่ 6.39 กระบวนการสร้างแผ่น NiFe ชั้นบนและล่าง

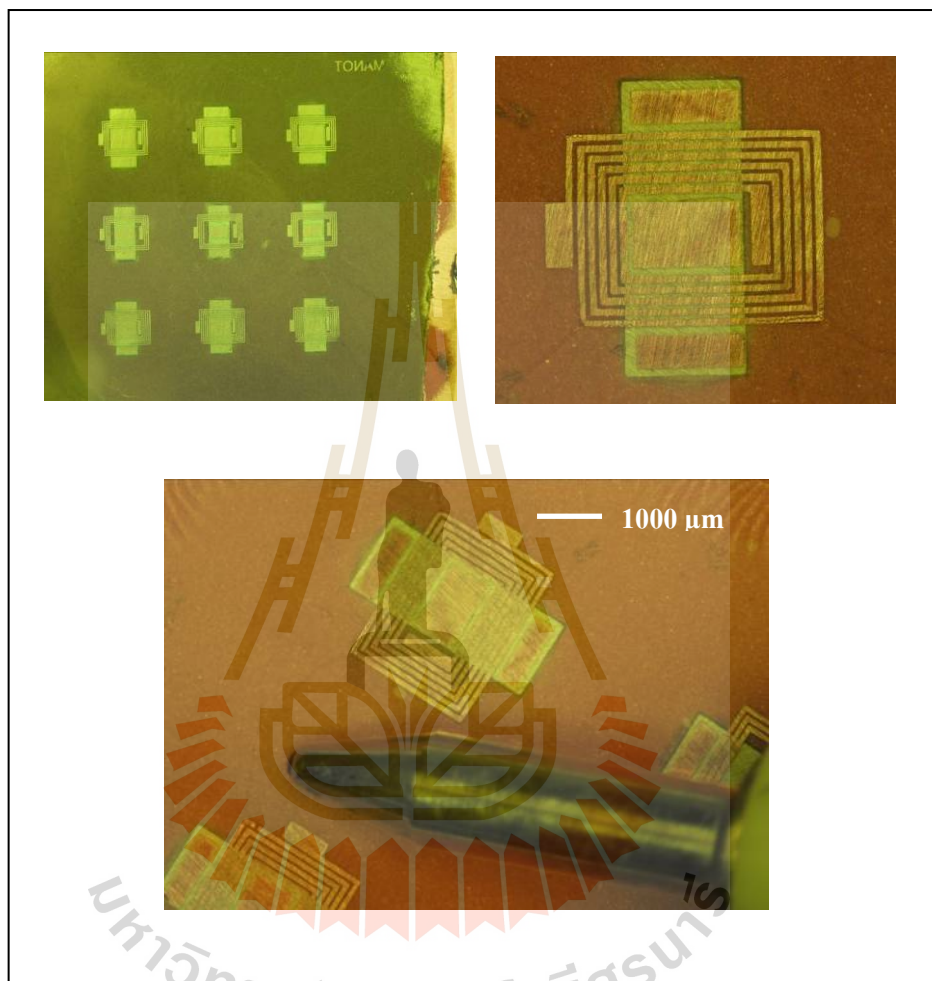
เมื่อได้โครงสร้างทั้งสามส่วนแล้ว ขั้นตอนต่อไปจึงนำโครงสร้างทั้งสามส่วนประกอบเข้าด้วยกัน กระบวนการเริ่มจาก นำแผ่น NiFe ส่วนล่าง อบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ความชื้นที่แทรกอยู่ในชั้นงาน ระเหยออก หากข้ามขั้นตอนนี้ไป จะมีฟองอากาศเกิดขึ้นจำนวนมากในเนื้อสารไวแสง ขั้นตอนมาจึงหมุนเคลือบสารไวแสง 50  $\mu\text{m}$  อบด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นลง จากนั้นนำแผ่นขดลวดทองแดง ซึ่งฝังอยู่ใน SU-8 วางลงบนชิ้นงานส่วนแรก และนำไปอบอีกครั้งที่ อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ชิ้นงานทั้งสองส่วนจะเชื่อมติดกัน ดังรูปที่ 6.41 จากนั้น นำชิ้นงานที่ได้ หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 หนา 50  $\mu\text{m}$  และอบด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเป็นฉนวนกันระหว่างขดลวด และโลหะ NiFe ส่วนบน และใช้เป็นลวดลายในการกัดแม่พิมพ์ของแกนตัวเหนี่ยวนำด้วย ดังนั้น ในขั้นตอนต่อไปจึงนำชิ้นงานไปอบรังสีอัลตราไวโอเล็ต และอบที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงล้างสารไวแสงออก



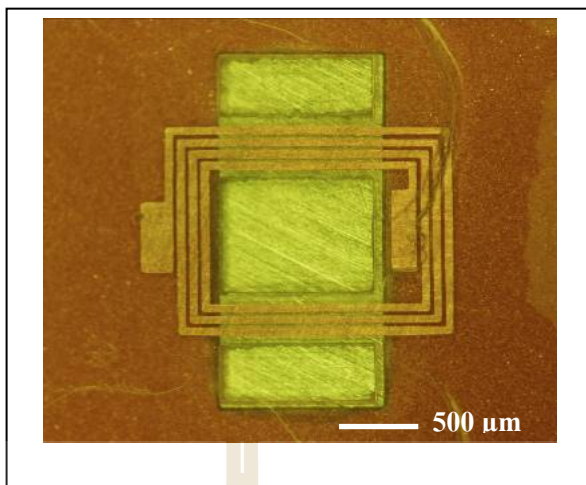
รูปที่ 6.40 โลหะ NiFe ที่ได้จากการชุบจนสิ้นแม่พิมพ์ และจัดเรียง

ขั้นตอนต่อไปจึงนำชิ้นงาน ไปกัดทองแดงส่วนกลางออกด้วยกรดไนตริก 50 % เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปล้างสาร ไวแสงที่อยู่ใต้แม่พิมพ์แกนทองแดงออก ซึ่งสารไวแสงส่วนนี้ จะสามารถล้างออกได้เนื่องจาก ในขั้นตอนการอบรังสีอัลตราไวโอเล็ต โครงสร้างส่วนนี้จะถูกบังด้วยทองแดง รูปที่ 6.42 แสดงโครงสร้างตัวเหนียวนำ หลังการเปิดแม่พิมพ์ของแกนตัวเหนียวนำ ในขั้นตอนต่อไป นำโครงสร้างที่ได้ไปชุบโลหะ NiFe จนสิ้น และจัดให้เรียบ รูปที่ 6.43 แสดงโครงสร้างตัวเหนียวนำ หลังการชุบโลหะ NiFe และจัดเรียบ ในขั้นตอนนี้ ต้องจัดให้ถึงชั้นทองแดง จากนั้นจึงหมุนเคลือบสารไวแสงให้ได้ความหนา 30  $\mu\text{m}$  ซึ่งสารไวแสงชั้นนี้ จะเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะสมบัติของตัวเหนียวนำ ซึ่งก็คือช่อง gap นั้นเอง หลังจากหมุนเคลือบแล้วจึงอบที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็น และนำโครงสร้าง NiFe ขึ้นบนมาวาง และอบอีกครั้งที่ 95 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจะยึดติดกันทั้งหมด จากนั้นจึงนำไปอบรังสีอัลตราไวโอเล็ต เพื่อให้สารไวแสงแข็งตัวทั้งหมด หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้ ไปกัดพลาสติกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

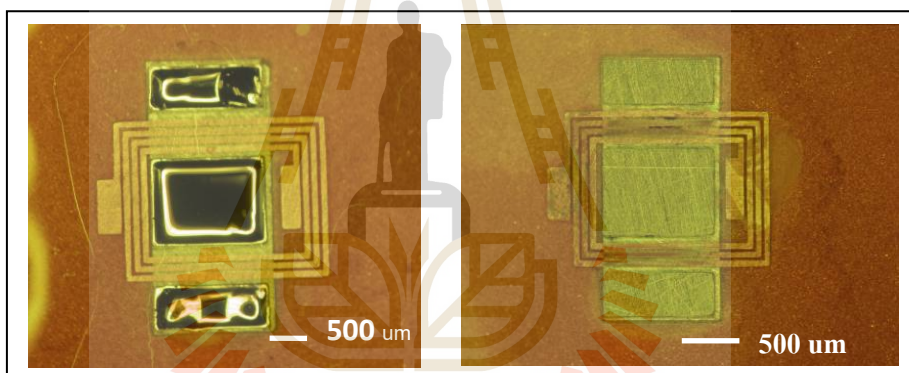
เพื่อเปิดขั้วไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อสาย และตัดแยกชิ้นงาน รูปที่ 6.46 แสดงตัวเหนี่ยวนำที่ทดสอบ  
สร้างใน 1 ครั้ง และโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำที่ได้ เป็นดังรูป ที่ 6.44 และ 6.47 และรูปที่ 6.48  
แสดงภาพตัดขวางกระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำทั้งหมด



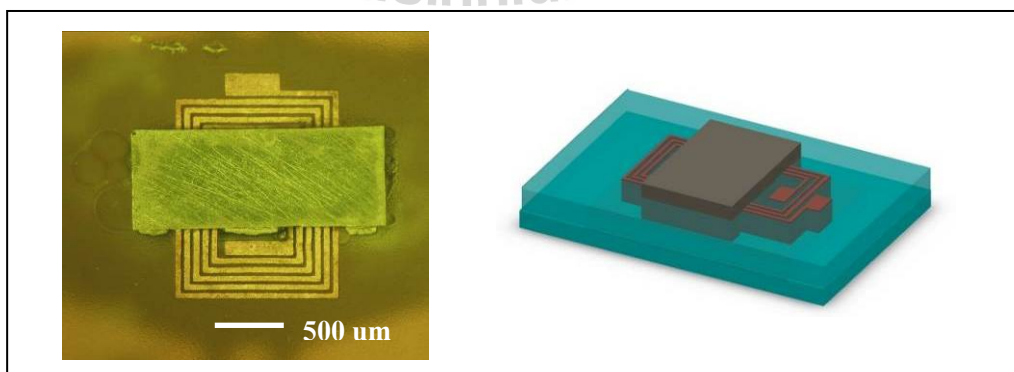
รูปที่ 6.41 ชั้นขดลวดตัวนำเมื่อประกบบนชั้นแกน NiFe



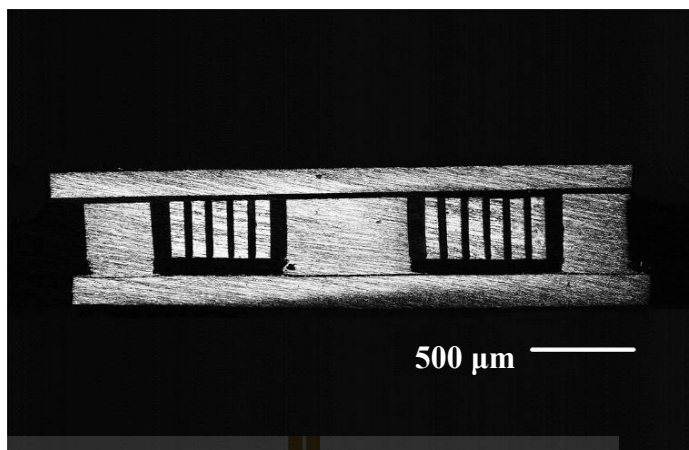
รูปที่ 6.42 ขดลวดเหนี่ยวนำหลังจากกัดทองแดง และล้างสารไวแสงเพื่อให้ได้แม่พิมพ์ของ NiFe



รูปที่ 6.43 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำหลังการเติม NiFe ลงในแม่พิมพ์ชั้นกลาง



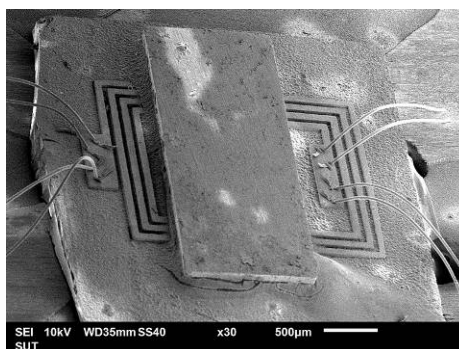
รูปที่ 6.44 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำที่เสร็จสมบูรณ์ เทียบกับแบบจำลอง



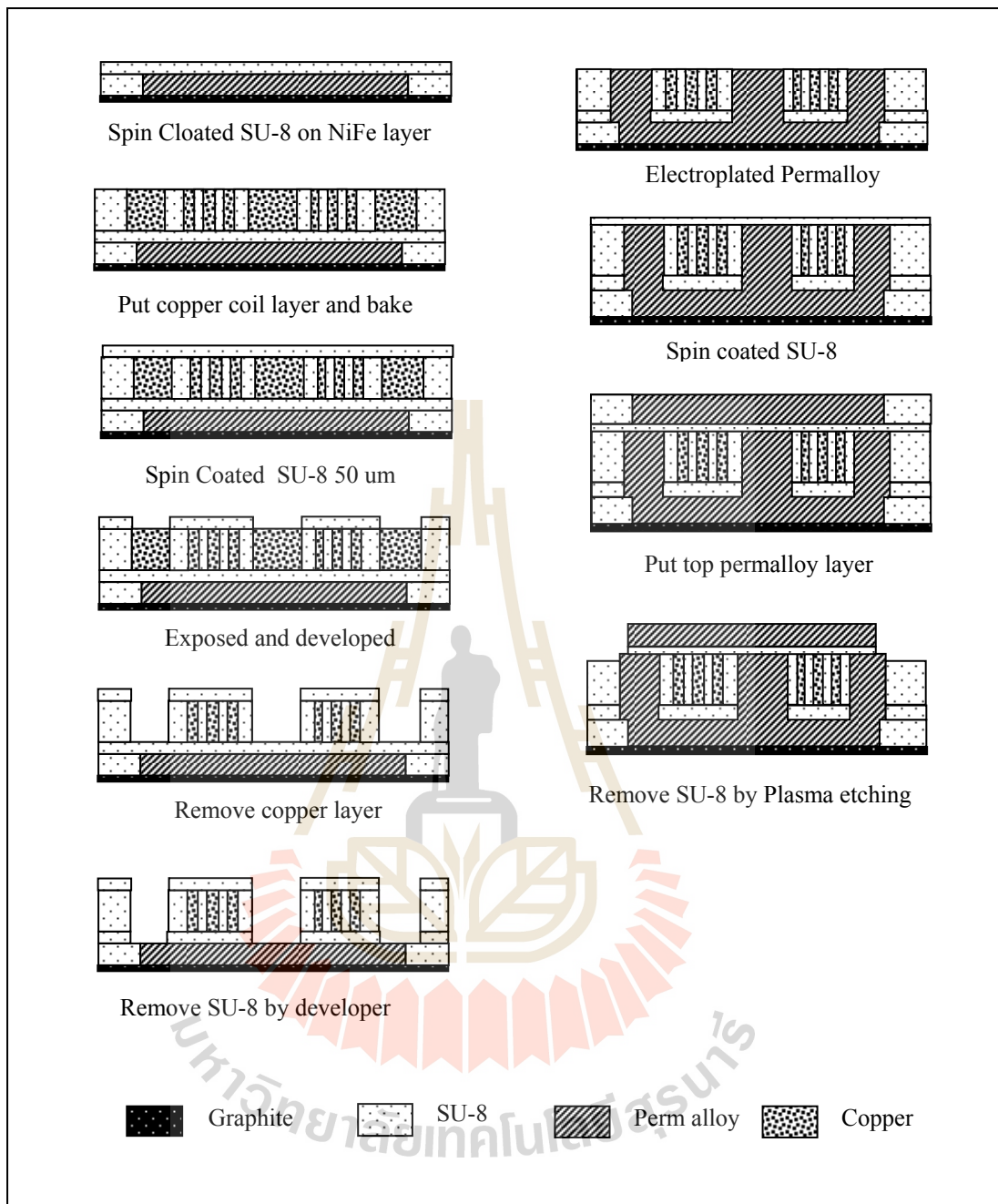
รูปที่ 6.45 ภาพตัดขวางโครงสร้างตัวเหนียวนาที่สร้างได้จริง



รูปที่ 6.46 โครงสร้างตัวเหนียวนาที่สร้างใน 1 ครั้ง



รูปที่ 6.47 โครงสร้างตัวเหนียวนาถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 6.48 ภาพตัดขวางแสดงกระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำจุลภาคกำลัง

#### 6.4.2 กระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L2

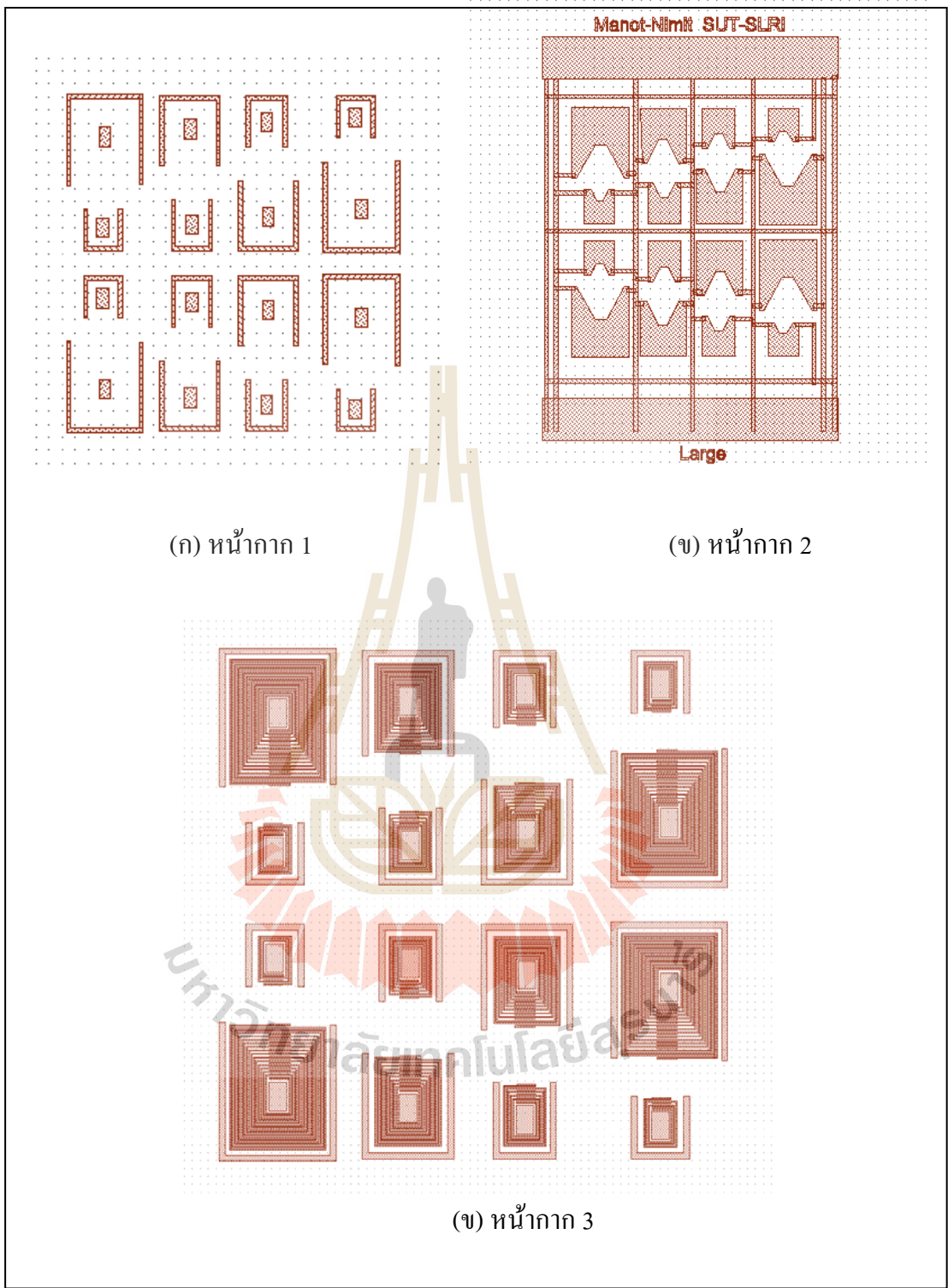
กระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L2 เป็นการออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น โดยลดกำลังสูญเสียในแกนของตัวเหนี่ยวนำ ด้วยการออกแบบแกนให้มีความหนาใกล้เคียงความหนาของ skin depth ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อการออกแบบ



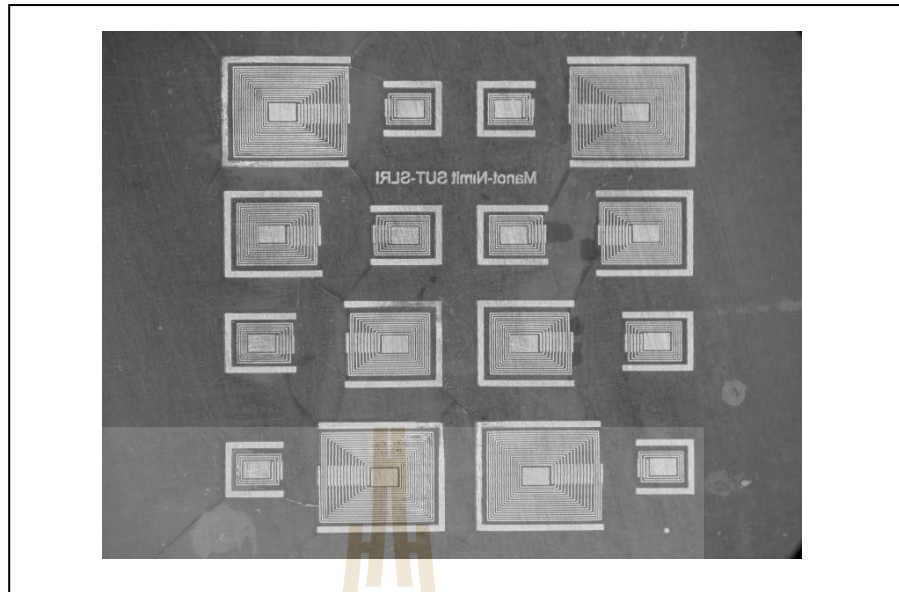
นอกจากนี้โครงสร้างนี้ได้ถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กและบางลงมากกว่าโครงสร้าง SUT-L1 ส่วนของกระบวนการสร้างได้ออกแบบใหม่ทั้งหมด เพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการ และลดความเสียหายที่จะเกิดกับชิ้นงานในกระบวนการต่าง ๆ แต่ยังคงออกแบบกระบวนการสร้างให้เป็นการสร้างแบบชุด (batch process) กระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L2 มีดังนี้

ในขั้นแรกต้องออกแบบลวดลายด้วยโปรแกรม Layout Editor เพื่อสร้างฟิล์มทึบแสงดังรูปที่ 6.49 โครงสร้าง SUT-L2 มีหน้ากักจำนวน 3 ชั้น คือ หน้ากัก 1 ใช้สำหรับเปิดลวดลายเพื่อกัดทองแดงเปิดช่องสำหรับการชุบ NiFe หน้ากัก 2 ใช้สำหรับเปิดลาย dry film เพื่อเคลือบทองแดง สำหรับใช้เป็น seed layer ในการชุบ NiFe ส่วนหน้ากัก 3 คือ ส่วนของขดลวดทองแดง มีจำนวน 3 5 15 และ 16 รอบ หน้ากักชั้นที่ 1-2 จะใช้สำหรับกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตเท่านั้น แต่หน้ากัก 3 จะใช้สร้างหน้ากักกั้นรังสีเอกซ์ เพื่อสร้างแม่พิมพ์สารไวแสงหนาด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ เมื่อได้ฟิล์มทึบแสง จึงนำไปสร้างหน้ากักกั้นรังสีเอกซ์ จะได้หน้ากักที่มีฐานเป็นแกรไฟต์อ่อน มีโลหะเงินเป็นวัสดุกั้นรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 6.50

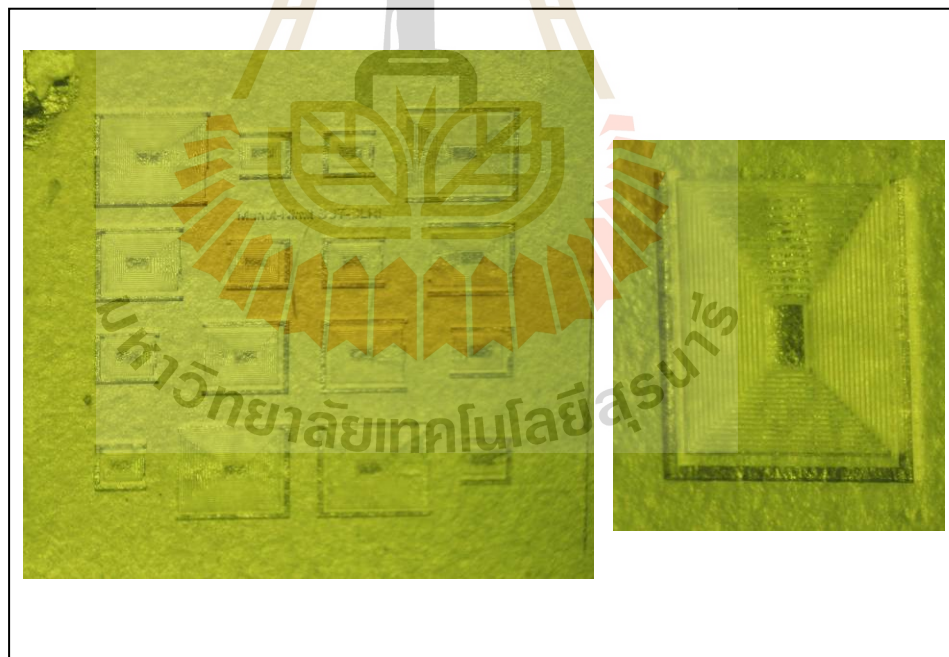
ในขั้นต่อไปเป็นการเตรียมสารไวแสง เพื่อสร้างแม่พิมพ์ของชั้นขดลวดทองแดงโดยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งรายละเอียดในการสร้าง จะเหมือนกระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำ L<sub>1</sub> กระบวนการสร้างเริ่มจาก เคลือบสารไวแสง SU-8 หนา 300 ถึง 500  $\mu\text{m}$  ลงบนฐานแกรไฟต์อ่อน อบที่ 95 องศาเซลเซียส 13 ชั่วโมง จากนั้นอบรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 22  $\text{J}/\text{cm}^2$  ผ่านหน้ากักเงินหนา 50  $\mu\text{m}$  อบที่ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที ปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อไม่ให้ชิ้นงาน โค้งตัวจากความเครียด จากนั้นจึงล้างสารไวแสงออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ล้างด้วย อะซิโตน และน้ำเปล่า เพื่อให้ชิ้นงานสะอาด ไม่เป็นคราบของน้ำยาดัดที่ผิวของแกรไฟต์ ซึ่งชิ้นงานที่ไม่สะอาด เมื่อนำไปชุบโลหะ จะทำให้โลหะก่อตัวไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจทำให้ขดลวดทองแดงมีจุดที่ขาดจากกัน หรืออาจทำให้เกิดความต้านทานสูง เมื่อได้แม่พิมพ์สารไวแสงหนาแล้ว ให้นำชิ้นงานที่ได้ อบที่ 50 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อให้ชิ้นงานแห้งในขั้นตอนนี้จะได้แม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 หนาดังรูปที่ 6.51 ในขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์นี้ ต้องออกแบบให้มีความหนามากกว่าที่ต้องการ เนื่องจาก เมื่อ เข้าสู่กระบวนการกัด ซึ่งประกอบไปด้วยการกัดทองแดงที่ล้นออก หลังการชุบ และยังมีกรกัดฐานแกรไฟต์ทิ้ง ซึ่งสองขั้นตอนนี้จะทำให้สูญเสียความหนาไป 50 ถึง 100  $\mu\text{m}$  ดังนั้นต้องออกแบบชิ้นงานแม่พิมพ์ให้มีความหนาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6.49 ลวดลายขดลวดตัวเหนียวนำ SUT-L2 บนโปรแกรม Layout Editor

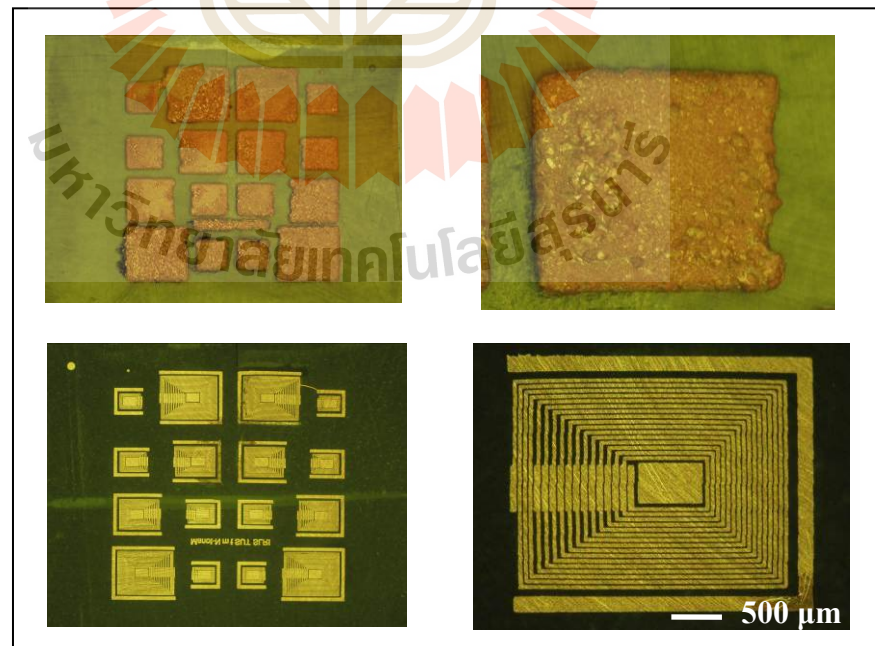


รูปที่ 6.50 ลวดลายหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ของโครงสร้าง SUT-L2 บนฐานแกรไฟต์อ่อน

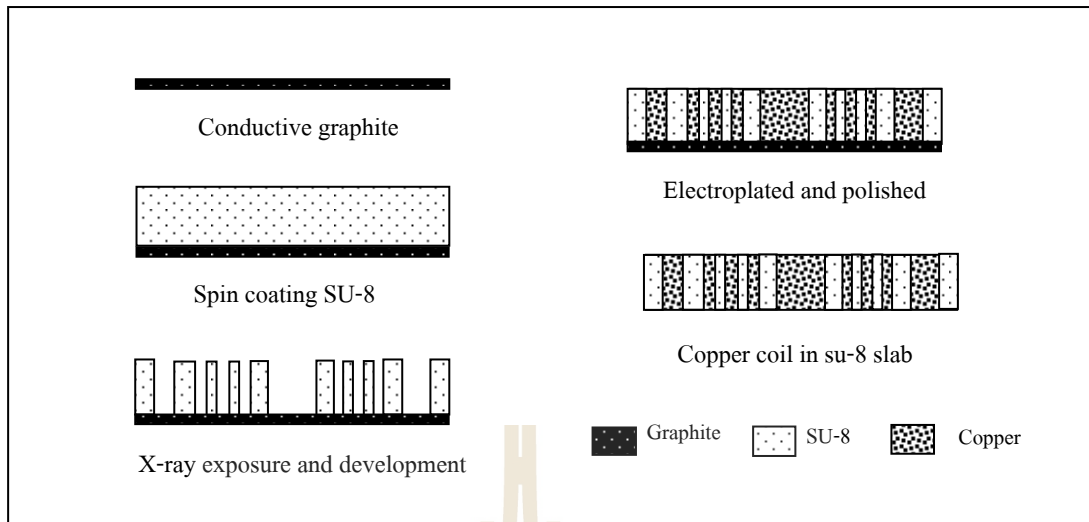


รูปที่ 6.51 แม่พิมพ์สารไวแสงหนา 350  $\mu\text{m}$  สำหรับขดลวดโครงสร้าง SUT-L2

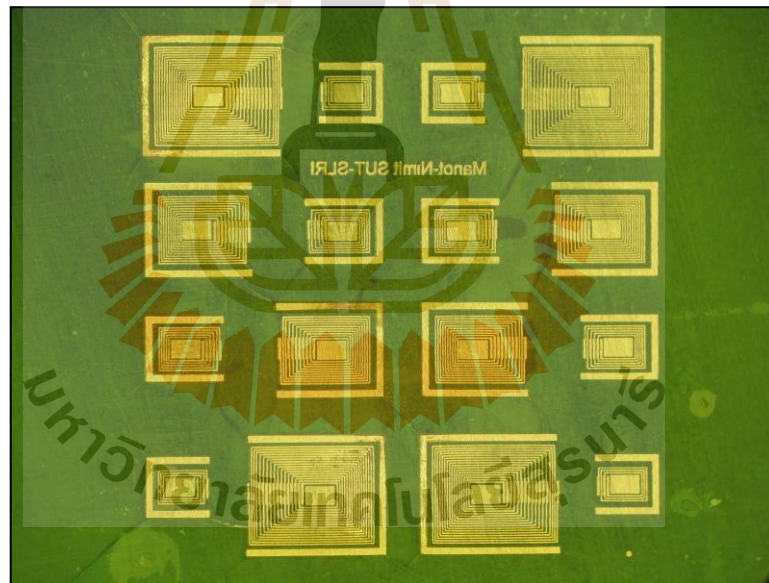
เมื่อได้แม่พิมพ์ของสารไวแสงหนาแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการชุบทองแดงลงในแม่พิมพ์ ในขั้นแรก นำแม่พิมพ์ติดทับด้วยเทปกาวโดยรอบ เพื่อให้ชิ้นงาน นำไฟฟ้าเฉพาะบริเวณที่จะชุบโลหะลงในแม่พิมพ์ จากนั้นนำแม่พิมพ์ หยดด้วยแอลกอฮอล์เนื่องจากมีแรงดึงผิวน้อยกว่าน้ำ จะช่วยไม่ให้เกิดฟองอากาศ ขึ้นในแม่พิมพ์ และนำไปจุ่มน้ำ DI ในขั้นตอนนี้ หากยังมีฟองอากาศอยู่ในแม่พิมพ์ ให้นำชิ้นงานจุ่มในน้ำ แล้วใช้คลื่นอัลตราโซนิกในโหมด degas กำจัดฟองออกไป จากนั้นนำชิ้นงานจุ่มในน้ำยาชุบทองแดง และชุบด้วยกระแสเริ่มต้น  $30 \text{ mA/cm}^2$  เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นชุบต่อด้วยกระแส  $10 \text{ mA/cm}^2$  จนสิ้น ซึ่งทองแดงมีอัตราเกิดอยู่ที่  $0.5 \mu\text{m}$  ต่อนาที จากนั้น ชัดให้เรียบ จะได้ขดลวดทองแดงฝังอยู่ในแม่พิมพ์ SU-8 ดังรูปที่ 6.52 ซึ่งจะเห็นว่า บริเวณส่วนกลางของโครงสร้าง จะมีทองแดงขนาดใหญ่ ซึ่ง คือ แม่พิมพ์ของแกนตัวเหนี่ยวนำ ที่สร้างขึ้นมาพร้อมกัน โดยจะชุบทองแดงขึ้นพร้อมขดลวด แต่จะกัดเพื่อให้เกิดช่องว่างด้วยสารเคมีในภายหลัง ใช้เวลาในการกัด 5 นาที ซึ่งจะเร็วกว่าการเจาะภายหลังด้วยพลาสมาเนื่องจาก ใช้เวลาถึง 50 ชั่วโมง หลังจากขั้นตอนการกัดเรียบ จึงกำจัดฐานแกรไฟต์อ่อนด้วยการกัด ซึ่งในขั้นตอนการกัดด้านบนและกัดด้านล่าง จะ สูญเสียความหนาโดยรวมประมาณ  $50 \mu\text{m}$  ดังนั้น ในกระบวนการสร้าง ต้องออกแบบความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น  $50 \mu\text{m}$  ทุกครั้ง รูปที่ 6.53 แสดงภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างขดลวดทองแดงของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะได้แผ่น SU-8 หนา  $300 \mu\text{m}$  ที่มีขดลวดทองแดงฝังอยู่ด้านใน ดังรูปที่ 6.54



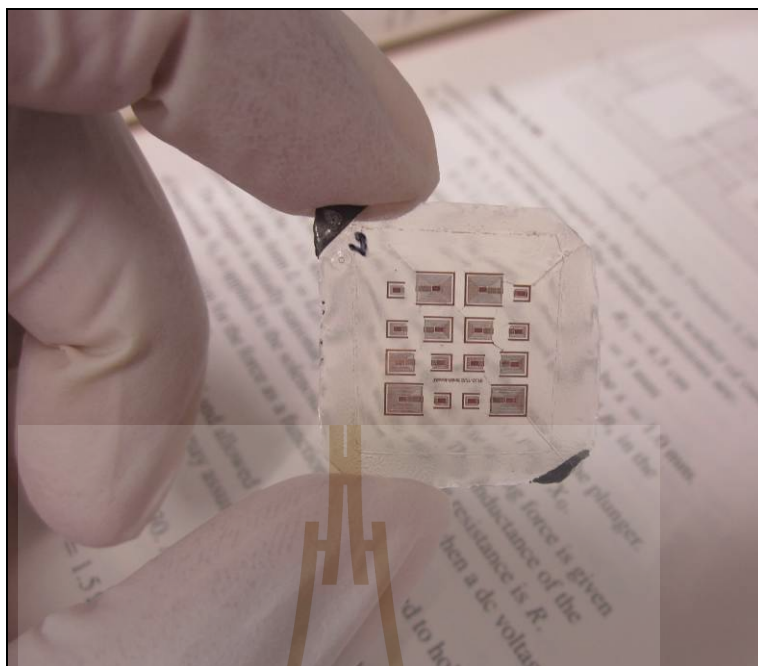
รูปที่ 6.52 ขดลวดตัวเหนี่ยวนำในแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 หลังการชุบทองแดง และขัดเรียบ



รูปที่ 6.53 กระบวนการสร้างชั้นขดลวดทองแดงของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2

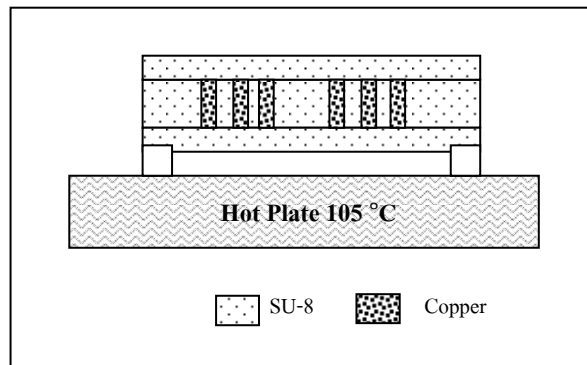


รูปที่ 6.54 ขดลวดทองแดงในแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8

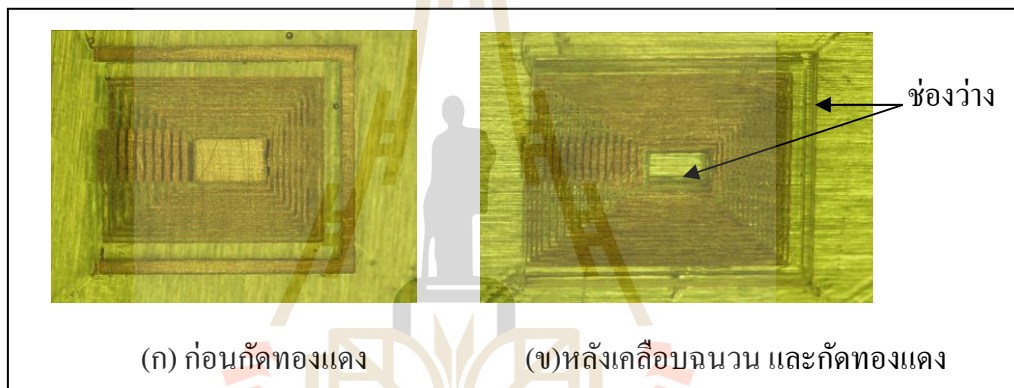


รูปที่ 6.55 ขดลวดทองแดงในแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 หลังกำจัดส่วนฐาน

เมื่อได้แผ่น SU-8 ที่มีขดลวดทองแดงฝังอยู่ภายในแล้ว ขั้นตอนต่อไป จะเป็นการเคลือบฉนวนทั้งสองด้านของแผ่นพอลิเมอร์ที่มีขดลวดฝังอยู่ภายใน กระบวนการเริ่มจาก นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และปล่อยให้เย็นลง เพื่อกำจัดความชื้นที่ฝังอยู่ในชิ้นงาน หากข้ามขั้นตอนนี้ไป จะมีฟองเกิดขึ้นจำนวนมาก ขั้นตอนต่อไป หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 3050 ให้ได้ความหนาประมาณ 30  $\mu\text{m}$  จากนั้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ปล่อยให้เย็นลง และนำมาหมุนเคลือบสารไวแสงอีกด้านของแผ่นจากนั้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยวางชิ้นงานให้ลอยจากพื้น เพื่อไม่ให้สารไวแสงละลายติดพื้น ดังรูปที่ 6.56 เมื่อครบเวลา นำชิ้นงานออกจากเตา จากนั้น นำไปอบรังสีอัลตราไวโอเล็ตทั้งสองด้าน ด้วยพลังงาน 255  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  โดยใช้หน้ากาก 1 แล้วนำชิ้นงานไปอบที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที นำออกจากเตาอบ และล้างสารไวแสงออก จะได้ช่องเปิดบริเวณแกนของตัวเหนี่ยวนำ จากนั้นนำชิ้นงานไปกัดทองแดงด้วยกรดไนตริก 50 % ใช้เวลาประมาณ 10 นาที จะได้ช่องเปิดสำหรับแกน NiFe ดังรูปที่ 6.57



รูปที่ 6.56 การอบชิ้นงาน เมื่อทำการเคลือบสารไวแสงทั้งสองด้าน

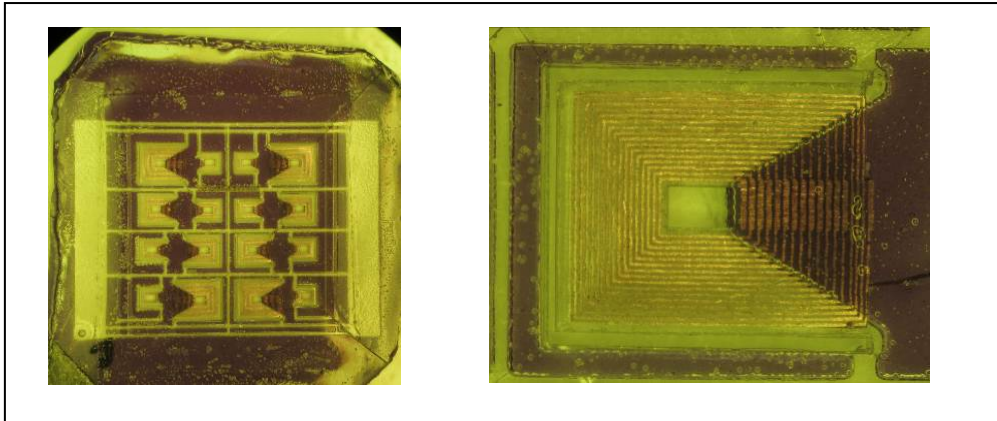


(ก) ก่อนกัดทองแดง

(ข) หลังเคลือบฉนวน และกัดทองแดง

รูปที่ 6.57 ชิ้นงานที่ผ่านการกัดทองแดงเพื่อเปิดแม่พิมพ์ของ NiFe

กระบวนการสร้างแกนตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ได้ออกแบบกระบวนการสร้างใหม่ ซึ่งจะแตกต่างจากแกนของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 คือ แกนจะมีความหนาเพียง 16  $\mu\text{m}$  ทำให้ความสูงของแกนมีผลน้อยมาก ต่อความสูงโดยรวมของตัวเหนี่ยวนำ นอกจากนี้ แกนตัวเหนี่ยวนำสามารถสร้างขึ้นด้วยกระบวนการชุบเพียงครั้งเดียว โลหะ NiFe จะหุ้มตัวเหนี่ยวนำ สามารถกำหนดความหนาได้ตามต้องการ แต่ในการชุบโลหะให้ขึ้นในบริเวณที่กำหนด จะต้องมีการสร้างชั้นโลหะ seed-layer ซึ่งในที่นี้ใช้โลหะทองแดง เนื่องจากราคาถูก และเคลือบได้ง่าย กระบวนการสร้างแกนตัวเหนี่ยวนำ เริ่มจาก นำแผ่นพอลิเมอร์ที่มีขดลวดทองแดงฝังอยู่ ที่ได้จากขั้นตอนที่แล้ว เคลือบ dry-film ทั้งสองด้าน และนำไปอบรังสีอัลตราไวโอเล็ตสำหรับสร้างแผ่นวงจรพิมพ์ เป็นเวลา 25 วินาที ด้วยหน้ากา 2 ทำซ้ำทั้งสองด้าน จากนั้นนำไปล้างสารไวแสงออกด้วยน้ำยาล้าง dry film จะได้ช่องเปิดดังรูปที่ 6.58

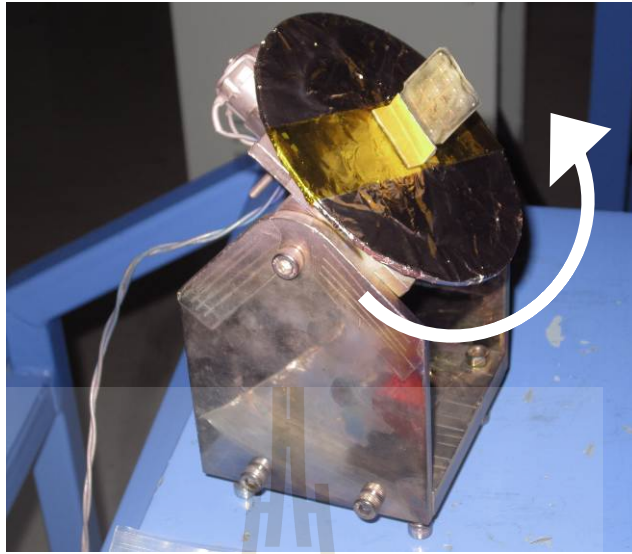


รูปที่ 6.58 ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบ dry film และเปิดลวดลาย

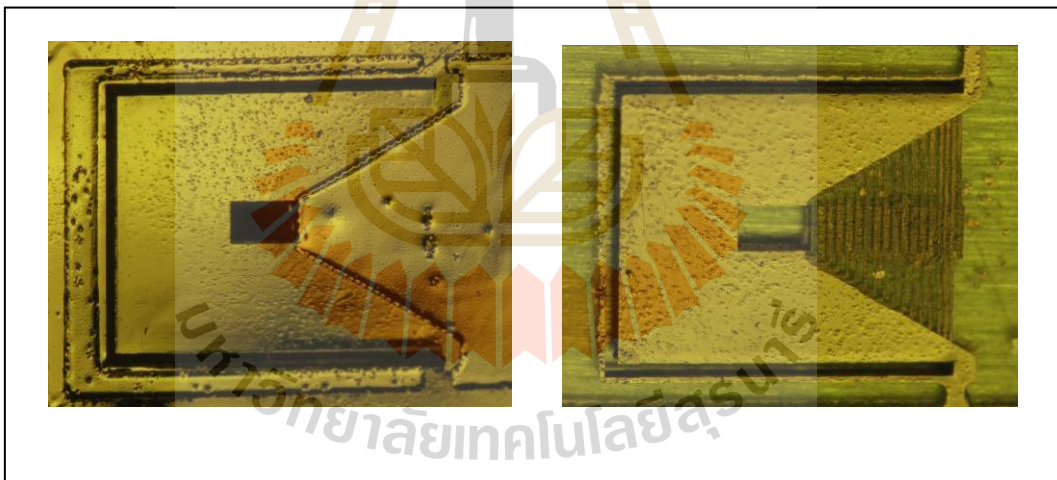
เมื่อได้ช่องเปิดลวดลาย dry film แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการเคลือบฟิล์มทองแดงให้ทั่วทั้งแผ่น โดยเฉพาะผนังด้านข้างของช่องเปิด มีรายละเอียดในการเคลือบฟิล์ม คือ นำชิ้นงานติดลงบนจานหมุนสำหรับเครื่อง sputtering ดังรูปที่ 6.59 จากนั้นนำเข้าเครื่อง และเคลือบโลหะ ด้วยกำลัง 200 W ครั้งละ 1 นาที จำนวน 10 ครั้ง เพื่อให้ฟิล์มเคลือบผนังด้านข้างของช่องเปิดอย่างทั่วถึง โดยในแต่ละครั้งที่เคลือบ ต้องเว้นระยะ 5 นาที เพื่อให้ชิ้นงานร้อนจนเกินไป หากเคลือบต่อเนื่อง ชิ้นงานจะไหม้ และบิดงอได้ เมื่อเคลือบโลหะเสร็จสิ้น จึงนำชิ้นงาน จุ่มในอะซิโตน เพื่อทำการ lift-off สารไวแสง dry film ออก ซึ่งจะทำให้โลหะทองแดงที่เคลือบอยู่บน dry film หลุดออกไปด้วย จะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 6.60 ซึ่งจะเห็นว่าโลหะจะเหลือในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น รวมไปถึงผนังด้านในของช่องเปิด และการออกแบบลวดลายในขั้นนี้ ต้องออกแบบให้ลวดลายเชื่อมถึงกันทั้งหมด เพื่อให้สามารถชุบโลหะได้ในครั้งเดียว ดังรูปที่ 6.61

ในขั้นต่อไป นำชิ้นงานที่ได้ ปิดด้วยเทปกาวโดยรอบ ให้เหลือเฉพาะบริเวณที่ต้องการชุบโลหะ นำชิ้นงานไปชุบโลหะ NiFe ด้วยกระแส 5 mA/cm<sup>2</sup> โลหะจะมีอัตราการเกิดอยู่ที่ 8 μm ต่อชั่วโมง ทำการชุบด้วยเวลา 2 ชั่วโมงจะได้ความหนาของโลหะ 16 μm แต่ในขั้นตอนนี้โลหะอาจเกิดความเค้น ทำให้โครงสร้างบิดงอได้ ดังรูปที่ 6.62 ดังนั้น ในตอนเริ่มต้นควรเริ่มต้นด้วยกระแส 1 mA/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 5 นาที เพื่อป้องกันแผ่นโลหะ निकออกจากกัน เนื่องจากความเค้น และเมื่อถึงขั้นตอนนี้ จะได้ ชุดของตัวเหนี่ยวนำซึ่งบรรจุอยู่ในแผ่น SU-8 ขั้นตอนที่ต่อไป จึงนำชิ้นงานกัดด้วยพลาสมา 200 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อเปิดลายบริเวณหัวไฟฟ้า จากนั้น นำชิ้นงานไปตัดแยก และเชื่อมต่อสายเพื่อทำการทดสอบคุณลักษณะสมบัติ ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป รูปที่ 6.65 แสดงภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ทั้งหมด

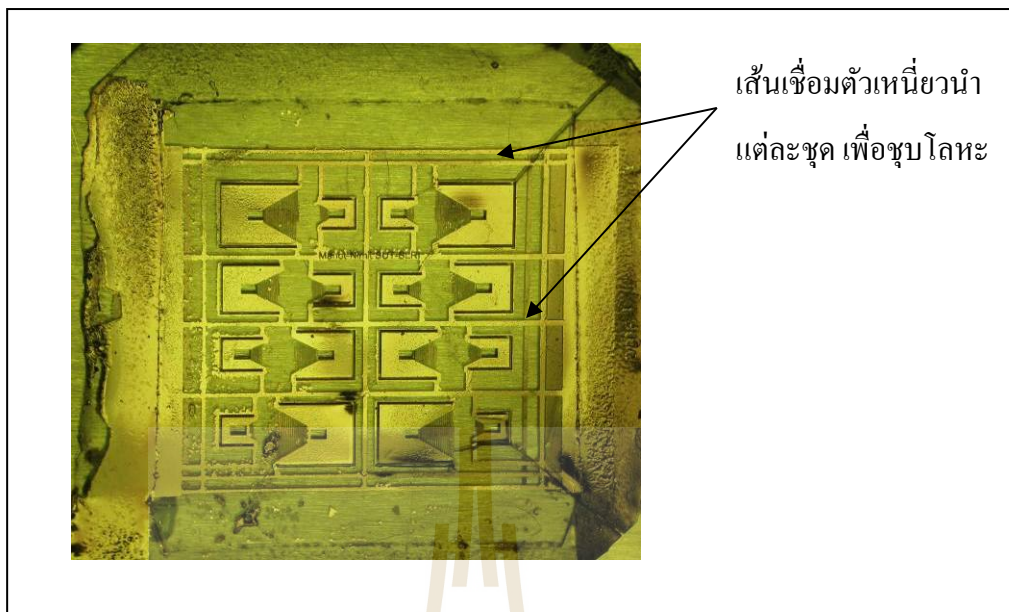




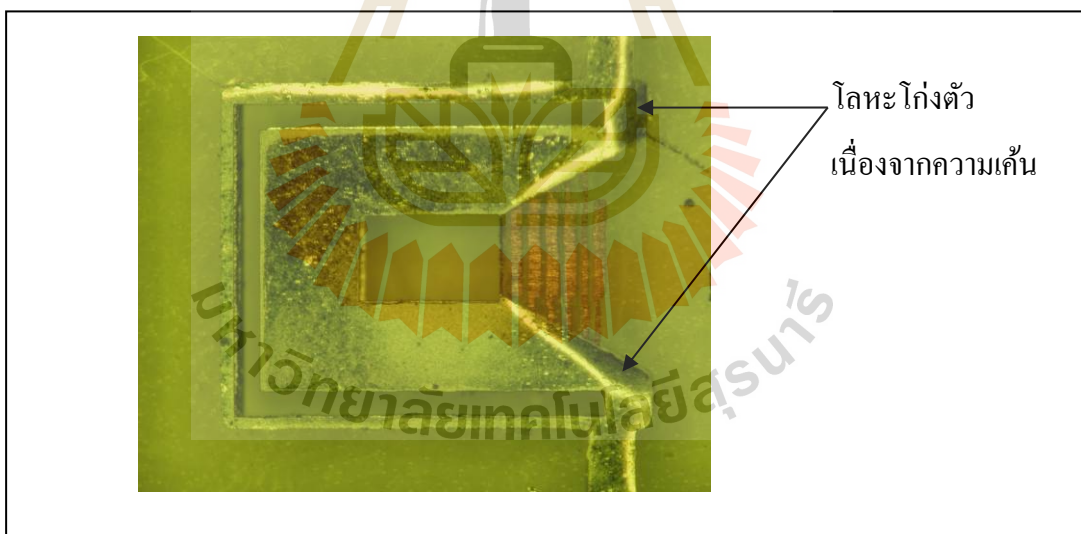
รูปที่ 6.59 ชิ้นงานที่ติดตั้งบนชุดหมุนเคลือบโลหะสำหรับเครื่อง sputter



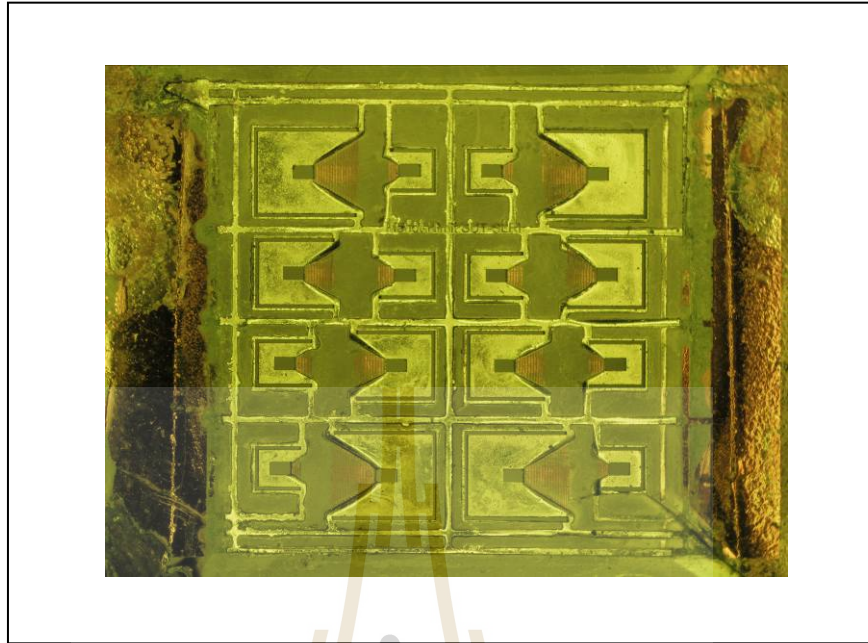
รูปที่ 6.60 ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบทองแดง และ lift-off



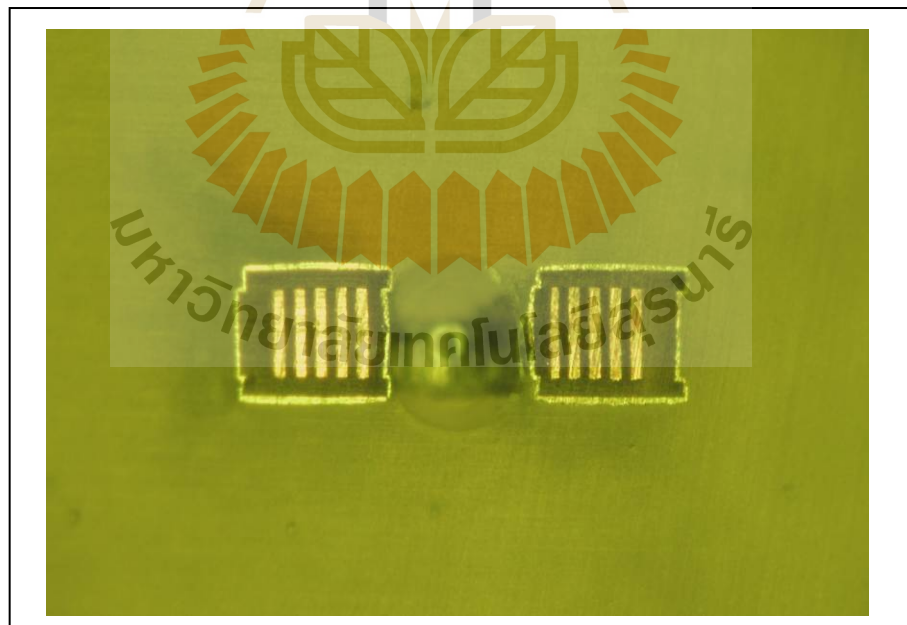
รูปที่ 6.61 เส้นตัวนำเชื่อมชิ้นงานแต่ละตัวเข้าด้วยกัน



รูปที่ 6.62 ความเค้นที่เกิดขึ้นในโลหะ NiFe



รูปที่ 6.63 ตัวเหนียวน้ำที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ และตัดแยกออกจากชิ้นงาน



รูปที่ 6.64 ภาพตัดขวางของตัวเหนียวน้ำชนิด 5 รอบ



รูปที่ 6.65 ภาพตัดขวางกระบวนการสร้างตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2

## 6.5 ผลการวัด รูป และวิเคราะห์

ตัวเหนี่ยวนำในวงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง มีคุณลักษณะสมบัติที่สำคัญ คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่ใช้งาน ค่าความต้านทานกระแสตรง และค่ากระแสอิ่มตัว ในส่วนนี้ จะเป็นผลการวัดคุณลักษณะสมบัติดังกล่าว ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 และ SUT-L2 มีช่วงความถี่ของการวัดอยู่ในช่วง 30 kHz ถึง 1 GHz เพื่อประเมินจุด SRF ส่วนค่ากระแสไบอัสที่ใช้ทดสอบ มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 A ผลการทดสอบ มีดังนี้

### 6.5.1 ผลการวัดของตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L1

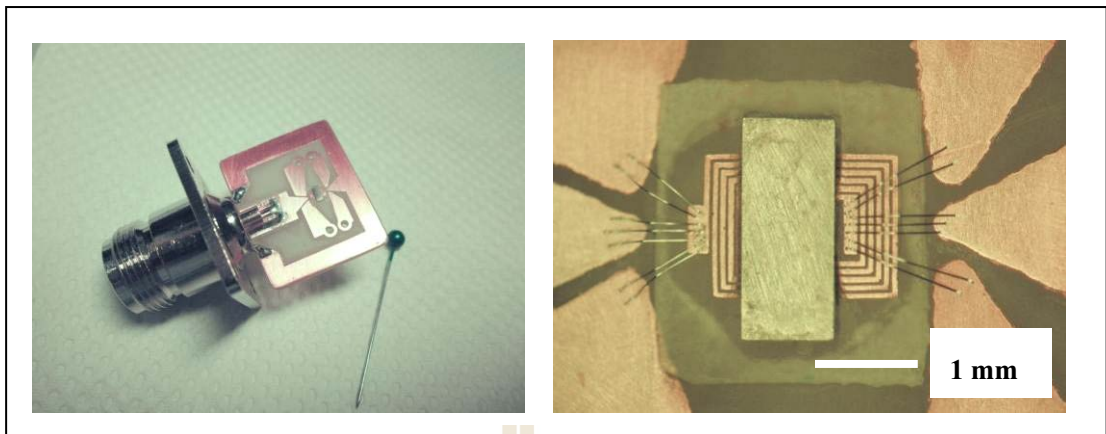
ในการทดสอบตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L1 จุดเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้ามีขนาด  $200 \times 700 \text{ mm}^2$  จึงต้องเชื่อมต่อสายด้วยเครื่องเชื่อมต่อสาย ซึ่งเส้นลวดเป็นโลหะอลูมิเนียมขนาด  $20 \text{ }\mu\text{m}$  ดังรูปที่ 6.66 เส้นลวดแต่ละเส้นสามารถนำกระแสได้ 500 mA ดังนั้น เพื่อให้สามารถนำกระแสได้ 1 A จึงใช้เส้นลวด 3 เส้นต่อ 1 ชุด โดย ชุดที่เพิ่มเข้ามาเพื่อสำรองกรณีเส้นลวดขาด และเพื่อช่วยลดค่าความต้านทานด้วย นอกจากนี้ ยังมีเส้นลวดเพิ่มเข้ามาอีกด้านละสี่เส้น เพื่อใช้วัดค่าความต้านทานแบบสี่จุด ดังรูปที่ 6.67



รูปที่ 6.66 ภาพถ่ายเส้นลวดเชื่อมต่อสายขนาด  $20 \text{ }\mu\text{m}$  จากกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอน

#### แบบสองกราด

ในการทดสอบวัดคุณสมบัติ ตัวเหนี่ยวนำจะยึดลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ เชื่อมด้วยเส้นลวด และแผ่นวงจรพิมพ์จะยึดเข้ากับหัวเชื่อมต่อชนิด N (N-Type connector) ดังรูปที่ 6.67 ถึง 6.68 โดยหัวเชื่อมต่อชนิดนี้สามารถรองรับความถี่ได้ถึง 6 GHz และสามารถเชื่อมต่อเข้ากับ VNA ได้โดยตรง



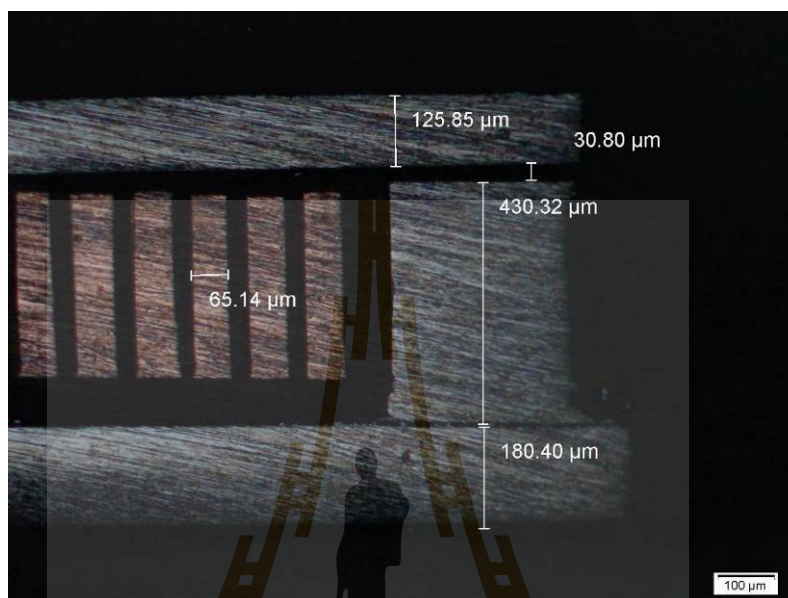
รูปที่ 6.67 ตัวเหนี่ยวนำบนแผ่นวงจรมิครอปะติดกับ N-type connector สำหรับการทดสอบความต้านทานกระแสตรง และทดสอบที่ความถี่สูง



รูปที่ 6.68 ชุดตัวเหนี่ยวนำบนแผ่นวงจรมิครอปะติดกับ N-type connector

ในการวัดค่าความต้านทานกระแสตรง ต้องใช้การวัดด้วยหัววัดสี่จุด ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ ทฤษฎีและการวัดผล ตัวเหนี่ยวนำที่สร้างได้จริงมีขนาดต่างจากที่ออกแบบ คือ ความกว้าง ออกแบบไว้ 50  $\mu\text{m}$  แต่สร้างได้จริง 65  $\mu\text{m}$  เนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนในการสร้างฟิล์มทึบแสง แต่ส่งผลดีต่อค่าความต้านทาน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้ รูปที่ 6.69

แสดงภาพตัดขวางของโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำที่สร้างได้จริง ส่วนผลการวัดค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำชนิด 3.5 รอบ และ 5.5 รอบ เป็นดังตารางที่ 6.6 จะเห็นว่า ค่าความต้านทานกระแสตรงมีค่าเท่ากับ 21.1 m $\Omega$  และ 25.2 m $\Omega$  สำหรับตัวเหนี่ยวนำชนิด 3.5 รอบ และ 5.5 รอบ ตามลำดับ

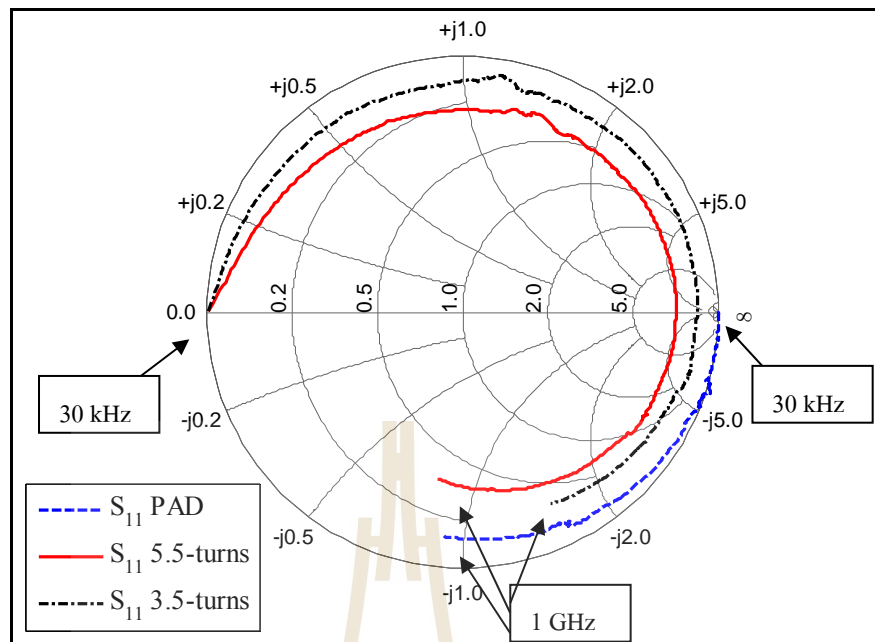


รูปที่ 6.69 ภาพตัดขวางแสดงขนาดของขดลวดตัวเหนี่ยวนำที่สร้างได้จริง

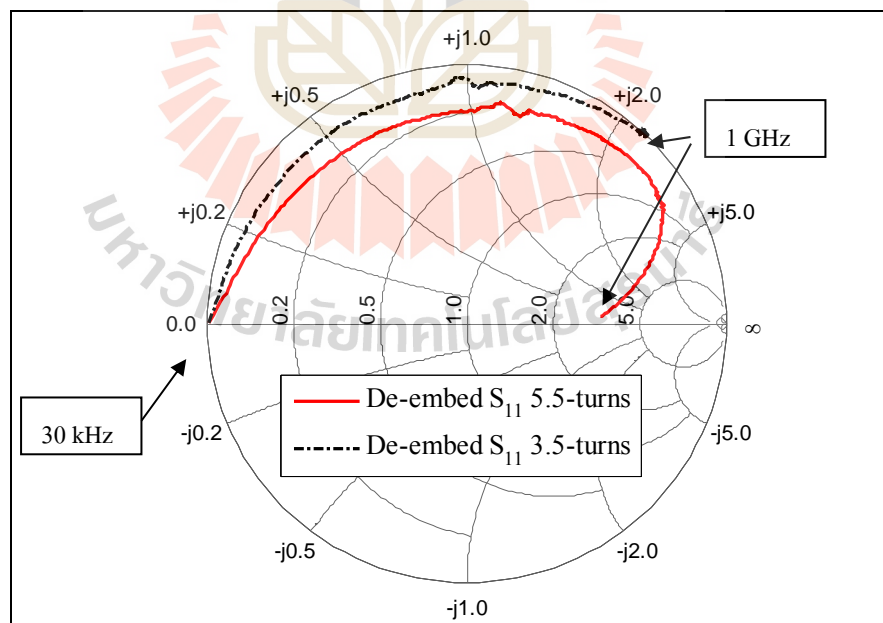
ตารางที่ 6.6 ค่าความต้านทานกระแสตรงจากการคำนวณตามขนาดที่สร้างได้จริง และจากการวัด

Inductor	R <sub>DC</sub> Calc (m $\Omega$ )	R <sub>DC</sub> measure (m $\Omega$ )	R <sub>DC</sub> error (m $\Omega$ )	Coil thickness ( $\mu$ m)	Coil width ( $\mu$ m)
3.5 turns	19.4	21.1	1.7	330	65
5.5 turn	26.8	25.2	1.6	330	65

ในขั้นต่อไป เป็นผลการวัดค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 1 GHz วัดผลด้วย VNA และนำ S-parameter ที่ได้คำนวณหาความเหนี่ยวนำอนุกรม และค่าความต้านทานอนุกรม ซึ่งได้ตัดผลของแผ่นวงจรพิมพ์ออกแล้ว รูปที่ 6.70 แสดงค่า  $S_{11}$  ของตัวเหนี่ยวนำทั้งสอง จะเห็นว่า เส้นสีน้ำเงิน คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากแผ่นวงจรพิมพ์ ในการคำนวณ จะต้องตัดค่าความจุไฟฟ้านี้ออก เพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่แท้จริง รูปที่ 6.71 แสดง  $S_{11}$  ของตัวเหนี่ยวนำทั้งสองที่ได้ลบค่าความจุไฟฟ้าจากแผ่นวงจรพิมพ์ออกแล้ว จะเห็นว่า ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้น และจุด SRF ของตัวเหนี่ยวนำทั้งสอง มีค่าสูงกว่า 1 GHz



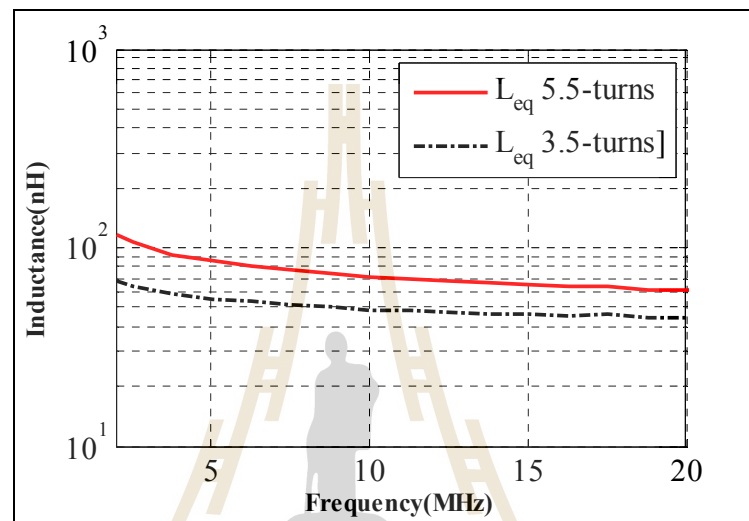
รูปที่ 6.70 ค่า  $S_{11}$  ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 และแผ่นวงจรพิมพ์ในช่วงความถี่ 30 kHz ถึง 1 GHz ซึ่งรวมผลของค่าความจุไฟฟ้าจากแผ่นวงจรพิมพ์



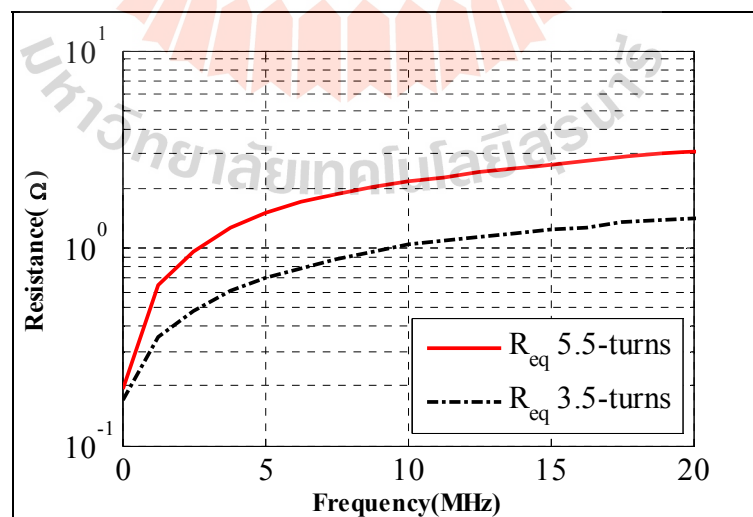
รูปที่ 6.71 ค่า  $S_{11}$  ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 1 GHz ที่ได้ตัดค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นวงจรพิมพ์แล้ว



ตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ได้ออกแบบใช้งานที่ความถี่ไม่เกิน 20 MHz ดังนั้นในการทดสอบ ค่าความเหนี่ยวนำที่พิจารณา จึงมีค่าอยู่ในช่วงดังกล่าว ดังรูปที่ 6.72 จะเห็นว่าค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเปลี่ยนไปตามความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากค่า skin depth ของวัสดุ NiFe ดังที่ได้กล่าวไว้ในส่วนของกรออกแบบ ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าอยู่ในช่วง 120 nH ถึง 60 nH และ 65 nH ถึง 48 nH สำหรับตัวเหนี่ยวนำชนิด 5.5 รอบ และ 3.5 รอบ ตามลำดับ



รูปที่ 6.72 ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 20 MHz

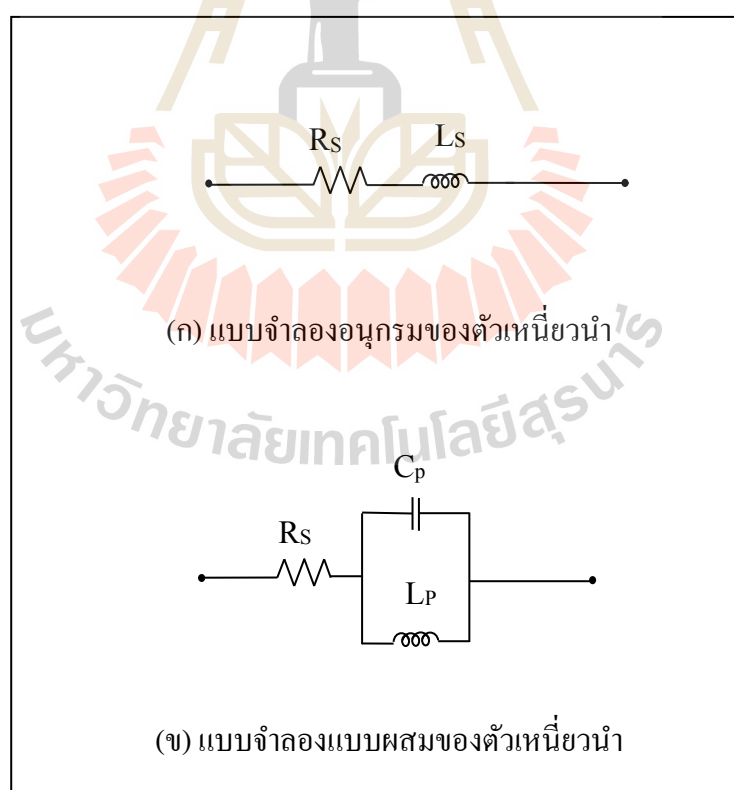


รูปที่ 6.73 ค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 20 MHz

ตารางที่ 6.7 ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการวัดที่ความถี่ 1 MHz

Inductor	$L_{Calc}$ (nH)	$L_{meas}$ (nH)
3.5 turns	60	70
5.5 turn	100	120

ในการวิเคราะห์ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้สำหรับความถี่ในย่าน MHz โดยทั่วไปนิยมใช้แบบจำลองดังรูปที่ 6.74 (ก) เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าขนานที่เกิดขึ้นระหว่างขด มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความเหนี่ยวนำ แต่เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำมีค่าน้อย ในส่วนนี้จึงได้ทดสอบสร้างแบบจำลองที่คิดผลของค่าความจุไฟฟ้าขนาน ดังรูปที่ 6.74 (ข) โดยในแบบจำลองได้วางตัวเก็บประจุขนานกับตัวเหนี่ยวนำ เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปสมการจะได้ดังสมการที่ 6.17 จะเห็นว่า การจัดรูปในลักษณะนี้ จะช่วยให้ส่วนจริง และส่วนจินตภาพแยกจากกัน ทำให้รูปแบบสมการที่ใช้หาแบบจำลอง อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น



รูปที่ 6.74 แบบจำลองอนุกรมและแบบผสมของตัวเหนี่ยวนำ

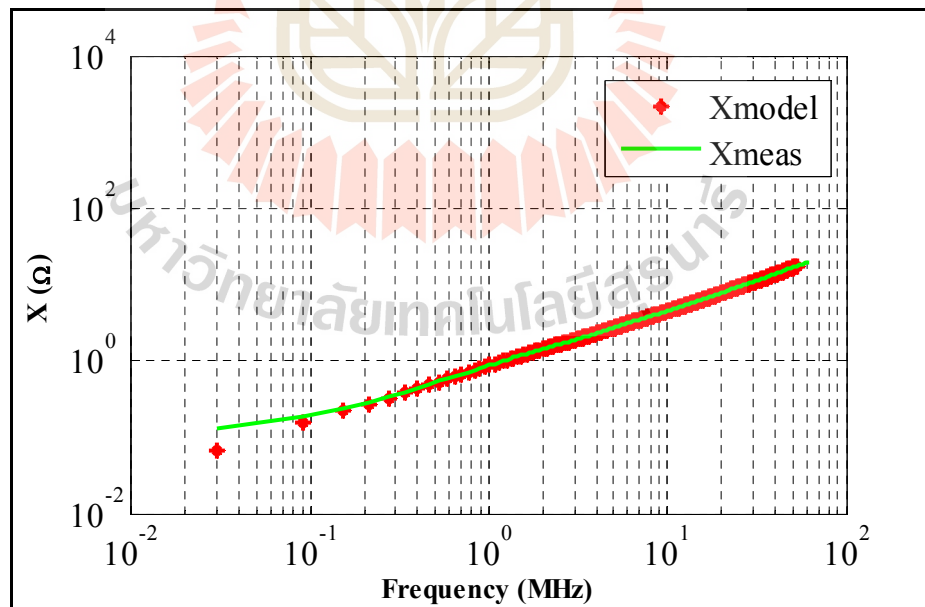
$$Z_s = Z_1 + Z_2 \quad (6.16)$$

$$Z_s = R + j \left( \frac{\omega L}{1 - \omega L \cdot \omega C} \right) \quad (6.17)$$

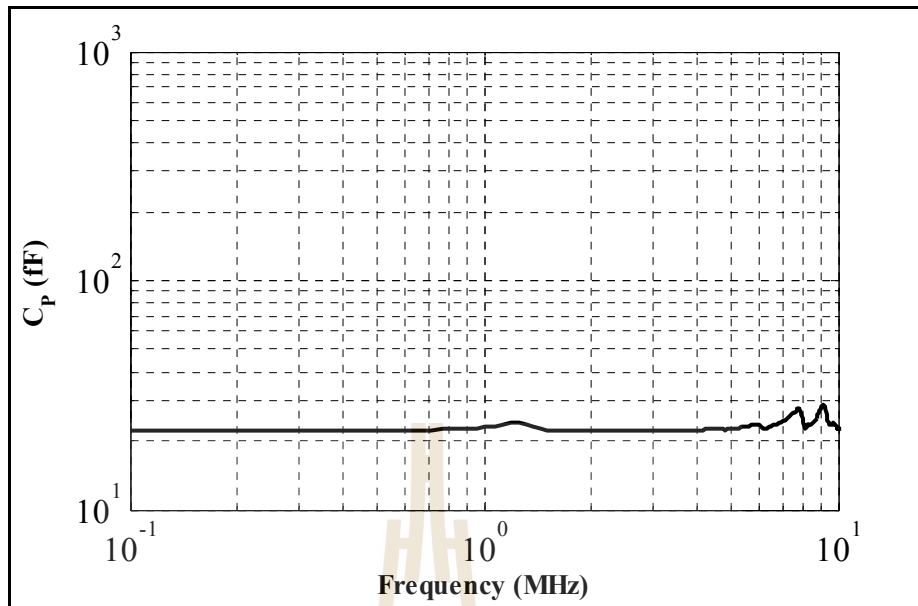
$$\text{Re}(Z_s) = R \quad (6.18)$$

$$\text{Im}(Z_s) = \left( \frac{\omega L}{1 - \omega L \cdot \omega C} \right) \quad (6.19)$$

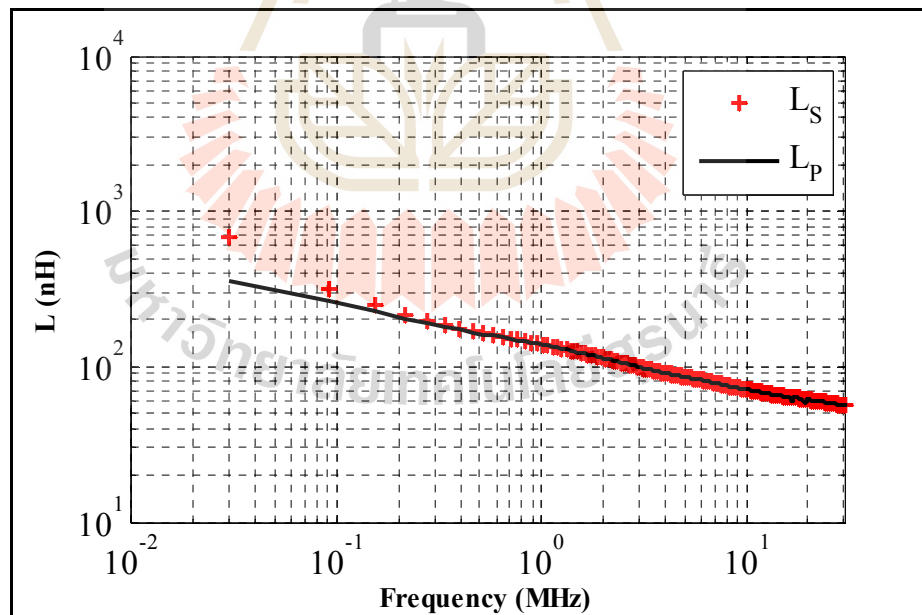
จากผลการสร้างแบบจำลองพบว่า ค่า  $C_p$  มีค่าประมาณ 22 pF และเปลี่ยนไปตามความถี่เล็กน้อย ดังรูปที่ 6.76 จากนั้นเมื่อนำค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณจากวงจรอนุกรมโดยตรงเทียบกับค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากวงจรแบบผสม พบว่ามีค่าต่างกันสูงสุดเพียง 5% ดังรูปที่ 6.78 ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าแฝงในโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำชนิดนี้ มีผลน้อยมาก สามารถละทิ้งได้ตามที่คาด



รูปที่ 6.75 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ชนิด 5.5 รอบ ที่วัดได้จริง เทียบกับการสร้างแบบจำลองที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 50 MHz

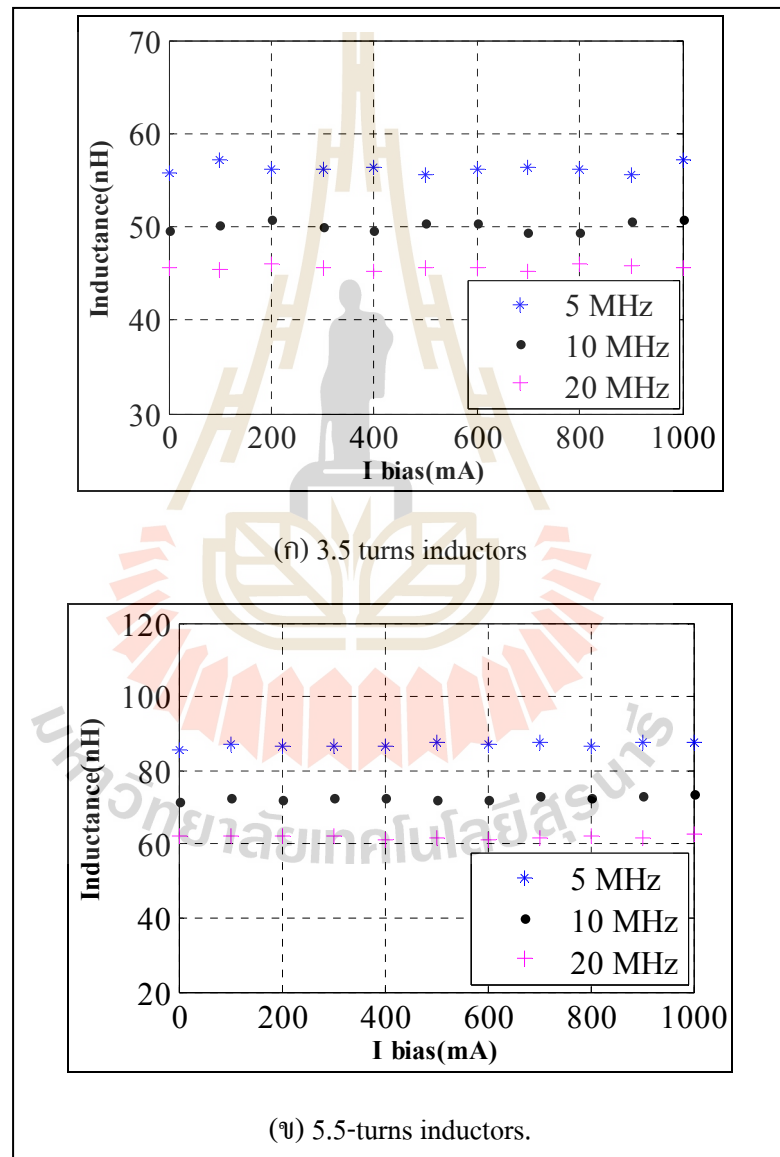


รูปที่ 6.77 แสดงค่าความจุไฟฟ้าขนานจากการสร้างแบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ชนิด 3 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 10 MHz

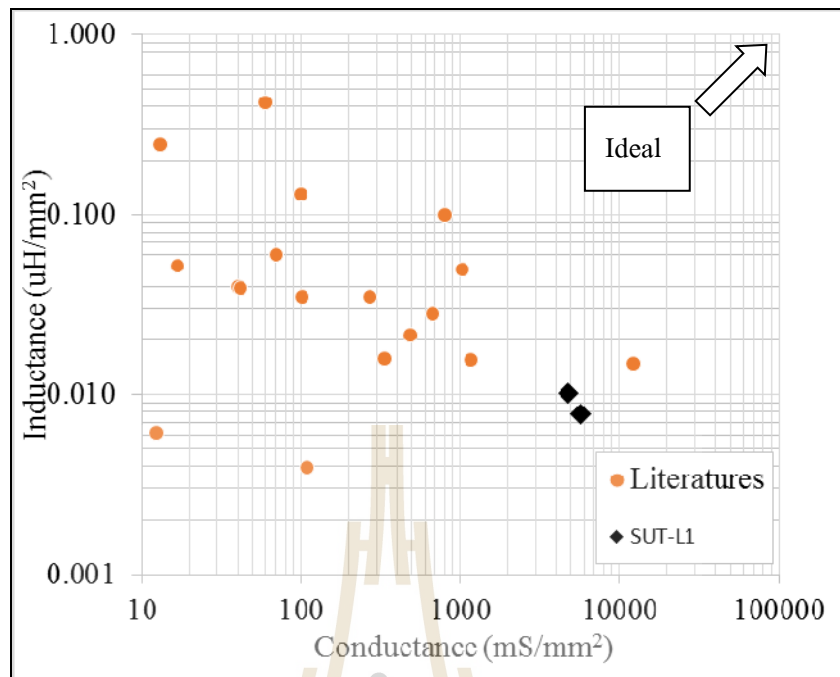


รูปที่ 6.78 แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากแบบจำลองอนุกรม เทียบกับแบบจำลองขนานของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ชนิด 5.5 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 20 MHz

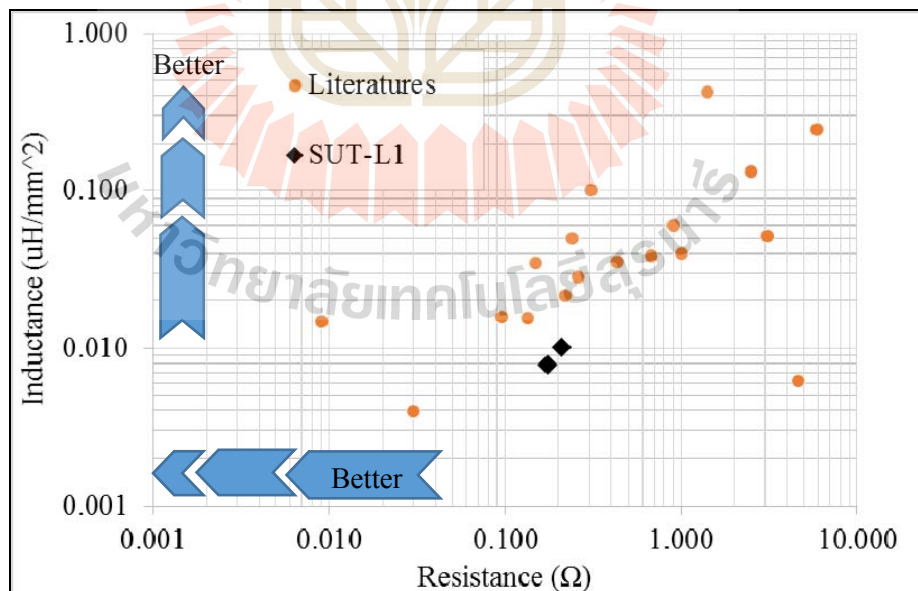
พิกัดกระแสของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ที่ได้ออกแบบใช้งานมีพิกัดอยู่ที่ 1 A ดังนั้น เพื่อให้แน่ใจว่า ตัวเหนี่ยวนำสามารถใช้งานได้ที่กระแส 1 A โดยที่แกนไม่เกิดการอิ่มตัว จึงต้องวัดค่าความเหนี่ยวนำ เมื่อมีการป้อนกระแสจนถึงพิกัด ซึ่งในการวัดโดยใช้ VNA จะสามารถวัดที่ความถี่ทุกค่าได้พร้อมกันที่กระแสใด ๆ รูปที่ 6.79 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำชนิด 3.5 รอบ และ 5.5 รอบ ที่ความถี่ 5 MHz 10 MHz และ 20 MHz จากรูปจะเห็นได้ว่า ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าคงที่จนถึงค่ากระแสพิกัด 1 A



รูปที่ 6.79 ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำเมื่อไบอัสกระแสในช่วง 0 ถึง 1 A



รูปที่ 6.80 เปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำและความนำต่อพื้นที่ ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 เทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ



รูปที่ 6.81 เปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 เทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

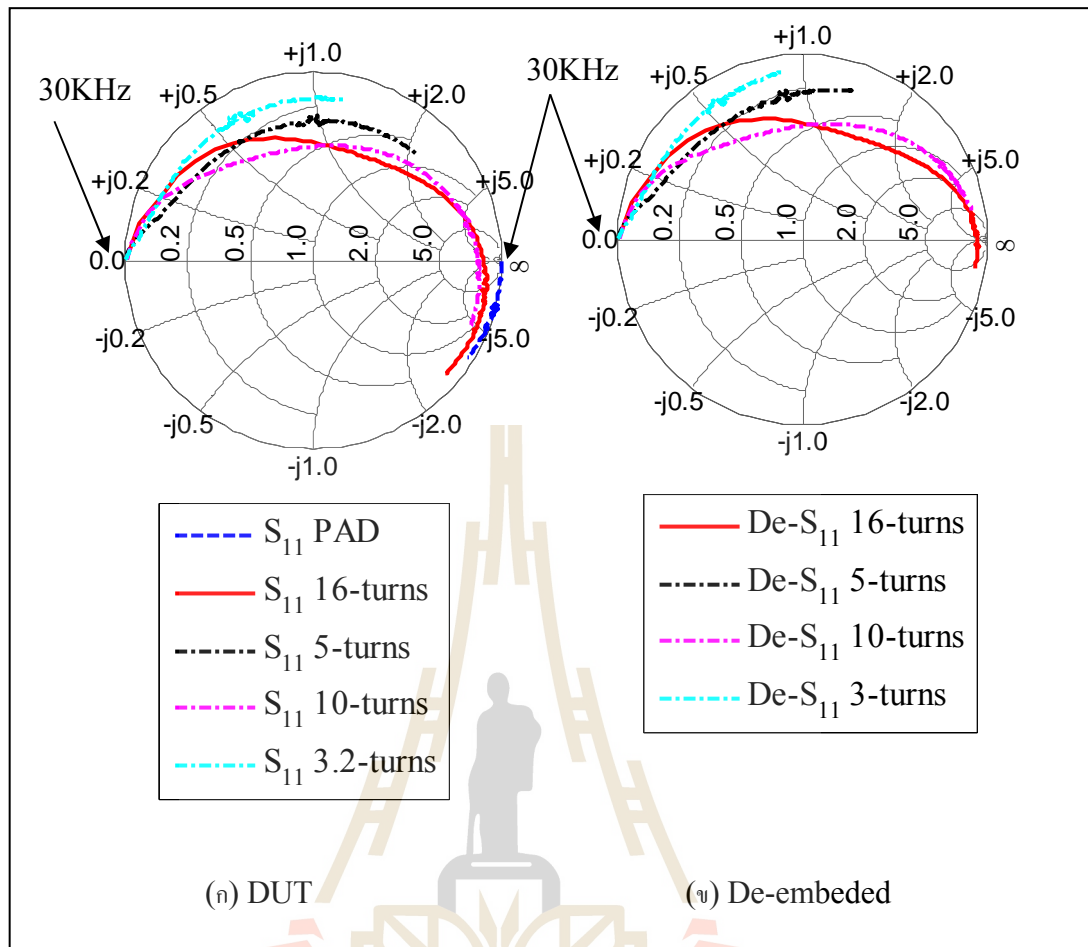
## 6.5.2 ผลการวัดของตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L2

การวัดคุณลักษณะสมบัติของตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L2 ใช้วิธีการวัดเหมือนตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 ในขั้นแรกต้องดำเนินการวัดขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่สร้างได้จริง เพื่อให้สอดคล้องกับการคำนวณ จากการวัดขนาดพบว่าเส้นลวดของตัวเหนี่ยวนำมีความกว้าง 23  $\mu\text{m}$  ซึ่งเล็กกว่าขนาดฟิล์มที่พิมพ์ไว้ที่ 25  $\mu\text{m}$  จากนั้นนำขนาดที่วัดได้ไปคำนวณค่าความต้านทานกระแสดตรง จะได้ค่าความต้านทาน  $R_{DC\text{ Calc}}$  ดังตารางที่ 6.8 จากนั้นเมื่อวัดจริงด้วยวิธีการวัดแบบสี่จุดพบว่า ค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณมาก แต่จะมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดสำหรับตัวเหนี่ยวนำแบบ 16 รอบ เนื่องจากมีเส้นตัวนำค่อนข้างยาว จึงมีความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นลวดที่ไม่เท่ากันตลอดทั้งเส้น

ตารางที่ 6.8 ค่าความต้านทานกระแสดตรงของตัวเหนี่ยวนำจูลภาคกำลังที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการวัดจากโครงสร้างจริง

Inductor	$R_{DC\text{ meas}}$ ( $\text{m}\Omega$ )	$R_{DC\text{ Calc}}$ ( $\text{m}\Omega$ )	Coil thickness ( $\mu\text{m}$ )	Coil width ( $\mu\text{m}$ )
3 turns	29.8	29.3	250	23
5 turn	51.1	55.5	250	23
10 turn	148.6	143.8	250	23
16 turn	335.6	292.8	250	23

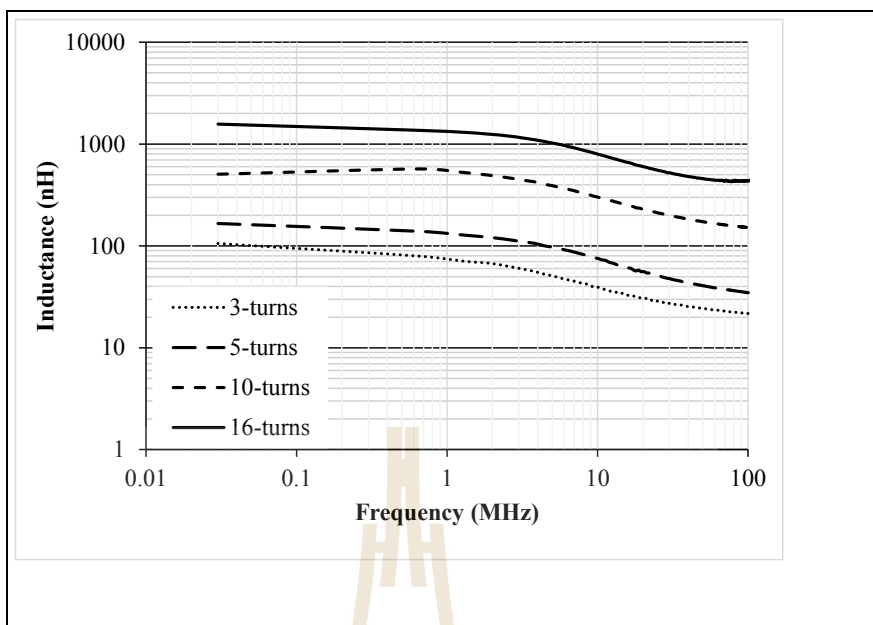
การวัดค่าความเหนี่ยวนำ ใช้การวัดด้วยเครื่อง VNA แบบ 1 พอร์ต เพื่อวัดค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  ซึ่งต้องวัดค่า  $S_{11}$  ของตัวเหนี่ยวนำที่ติดบนแผ่นวงจรพิมพ์ และวัดค่า  $S_{11}$  ของแผ่นวงจรพิมพ์เพียงอย่างเดียว เพื่อกำจัดผลของค่าความจุไฟฟ้าของขั้วต่อ N-Type และแผ่นวงจรโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำที่ติดลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ เป็นดังรูปที่ 6.82 จากผลการวัด ดังรูปที่ 6.83 จะเห็นว่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  ที่ได้ตัดผลของแผ่นวงจรพิมพ์แล้วจะมีค่าความเหนี่ยวนำสูงขึ้นอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 6.82 (ข) ส่งผลให้จุด SRF ของตัวเหนี่ยวนำสูงขึ้นด้วย เมื่อได้ค่า  $S_{11}$  ของตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวแล้ว จึงนำไปคำนวณค่าความเหนี่ยวนำที่ความถี่ในช่วงที่ต้องการใช้งานคือ 0 ถึง 20 MHz จะได้ค่าความเหนี่ยวนำดังรูปที่ 6.83 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเปลี่ยนไปตามความถี่ ซึ่งเป็นผลมาจาก skin effect ของแกน NiFe ส่วนค่าความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่เนื่องจากผลของ skin effect ในเส้นลวด ซึ่งจากคุณลักษณะสมบัติของตัวเหนี่ยวนำที่ได้เมื่อนำไปเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่าตัวเหนี่ยวนำโครงสร้าง SUT-L2 ที่สร้างขึ้น มีค่าความต้านทานต่อพื้นที่ต่ำกว่างานวิจัยอื่น ๆ และมีค่าความเหนี่ยวนำต่อพื้นที่สูงกว่างานวิจัยอื่น ๆ ดังรูปที่ 6.86 และ 6.87



รูปที่ 6.82 ค่า  $S_{11}$  ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 และแผ่นวงจรพิมพ์ในช่วงความถี่ 30 kHz ถึง 1 GHz ซึ่งรวมผลของค่าความจุไฟฟ้า และหลังลบผลของแผ่นวงจรพิมพ์

ในการวิเคราะห์ผลของค่าความจุไฟฟ้าขนานที่มีต่อค่าความเหนี่ยวนำ จากผลการสร้างแบบจำลองพบว่า ค่า  $C_p$  มีค่าประมาณ 22 fF และเปลี่ยนไปตามความถี่เล็กน้อย ดังรูปที่ 6.86 จากนั้นเมื่อนำค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณจากวงจรอนุกรมโดยตรง เทียบกับค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากวงจรแบบผสม พบว่ามีค่าต่างกันสูงสุดเพียง 5% ดังรูปที่ 6.87 ส่วนตัวเหนี่ยวนำชนิด 16 รอบ ให้ผลเช่นเดียวกันคือค่าความเหนี่ยวนำจากแบบจำลองทั้งสอง มีค่าต่างกัน สูงสุดเพียง 2% ดังรูปที่ 6.89 ดังนั้น ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำชนิดนี้ มีผลน้อยมากสามารถละทิ้งได้





รูปที่ 6.83 ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 20 MHz

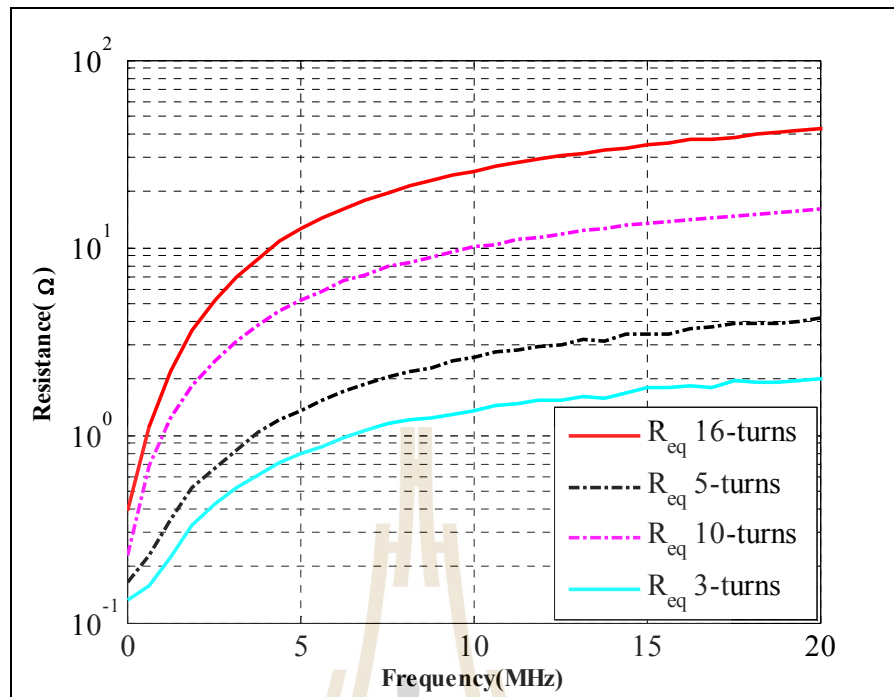
ตารางที่ 6.9 ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการวัด ที่ความถี่ 5 MHz

Inductor	L Calc (nH)	L meas (nH)
3 turns	47	51
5 turns	127	97
10 turns	484	390
16 turns	1196	1022

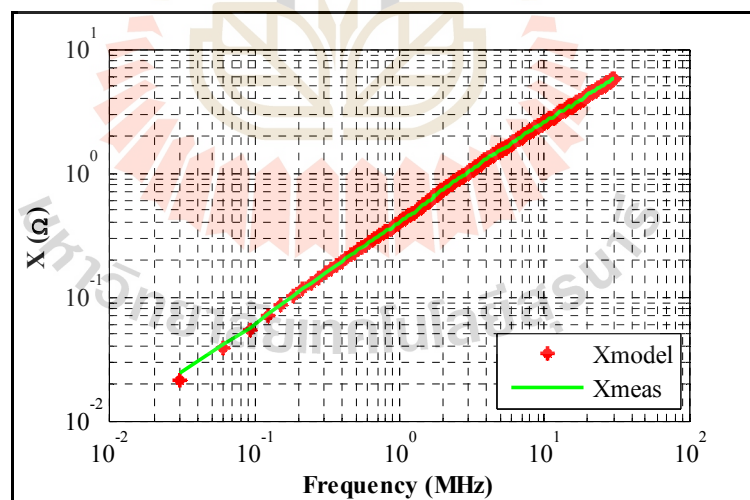
ในการทดสอบการอิ่มตัวของตัวเหนี่ยวนำ ได้ผลดังรูปที่ 6.80 โดยการอิ่มตัวของตัวเหนี่ยวนำจะนิยามโดย ค่าความเหนี่ยวนำลดลง 20% ของค่าเริ่มต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ตัวเหนี่ยวนำมีค่ากระแสอิ่มตัวที่ได้จากการวัดเป็นดังตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 ค่ากระแสอิ่มตัวของตัวเหนี่ยวนำจุดภาคที่ได้จากผลการวัด

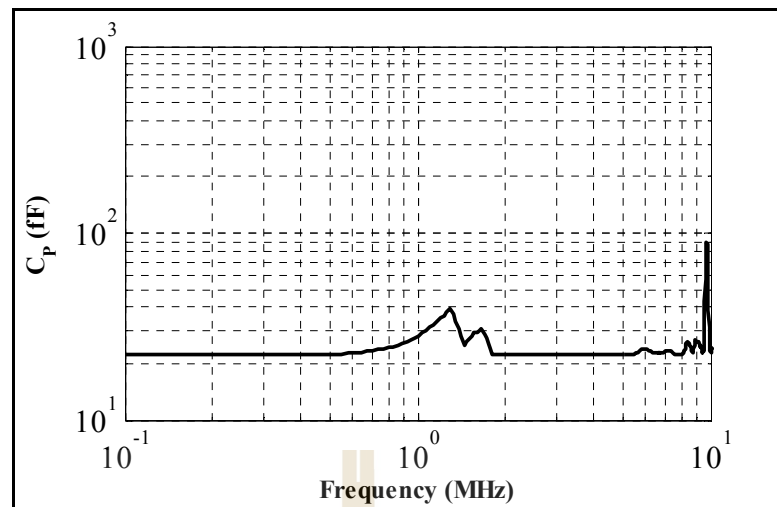
Inductor	I <sub>sat</sub> measure(mA)
3 turns	520
5 turn	450
10 turn	425
16 turn	440



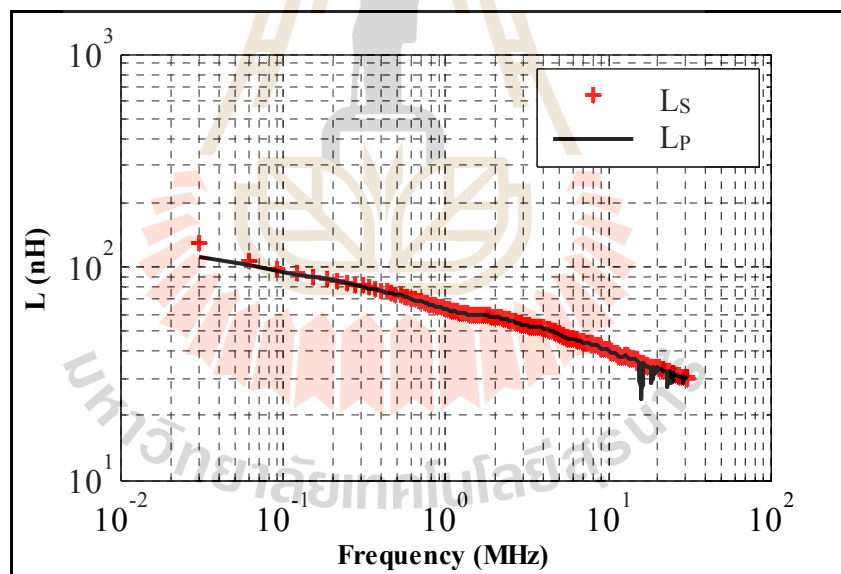
รูปที่ 6.84 ค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ที่ความถี่ในช่วง 30 kHz ถึง 20 MHz



รูปที่ 6.85 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ชนิด 3 รอบ ที่วัดได้จริง เทียบกับการสร้างแบบจำลองที่ความถี่ในช่วง 30 KHz ถึง 30 MHz

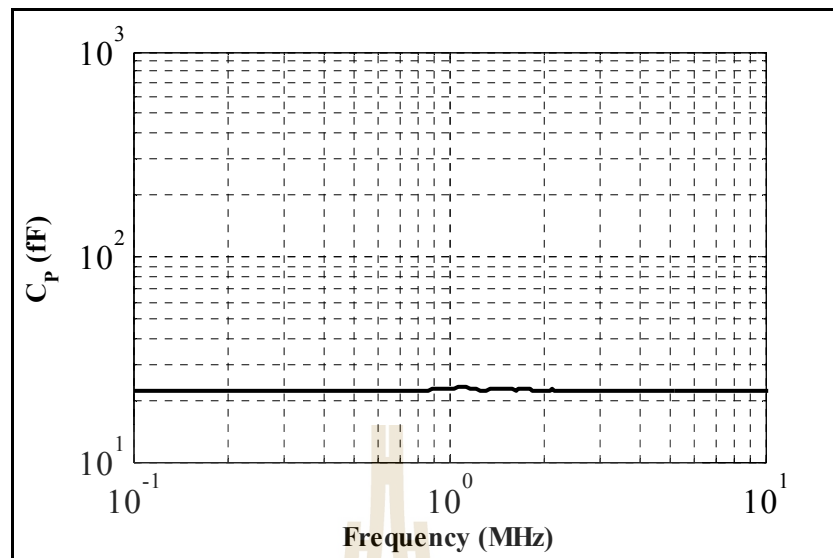


รูปที่ 6.86 แสดงค่าความจุไฟฟ้าขนานจากการสร้างแบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ชนิด 3 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 KHz ถึง 10 MHz

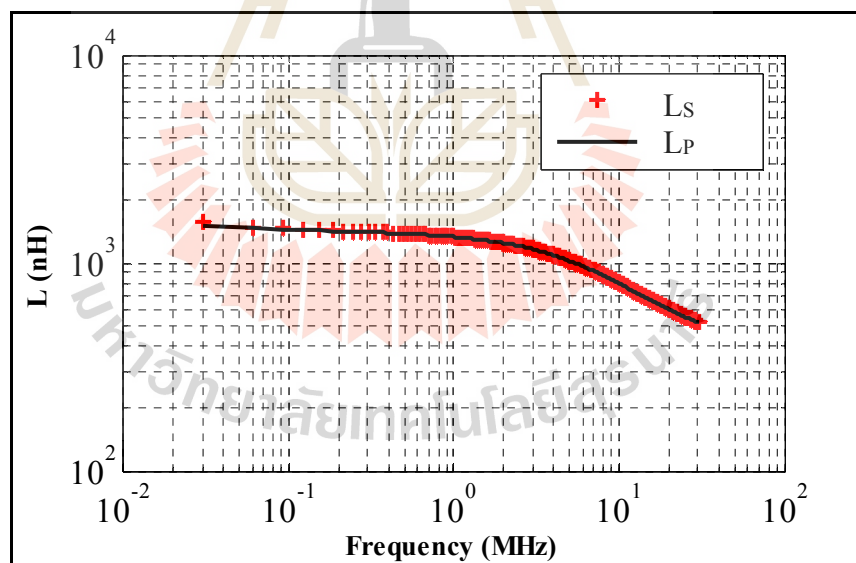


รูปที่ 6.87 แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากแบบจำลองอนุกรม เทียบกับแบบจำลองขนานของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ชนิด 3 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 KHz ถึง 30 MHz

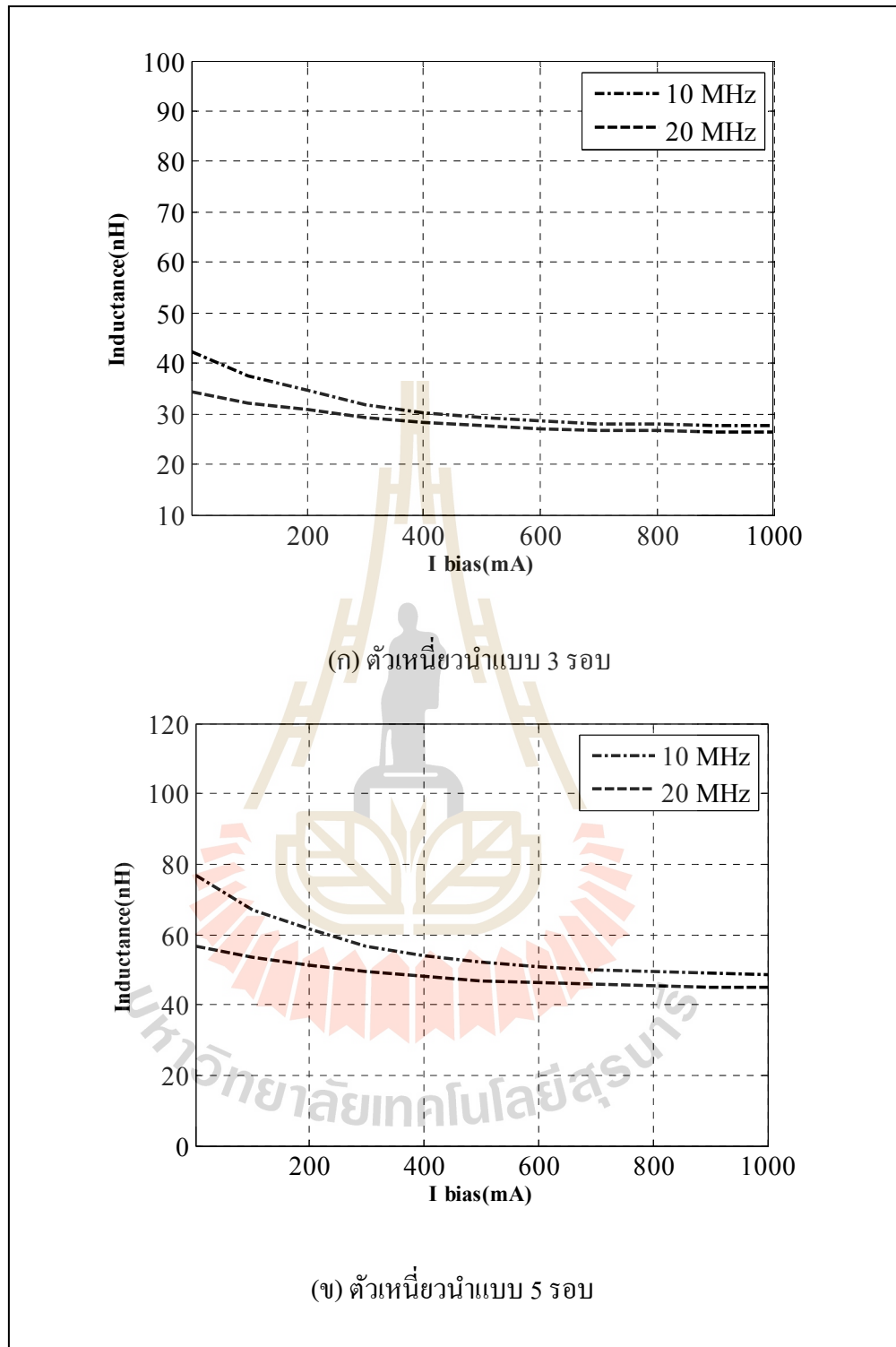
จากผลการวัดตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 6.91 และ 6.92 จะเห็นว่าค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำที่ได้ มีค่าค่อนข้างอยู่ในเกณฑ์ดี อยู่ในระดับต้น ๆ ของงานวิจัยทั้งหมด และดีกว่าตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1



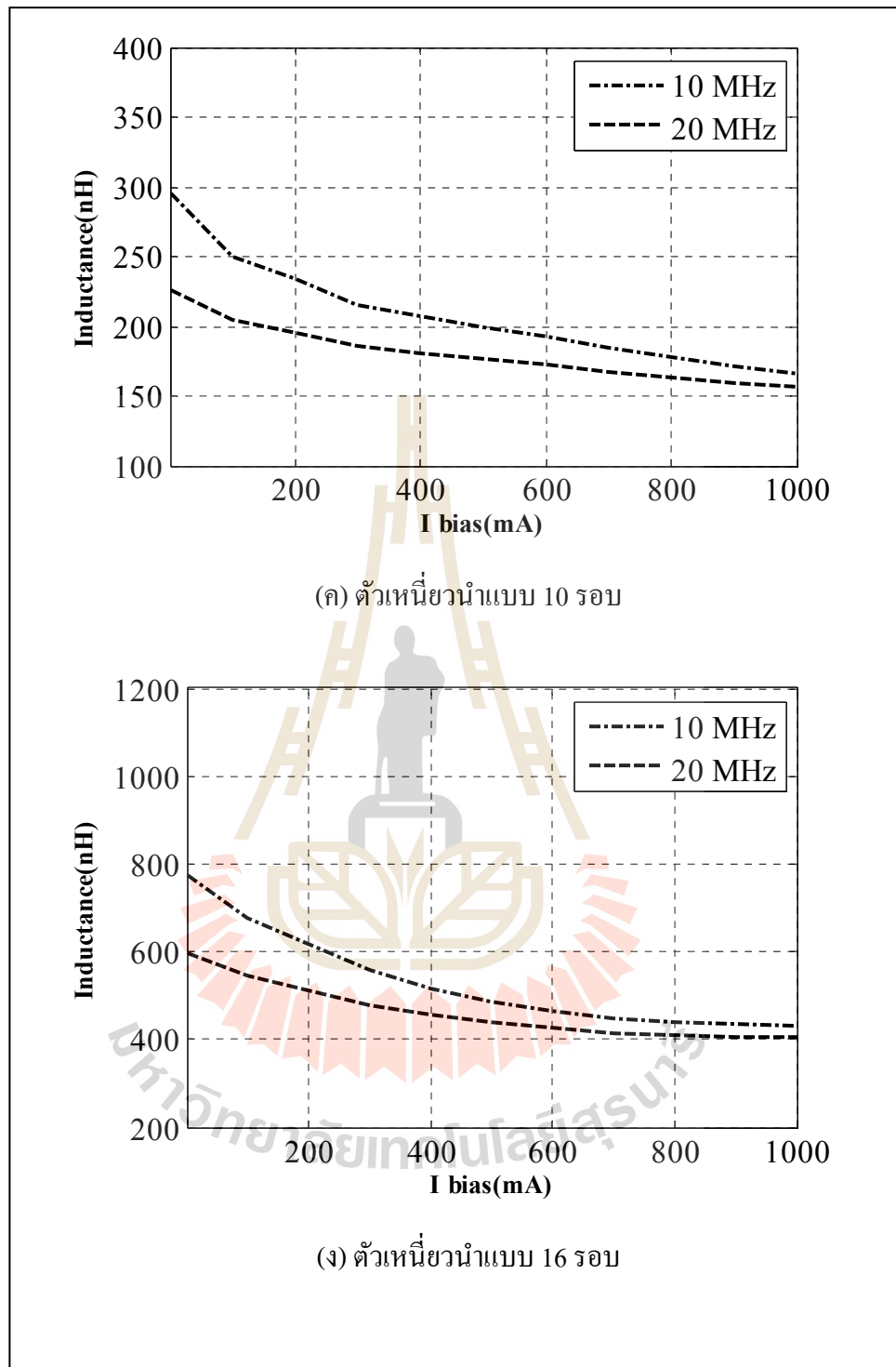
รูปที่ 6.88 แสดงค่าความจุไฟฟ้าขนานจากการสร้างแบบจำลองของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ชนิด 16 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 KHz ถึง 10 MHz



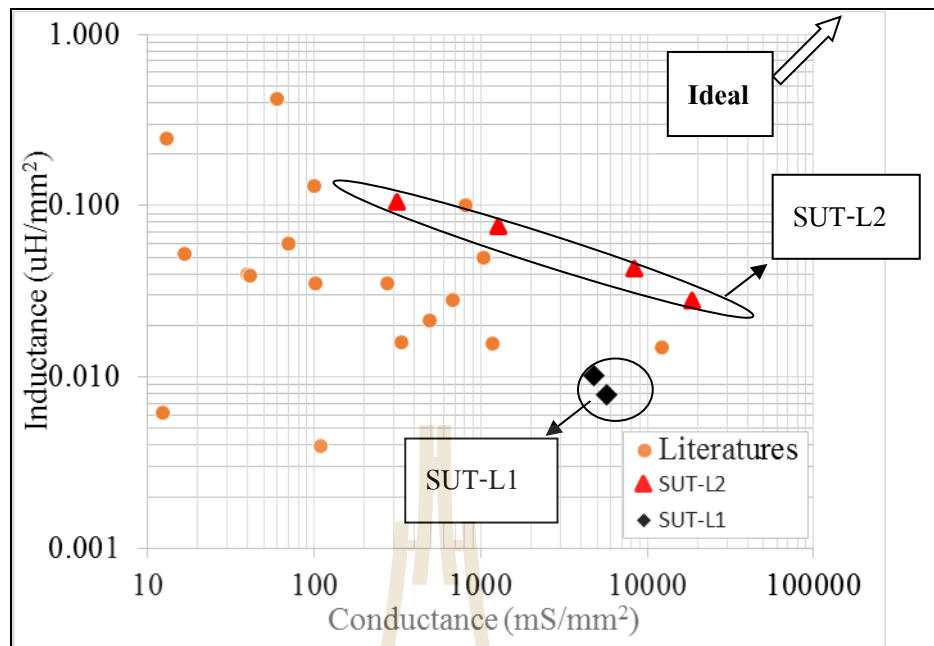
รูปที่ 6.89 แสดงค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากแบบจำลองอนุกรม เทียบกับแบบจำลองขนานของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ชนิด 16 รอบ ที่ความถี่ในช่วง 30 KHz ถึง 30 MHz



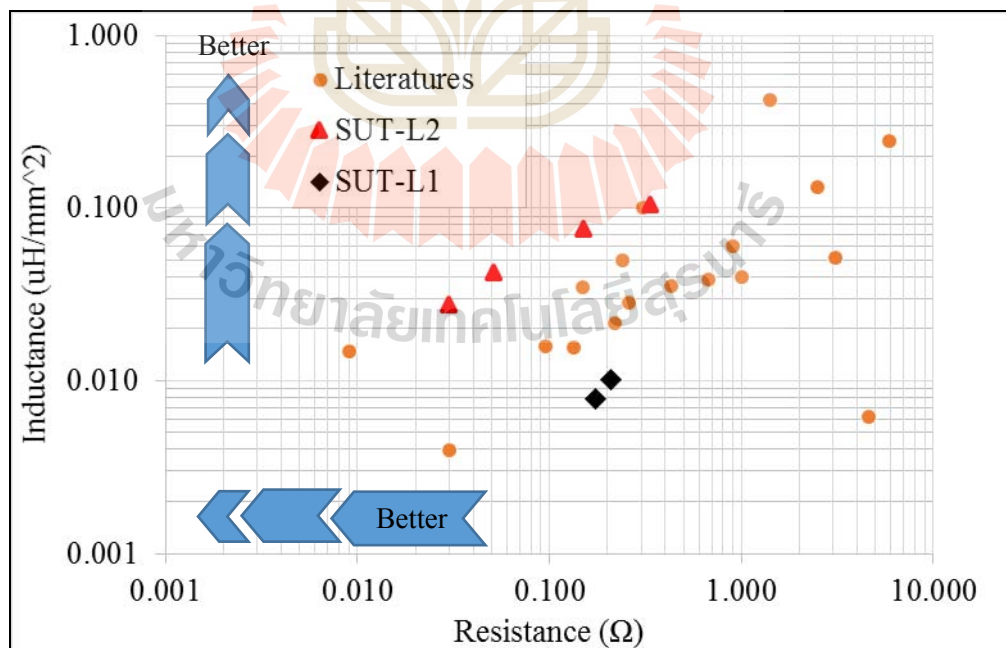
รูปที่ 6.90 ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 เมื่อไบอัสกระแสใน ช่วง 0 ถึง 1 A



รูปที่ 6.90 ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 เมื่อไบอัสกระแสในช่วง 0 ถึง 1 A (ต่อ)



รูปที่ 6.91 เปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำและความนำต่อพื้นที่ ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 เทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ



รูปที่ 6.92 เปรียบเทียบค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทาน ของตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 เทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

## บทที่ 7

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปงานวิจัย

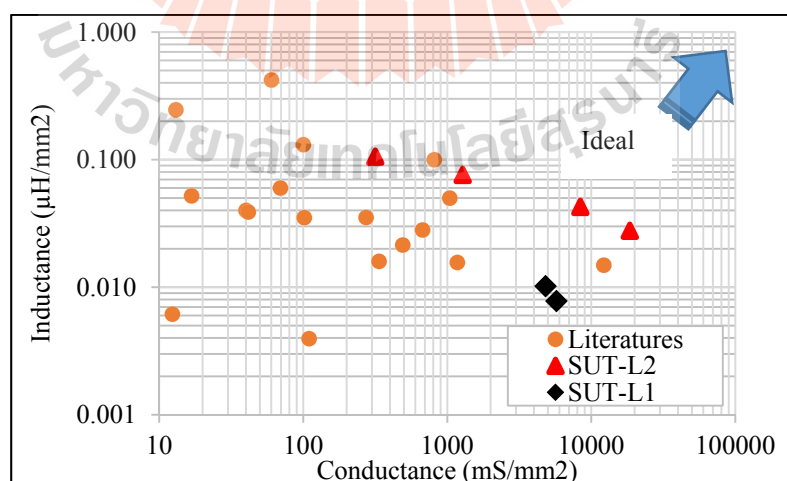
งานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็นสามส่วน คือ ส่วนแรกนำเสนอการพัฒนากระบวนการสร้างชิ้นส่วนจุลภาคด้วยวิธีการสร้างชิ้นส่วนฝังในแม่พิมพ์พอลิเมอร์ SU-8 กระบวนการนี้ได้พัฒนาจนสามารถใช้งานได้จริง แผ่นพอลิเมอร์ที่สามารถสร้างได้บางที่สุดในขณะนี้คือ 150  $\mu\text{m}$  และหนาสูงสุด 800  $\mu\text{m}$  อัตราส่วนสูงสุดของความสูงต่อความกว้างที่สามารถสร้างได้เท่ากับ 10 โลหะที่ฝังตัวในแม่พิมพ์สามารถใช้โลหะได้หลายชนิดตามต้องการ เช่น ทองแดง นิกเกิล เงิน และทอง เมื่อกระบวนการนี้ถูกพัฒนาจนสามารถใช้งานได้จริง ในงานวิจัยส่วนที่สอง จึงได้นำไปประยุกต์สร้างชิปตัวเก็บประจุแบบฝังตัวในแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 สร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ สำหรับใช้งานย่านความถี่วิทยุ แม่พิมพ์จะเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างโดยไม่ต้องมีการกำจัดทิ้ง จึงช่วยลดระยะเวลาในการสร้างชิ้นงาน โครงสร้างของตัวเก็บประจุออกแบบเป็นซี่หวีจำนวน 7 ซี่ เพื่อให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 2 pF โครงสร้างมีความสูง 350  $\mu\text{m}$  ระยะช่องไดอิเล็กตริก 25  $\mu\text{m}$  จากการทดสอบวัดผล และ สร้างแบบจำลองแบบ 1 พอร์ต พบว่า ตัวเก็บประจุมีค่าตัวประกอบคุณภาพสูงสุดที่ความถี่ 0.8 GHz เท่ากับ 4 และ 2 มีค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 0.8 GHz เท่ากับ 1.99 pF และ 3.99 pF มีจุด SRF ที่ความถี่ 2.2 GHz และ 1.8 GHz สำหรับไดอิเล็กตริกอากาศ และ SU-8 ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง เนื่องจากใช้ทองแดงเป็นโครงสร้าง และโครงสร้างจะถูกยกไว้ให้ลอยในอากาศ ด้วยเทคนิคการเชื่อมบอลตะกั่ว

ในส่วนที่สามเป็นการออกแบบ และสร้าง ตัวเหนี่ยวนำสำหรับใช้ในวงจรแปรผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ประยุกต์ใช้การสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูงแบบฝังในพอลิเมอร์ โดยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ กระบวนการนี้จะช่วยให้สามารถสร้างขดลวดที่มีความต้านทานต่ำแต่ใช้พื้นที่น้อยลง ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบสร้างมีสองชนิด คือ SUT-L1 เป็นตัวเหนี่ยวนำแกน E-I ชนิด 5.5 รอบ และ 3.5 รอบ ใช้วัสดุ NiFe เป็นแกนของตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้างมีช่องอากาศ 60  $\mu\text{m}$  เพื่อเพิ่มกระแสในตัว เส้นลวดตัวนำมีความกว้าง 65  $\mu\text{m}$  มีพื้นที่ 8.32  $\text{mm}^2$  ขดลวดที่สร้างขึ้นมีค่าความต้านทานกระแสตรง 21.1  $\text{m}\Omega$  และ 25.2  $\text{m}\Omega$  ส่วนค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเปลี่ยนไปตามความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากค่า skin depth ของวัสดุ NiFe ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าอยู่ในช่วง 14.4  $\text{nH}/\text{mm}^2$  ถึง 7.2  $\text{nH}/\text{mm}^2$  และ 7.8  $\text{nH}/\text{mm}^2$  ถึง 5.8  $\text{nH}/\text{mm}^2$  ในช่วง

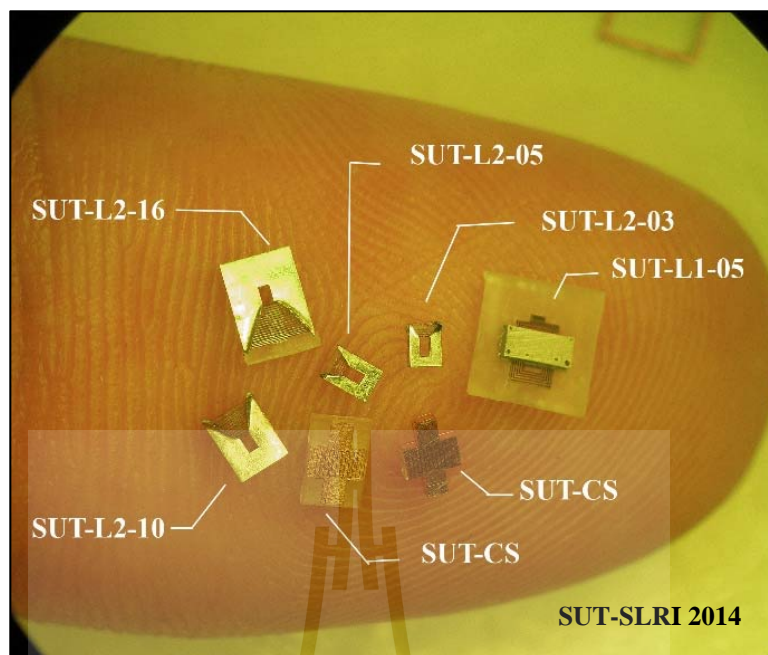


ความถี่ 30 kHz ถึง 20 MHz สำหรับตัวเหนี่ยวนำชนิด 3.5 รอบ และ 5.5 รอบ ตามลำดับ ส่วนการทดสอบการอิ่มตัวพบว่า ตัวเหนี่ยวนำไม่เกิดการอิ่มตัวจนถึงค่ากระแสสูงสุดที่ 1 A เมื่อนำค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ เทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่ามีค่าความต้านทานค่อนข้างต่ำ แต่ค่าความเหนี่ยวนำต่อพื้นที่ มีค่าต่ำมาก ดังนั้น ในงานวิจัยส่วนที่สามจึงได้ออกแบบตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้าง SUT-L2 เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดียิ่งขึ้น ทั้งความต้านทาน และความเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 ออกแบบให้ใช้งานที่ค่ากระแสต่ำลง เนื่องจากออกแบบแกนแบบไร้ช่องอากาศ ทำให้ตัวเหนี่ยวนำจะเกิดการอิ่มตัวที่กระแสต่ำกว่าแบบแรก ส่วนของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ SUT-L2 มีโครงสร้างฝังอยู่ในแม่พิมพ์ SU-8 ส่วนของแกน สร้างขึ้นด้วยกระบวนการชุบโลหะขึ้นมาโดยรอบในครั้งเดียว ทำให้กระบวนการสร้างใช้เวลาน้อยลงมาก แกน NiFe มีความหนา 8  $\mu\text{m}$  ตัวเหนี่ยวนำมีความสูงโดยรวม 360  $\mu\text{m}$  ประกอบไปด้วย ขดลวดหนา 250  $\mu\text{m}$  ชั้นฉนวน 100  $\mu\text{m}$  และ แกน 8  $\mu\text{m}$  เส้นลวดตัวนำกว้าง 23  $\mu\text{m}$  ตัวเหนี่ยวนำที่สร้าง มีชนิด 3 รอบ 5 รอบ 10 รอบ และ 16 รอบ มีพื้นที่ 1.8  $\text{mm}^2$  2.3  $\text{mm}^2$  5.3  $\text{mm}^2$  และ 9.5  $\text{mm}^2$  จากการทดสอบ วัดค่าความต้านทานกระแสตรงได้ 30 51 149 และ 335  $\text{m}\Omega$  ตามลำดับ มีค่าความเหนี่ยวนำที่ 5 MHz เท่ากับ 28 43 76 และ 106  $\text{nH}/\text{mm}^2$  ส่วนการทดสอบกระแสอิ่มตัว ที่ความถี่ 10 MHz พบว่าตัวเหนี่ยวนำมีค่ากระแสอิ่มตัวที่ 420 mA 250 mA 220 mA และ 150 mA ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ จะเห็นได้ว่า อยู่ในระดับต้น ๆ ของงานวิจัยทั้งหมด และดีกว่าตัวเหนี่ยวนำ SUT-L1 มาก ดังรูปที่ 7.1 ส่วนรูปที่ 7.2 แสดงภาพถ่ายของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้ทั้งหมด



รูปที่ 7.1 แสดงค่าความเหนี่ยวนำ และ ความนำ ต่อพื้นที่ของตัวเหนี่ยวนำ เทียบกับงานวิจัยอื่นๆ



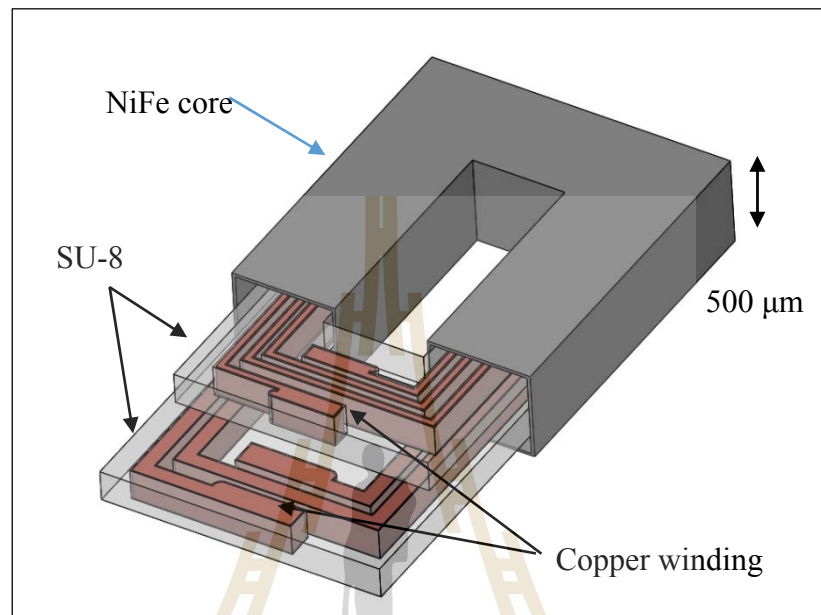
รูปที่ 7.2 ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในงานวิจัยนี้บางส่วน

## 7.2 การพัฒนางานวิจัยในอนาคต

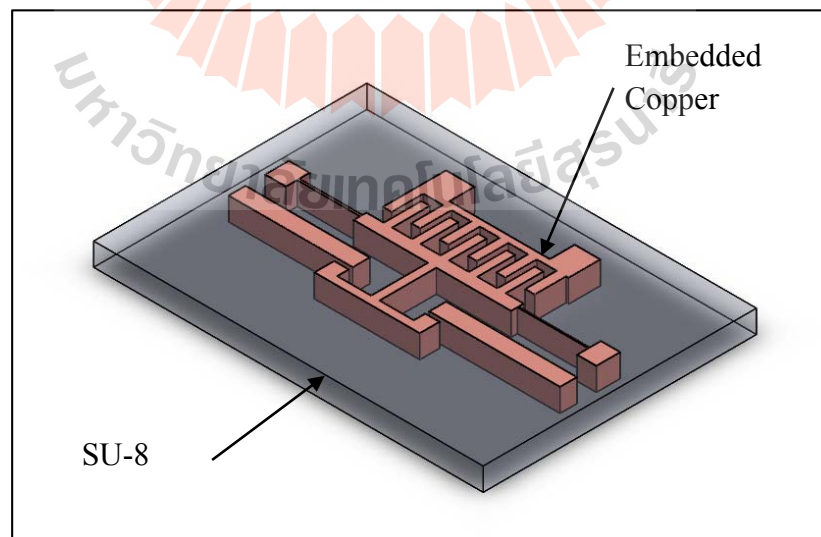
จากงานวิจัยที่ได้นำเสนอไป จะเห็นว่า กระบวนการสร้างชิ้นส่วนจุลภาคแบบฝังในแผ่นของแม่พิมพ์พอลิเมอร์ SU-8 สามารถนำไปพัฒนาเป็นงานวิจัยอื่น ๆ ได้อีกมากมาย เนื่องจากโครงสร้างที่สร้างด้วยกระบวนการนี้ จะฝังตัวอยู่ในแม่พิมพ์ จึงมีความแข็งแรง และสะดวกในการเคลื่อนย้ายไปติดลงบนวงจรรวม หรือแผ่นวงจรมพิมพ์ งานวิจัยที่สามารถนำไปพัฒนาต่อ เช่น การพัฒนาเป็นหม้อแปลงจุลภาค โดยการนำแผ่นที่มีขดทองแดงฝังอยู่จำนวน 2 แผ่น วางซ้อนกัน และสร้างแกนแม่เหล็กขึ้นมาโดยรอบ ดังรูปที่ 7.3 หม้อแปลงจุลภาคจะมีความสูงน้อยกว่า 1 mm ทำงานที่ความถี่ระดับ MHz และมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีความต้านทานของขดลวดต่ำ ซึ่งเป็นข้อดีที่ได้จากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ส่วนของแกนสามารถสร้างได้โดยวิธีการเดียวกับการสร้างแกนตัวเหนี่ยวนำในบทที่ 6 และกระบวนการสร้างสามารถใช้วิธีการสร้างแบบชุด (batch fabricated) จึงสามารถนำไปผลิตใช้จริงในอุตสาหกรรมได้

สำหรับงานวิจัยที่ต้องการ โครงสร้างที่มีการเคลื่อนไหว เช่น การประยุกต์ใช้สร้าง ตัวขับเคลื่อนแบบซีวีวี ดังรูปที่ 7.4 จะเห็นว่าโครงสร้างจะถูกฝังอยู่ในแผ่นพอลิเมอร์ จึงมีความแข็งแรง สามารถเคลื่อนย้ายไปติดบนฐานด้วยกระบวนการกลับชิป และประโยชน์ที่ได้จากการสร้างด้วยกระบวนการนี้อีกประการคือ สามารถเปิดลวดลายบริเวณแกนสปริง เพื่อกักให้ส่วนของสปริง

มีความหนาลดลง จะช่วยลดค่าแรงสปริง ทำให้สามารถใช้งานที่แรงดันต่ำลงตามอัตราส่วนความหนาของสปริง ต่อความหนาของซี่ขั้วเร็ว เมื่อต้องการใช้งานจึงนำไปยึดติดบนฐาน และกัดแม่พิมพ์ออก โครงสร้างที่ได้จะพร้อมใช้งานได้ทันที



รูปที่ 7.3 หม้อแปลงจุลภาคแบบวางซ้อน



รูปที่ 7.4 ตัวขั้วเร็วซี่หวีในแผ่นแม่พิมพ์ SU-8

## รายการอ้างอิง

- A. Bruno Frazier and Mark G. Allen. (1992). High Aspect Ratio Electroplated Microstructures Using a Photosensitive Polyimide, **Proceeding of IEEE Micro Electromechanical Systems**, : 87 - 92.
- B. C. Dodrill, Magnetic Media Measurements with a VSM **Lake Shore Cryotronics Inc**, Westerville, Ohio, : 1 - 2.
- B. Orlando, A.-S. Royet, and B.Viala. (2006). Fast analysis of proximity effects in integrated inductors with high-permeability magnetic material, **IEEE Transactions On Magnetics**., vol. 42, no. 10, : 3371 – 3373.
- B. Orlando, R. Hida, R. Cuchet, M. Audoin, B. Viala, D. Pellissier-Tanon, X. Gagnard, and P. Ancey. (2006). Low-Resistance Integrated Toroidal Inductor for Power Management, **IEEE Transactions On Magnetics**, Vol. 42, No. 10, : 3374 - 3376.
- Bustillo, J.M.; R.T. Howe and R.S. Muller. (1998). Surface micromachining for micro-electromechanical systems. **Proceedings of the IEEE**, Vol. 86, No. 8, : 1552–1574.
- C. Keller and M. Ferrari, Milli-Scale Polysilicon Structures, (1994). **In Technical Digest of 1994 Solid State Sensor and Actuator Workshop**, Hilton Head Island, S.C., : 132 - 137.
- C.G. Keller and R.T. Howe. (1995). Nickel-Filled Hexsil Thermally Actuated Tweezers, **in 8 th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '95)**, Stockholm, Sweden, : 376 - 379.
- C. H.Ahn, and Mark G. Allen. (1998). Micromachined Planar Inductors on Silicon Wafers for MEMS Applications, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, : 866 - 876.
- D. Jiles. (1991). **Introduction to Magnetism and Magnetic materials**, chap. 3, Chapman & Hall, London, : 47.
- Editorial. (1997). **Back to the Future: Copper Comes of Age**, IBM Research, vol. 35.

- Esfandiari R., D. W. Maki, and M. Sircusa. (1983). Design of Interdigitated Capacitors and Their Application to GaAs Filters, **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, Vol. MTT-31, : 57 - 64.
- Florent Cros, Kieun Kim, and Mark G. Allen. (2000). A Single-Mask Process for Micromachined Magnetic Devices, in **Technical Digest of 2000 Solid State Sensor and Actuator Workshop**, Hilton Head Island, S.C., : 138 - 141.
- G. Alley. (1970). Interdigital Capacitors and Their Application to Lumped-element Microwave-integrated Circuits, **IEEE Trans Microwave Theory Tech** 18, : 1028 - 1033.
- Gregory T.A. Kovacs, (1998). **Micromachined Transducers Sourcebook**, McGraw – Hill, New York.
- Gregory T. A. Kovacs, Nadim I. Maluf, and Kurt E. Peterson, (1998). Bulk Micromachining of Silicon, **Proceedings of the IEEE**, Vol. 86, No. 8.
- Haruo.Nakazawa., Masaharu Edo.,Yasushi Katayama., Masakazu Gekinozu., Satoshi Sugahara., Zenchi Hayashi., Kazuo Kuroki., Eiichi Yonezawa., andKazuoMatsuzaki., (2000). Micro DC/DC Converter that Integrates Planar Inductor on Power IC, **IEEE Transactions On Magnetics**, : 3518 - 3520.
- I. J. Bahl, (2003). Lumped elements for RF and microwave circuits, **Artech House**, Chap. 5, pp 165.
- J.B.Yoon., B.K.Kim., C.H.Han.,E.Yoon., and C.K.Kim., (1999).Surfacemicromachined solenoid on-Siandon-glass inductors for RF applications, **IEEE Electron Device Letters**, pp.487–489.
- Jeffrey A. Babcock, et. al, Analog Characteristics of Metal-Insulator-Metal Capacitors using PECVD Nitride Dielectrics, **IEEE Electron Device Letters**,vol.22,No.5, : 230 - 232
- Jin-WooPark., and Mark G.Allen.,(2003). Ultralow-Profile Micromachined Power Inductors With Highly Laminated Ni/Fe Cores: Application to Low-Megahertz DC–DC Converters, **IEEE Transactions On Magnetics**, : 3184 - 3186.
- KiH yeon Kim., Jongr youl Kim., Hee Jun Kim., Suk Hee Han., and Hi Jung Kim.,(2002).A Megahertz Switching DC/DC Converter Using FeBN Thin Film Inductor , **IEEE Transactions On Magnetics**, : 3162 - 3164.

- K. D. T. Ngo and R. (1994). Webster, Steady-state analysis and redesign of a switched-capacitor DC-DC converter, **Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on**, vol. 30, : 92 - 101.
- K.Itoi., M.Sato., H.Abe., H.Ito., H.Sugawara., K.Okada., K.Masu., and T.Ito., (2004). On-chip high-Q solenoid inductors embedded in WL-CSP, **Proceedings of HDP**, : 105 - 108.
- Menouer Saidani., and Martin A.M. Gijs., (2003). Cubic Millimeter Power Inductor Fabricated in Batch Type Wafer Technology, **Journal of Micro electro mechanical Systems**, : 172 - 178.
- Mingliang Wang., Issa Batarseh., Khai D.T. Ngo., and Huikai Xie., (2007). Design and Fabrication of Integrated Power Inductor Based on Silicon Molding Technology, **IEEE**, : 1612 - 1618
- Mingliang Wang., Khai D.T. Ngo., and Huikai Xie., (2008). SU-8 Enhanced High Power Density MEMS Inductors, **IEEE**, : 2672 - 2676
- M. P. Goetz Time and frequency domain analysis of integral decoupling capacitors, (1996). **IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol. B, Adv. Packag.**, vol. 19, no. 3, : 518 - 522.
- M. S. Makowski and D. Maksimovic, (1995). Performance limits of switched-capacitor DC-DC converters, in Power Electronics Specialists Conference, PESC '95 Record, 26th Annual **IEEE**, 1995, pp. 1215-1221 vol.2.
- National Semiconductor Corporation, (2001). 0.25um CMOS Process Electrical Design Rules and Characterization Data.
- O. Caltun, C. Papusoi, A. Stancu, P. Andrei, W. Kappel, (1998). IOS Series Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, editors **V. Kose and J. Sievert**, ISBN 905199381, : 594.
- O. Caltun, C. Papusoi, A. Stancu, P. Andrei, W. (1999-2000). Initial permeability, hysteresis and total losses measurements **AL.I.CUZA" DIN IASI Tomul XLV-XLVI, s Fizica Starii Condensate**, : 56 – 60
- P. Chahal , R. R. Tummala , M. G. Allen and M. Swaminathan, (1998). A novel integrated decoupling capacitor for MCM-L technology, **IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol. B, Adv. Packag.**, vol. 21, no. 2, : 184 - 193.
- Quantum Design Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Option User's Manual, (2011). chap. 3, **Quantum Design**, : (1-1) - (1-4)

- R. C. Frye, (1997). Integrated passive components: Technologies, materials and design", Int. J. **Microcircuits Electron. Packaging**, vol. 20, no. 4, : 578 - 586.
- R. Downing , P. Gebler and G. Katopis, (1993). Decoupling capacitor effects on switching noise, **IEEE Trans. Comp on, Hybrids, Manuf. Technol.**, vol. 16, no. 5, : 484 - 489.
- ROHM Semiconductor, Inductor calculation for buck converter IC, **Application note No. 12027ECY01**.
- Roberto Aparicio, Ali Hajimiri, (2011). Capacity Limits and Matching Properties of Lateral Flux Integrated Capacitors, **IEEE 2001 Custom Integrated Circuits Conference**, : 365 - 368
- S. Chunlei, B. C. Walker, E. Zeisel, B. Hu, and G. H. McAllister, (2007). A Highly Integrated Power Management IC for Advanced Mobile Applications, Solid-State Circuits, **IEEE Journal** , vol. 42, : 1723 - 1731.
- S. Linder, (1996). "S-parameter techniques for faster, more accurate network design," **HP application note 95-1**, Hewlett Packard.
- S. T. Cen (1981). Thin-film monolithic bypass filters. : 56 - 62.
- Tridad Sowlati, Vickram Vathulya, Domine Leenaerts, (2001). High Density Capacitance Structures in Submicron CMOS for Low Power RF Applications, **ISLPED 2001**, Huntington Beach, CA, : 243 - 246
- Yasushi Katayama., Satoshi Sugahara., Haruo Nakazawa., Masaharu Edo., (2000)..High-Power-Density MHz Switching Monolithic DC-DC Converter with Thin-Film Inductor, **Power Electronics Specialists Conf**, : 1485 - 1490.
- Yoon, Y-K., J-W. Park, and M. Allen, (2005). Polymer—core Conductor Approaches for RF MEMS, **journal of Microelectromechanical Systems**, Vol. 14, no. 5, : 886 - 894.
- Y.-J. Kim and M. G. Allen, (1998). Surface Micromachined Solenoid Inductors for High Frequency Applications, **IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology**, vol. Part C, 21: 26 - 33.



ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการผสมน้ำยาชุบโลหะ  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  ปริมาตร 1 ลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



### ขั้นตอนการการผสมน้ำยาชุบโลหะ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ปริมาตร 1 ลิตร

1. เตรียมน้ำ DI ปริมาตร 1 ลิตร ใส่ปิกเกอร์วางบนแท่นกวนสารละลาย
2. เติมสารนิกเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) 200 กรัม
3. เติมสารนิกเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) 5 กรัม
4. เติมสารเฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) 8 กรัม
5. เติมกรดบอริก ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) 25 กรัม
6. เติม Saccharin 3 กรัม และกวนจนสารละลายเข้ากัน
7. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง 1-2 รอบ
8. นำสารละลายที่ได้ใส่ในภาชนะปิดมิดชิด จากนั้นไล่ออกซิเจนออกด้วยแก๊สไนโตรเจน และปิดฝาให้แน่น เพื่อป้องกันการเกิดสนิมเหล็กขึ้นในสารละลาย ซึ่งจะทำให้เหล็กในสารละลายลดลง





ภาคผนวก ข

การสร้างหน้าต่างกันรังสีเอกซ์บนแกรไฟต์อ่อน

## การสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์บนแกรไฟต์อ่อน

1. นำแกรไฟต์อ่อนรีดด้วยเครื่องรีด PCB รุ่น PCB lab LM-150 ปรับอุณหภูมิไว้สูงสุด รีดซ้ำประมาณ 10 นาที เพื่อไล่ความชื้น และช่วยให้แผ่นแกรไฟต์แข็งขึ้น
2. รีดแกรไฟต์อีกครั้งด้วยแท่งเหล็ก เพื่อให้เนื้อแกรไฟต์แน่น และมีความแข็งแรงมากขึ้น และนำไปรีดด้วยเครื่องรีด PCB อีกครั้ง แผ่นละ 3 รอบ
3. นำแกรไฟต์ อบด้วยเตาอบ ตั้งอุณหภูมิสูง 120-150 C ในขั้นตอนนี้ แผ่นแกรไฟต์อาจโป่งพอง ซึ่งสามารถรีดกลับคืนได้ด้วยการรีดแผ่นแกรไฟต์ด้วยแท่งเหล็ก และตามด้วย เครื่องรีด PCB หลังผ่านขั้นตอนี้แล้วแผ่นแกรไฟต์จะแข็งขึ้นและจะไม่เกิดการโป่งพองขึ้นอีก
4. นำแผ่นแกรไฟต์ยึดติดกับฐานกระจกเพื่อป้องกันการหัก หรืองอ
5. ทำความสะอาดด้วยการใช้สำลี ชุบ IPA เช็ดสองครั้ง โดยครั้งแรกจะมีแกรไฟต์หลุดออกมาจำนวนมาก ครั้งที่สองให้เช็ดเบาๆ ผิวแกรไฟต์จะมันวาว และผิวเรียบขึ้น
6. อบไล่ความชื้นด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 30 นาที
7. หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 เบอร์ 3050 ด้วยอัตราเร็ว 2500 รอบต่อนาที
8. นำชิ้นงานอบโดยการวางบนแผ่นความร้อน เพิ่มอุณหภูมิขึ้นในอัตราประมาณ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที และค้างไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง
9. นำชิ้นงานออกจากแผ่นความร้อน และฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำไปวางบนแผ่นความร้อน ที่ 95 องศาเซลเซียส 10 นาที
10. ล้างสารไวแสงด้วยน้ำยา เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นฉีดด้วยอะซิโตน และล้างน้ำ DI
11. นำชิ้นงานติดเทปเพื่อเปิดเฉพาะบริเวณที่จะชุบโลหะเงิน
12. ชุบโลหะเงินด้วยกระแสเริ่มต้น 30 mA/cm<sup>2</sup> 10 นาที จากนั้นชุบต่อด้วยกระแส 10 mA/cm<sup>2</sup> จนเต็มแม่พิมพ์ หรือได้ความหนาตามต้องการ



ภาคผนวก ค

การสร้างแผ่นพอลิเมอร์ฟุ้งตัวนำ

## การสร้างแผ่นพอลิเมอร์ฝังตัวนำ

1. นำแผ่นแกรไฟต์อบให้แห้ง เมื่อเย็นลง จึงนำมาเคลือบสารไวแสงให้ได้ความหนาตามต้องการ และอบที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 13 ชั่วโมง
2. ออบรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน  $22 \text{ J/cm}^2$  ผ่านหน้ากากเงินหนา  $50 \text{ }\mu\text{m}$  และอบที่ 95 องศาเซลเซียส 20 นาที ปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อไม่ให้ชิ้นงานโก่งตัว
3. ล้างสารไวแสงออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ล้างต่อด้วย อะซิโตน และ น้ำเปล่า เพื่อให้ชิ้นงานสะอาดไม่เป็นคราบของน้ำยาคัดที่ผิวของแกรไฟต์ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ อบที่ 50 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อให้ชิ้นงานแห้ง
4. นำแม่พิมพ์ติดทับด้วยเทปกาว เพื่อให้ชิ้นงาน นำไฟฟ้าเฉพาะบริเวณหลุมของแม่พิมพ์ จากนั้นนำแม่พิมพ์ หยดด้วยแอลกอฮอล์ จะช่วยไม่ให้เกิดฟองอากาศ ขึ้นในแม่พิมพ์ และนำไปจุ่มน้ำ DI จากนั้นนำชิ้นงานจุ่มในน้ำยาชุบทองแดง และ ชุบด้วยกระแสเริ่มต้น  $30 \text{ mA/cm}^2$  เป็นเวลา 10 นาที และชุบต่อด้วยกระแส  $20 \text{ mA/cm}^2$  จนถึง จากนั้นนำชิ้นงาน ชัดทองแดงที่ล้นออกให้เรียบ
5. ติดทับด้วยเทปกาวพอลิอิมิดในด้านที่ชัดทองแดงออกแล้ว ซึ่งเทปกาวนี้ จะเป็นตัวช่วยเสริมความแข็งแรงของแผ่นพอลิเมอร์ที่มีความหนาเพียง  $150\text{-}400 \text{ }\mu\text{m}$  จากนั้นชัดส่วนฐานทิ้งไป จะได้แผ่นพอลิเมอร์ฝังตัวนำ
6. หากต้องการลอกเทปกาวพอลิอิมิดออก ให้นำชิ้นงานจุ่มอะซิโตน และลอกในอะซิโตน จะสามารถลอกได้ง่าย

## ประวัติผู้เขียน

นายมานิตย์ มาปะโท เกิดเมื่อวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2526 ที่อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนรัฐราษฎร์รังสรรค์ อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษา ที่โรงเรียนขามทะเลสอวิทยา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2549 และได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในสาขาวิชาเดียวกัน ในปี 2550 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตในสาขาวิชาเดียวกัน โดยได้รับทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) โดยได้พัฒนาตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ผู้วิจัยมีความสนใจในการประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนสำหรับการผลิตโครงสร้างจุลภาค ตัวตรวจรู้จุลภาค ด้วยแสงซินโครตรอน รวมไปถึงการออกแบบวงจร และ พัฒนาเป็น Embedded system



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี