

ลักษณะเฉพาะของความต้านทานเชิงซ้อนของเฮเทอโรจังก์ชัน  
ชั้นโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วย  $\text{FeSi}_2$  และ Si  
IMPEDANCE CHARACTERISTIC OF HETEROJUNCTIONS  
PHOTODIODES COMPRISING  $\text{FeSi}_2$  AND Si



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอสงวนสิทธิ์ในลิขสิทธิ์และขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและข้อมูลอื่น ๆ ที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ปีการศึกษา 2560

IMPEDANCE CHARACTERISTIC OF HETEROJUNCTIONS  
PHOTODIODES COMPRISING  $\text{FeSi}_2$  AND Si



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆ จากเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ACADEMIC YEAR 2017

หัวข้อโครงการพิเศษ ลักษณะเฉพาะของความต้านทานเชิงซ้อนของเฮเทอโรจังก์ชันโฟโตไดโอด  
ที่ประกอบด้วย  $\text{FeSi}_2$  และ Si

Impedance Characteristic of Heterojunctions Photodiodes  
Comprising  $\text{FeSi}_2$  and Si

ชื่อนักศึกษา นายก้องกฤษฎ์ เปรมปรีดี รหัสนักศึกษา 57050930

นายกันต์กวี แซ่เฮง รหัสนักศึกษา 57050933

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.สาทราย เล็กชะอุม ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์ กรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	ลักษณะเฉพาะของความต้านทานเชิงซ้อนของเฮเทอโรจังก์ชันโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วย FeSi <sub>2</sub> และ Si	
	Impedance Characteristic of Heterojunctions Photodiodes Comprising FeSi <sub>2</sub> and Si	
ชื่อนักศึกษา	นายก้องกฤษฎา เปรมปรีดี	รหัสนักศึกษา 57050930
	นายกันต์กวี แซ่เฮง	รหัสนักศึกษา 57050933
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส	

### บทคัดย่อ

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) ของเบต้าไอรอนไดซิลิไซด์/ซิลิกอน ( $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si) และของผลึกนาโนไอรอนไดซิลิไซด์/ซิลิกอน (NC-FeSi<sub>2</sub>/Si) เฮเทอโรจังก์ชันถูกสร้างโดยวิธีดีซีสปัตเตอริงแบบหันเป้าเข้าหากัน (Facing Target Direct-Current Sputtering: FTDCS) ลักษณะเฉพาะของ  $Z$  กับความถี่ ( $f$ ) ที่ได้ถูกวัดด้วยเครื่อง Agilent E4980A ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างกันและอุณหภูมิต่างกัน ในที่มืด ที่อุณหภูมิห้องกราฟของ  $Z''$  กับ  $Z'$  มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมสองวงที่จุดศูนย์กลางต่ำกว่าแกน  $X$  เส้นผ่านศูนย์กลางของครึ่งวงกลมเล็กลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากผลที่ได้ของ NC-FeSi<sub>2</sub> จะสอดคล้องกับวงจรสมมูลที่ประกอบด้วย  $R_s$  ที่ต่ออนุกรมกับ  $R_p$  ขนานกับ  $CPE$  สองชุด จากการหาค่าโดยใช้โปรแกรม EC-Lab เห็นว่าค่า  $R_s$ ,  $R_p$  และ  $CPE$  มีค่า 4,863 โอห์ม, 29,656 โอห์ม และ  $1.906 \times 10^{-9}$  ฟารัด ตามลำดับที่ -1.8 โวลต์ โดยที่เมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นค่า  $Z$  จะมีค่าลดลง และในกรณีที่มีการเปลี่ยนอุณหภูมิผลที่ได้ของ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> จะสอดคล้องกับที่วัดในอุณหภูมิห้อง โดยค่า  $R_s$ ,  $R_p$  และ  $CPE$  มีค่า  $3.33 \times 10^6$  เมกะโอห์มม  $2.90 \times 10^9$  เมกะโอห์ม และ  $6.18 \times 10^{-9}$  ฟารัด ที่ 160 เคลวิน โดยที่เมื่ออุณหภูมิลดลงค่า  $Z$  จะมีค่าสูงขึ้น

**คำสำคัญ :** ความต้านทานเชิงซ้อน วงจรสมมูล ไอรอนไดซิลิไซด์ เฮเทอโรจังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Impedance Characteristic of Heterojunctions Photodiodes Comprising FeSi <sub>2</sub> and Si	
Student	Mr. Kongkrit Prampree	Student ID 57050930
	Mr. Kankawee Saeheng	Student ID 57050933
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2017	
Advisor	Asst.Prof.Dr. Nathaporn Promros	

### Abstract

The researchers studied the impedance ( $Z$ ) of the  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si and NC-FeSi<sub>2</sub>/Si heterojunction created by Facing Target Direct-Current Sputtering. The  $Z$  and frequency ( $f$ ) characteristic was investigated by Aligent E4980A at the various voltage ( $V$ ) and temperature ( $T$ ). At room temperature, the imaginary part ( $Z''$ ) and real part ( $Z'$ ) displayed the double semicircle shape, with different size, and the center of the shape lies below the X axis. The diameter of the semicircle decreased with the raised  $V$ . The acquired results of NC-FeSi<sub>2</sub> correspond to the equivalent circuit of the series resistance mounted with the two series of the parallel combination between a parallel resistance ( $R_p$ ) and constant phase element ( $CPE$ ). Utilizing EC-Lab software, the  $R_s$ ,  $R_p$ , and  $CPE$  were computed and showed the values, at -1.8 V, as 4,863  $\Omega$ , 29,656  $\Omega$ , and  $1.906 \times 10^{-9}$  F, respectively. The values of  $Z$  were decreased with the increased  $V$ . In case of the temperature dependence, the obtained  $R_s$ ,  $R_p$ , and  $CPE$  results of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> were  $3.33 \times 10^6$  M $\Omega$ ,  $2.90 \times 10^9$  M $\Omega$ , and  $6.18 \times 10^{-9}$  F, respectively, which were resembled the measured NC-FeSi<sub>2</sub> results,  $R_s$ ,  $R_p$ , and  $CPE$ , under the room temperature. The measured results showed that the  $Z$  value was decreased when  $T$  was increased.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**Keyword :** Impedance, Equivalent circuit, Irondisilicide, Heterojunction  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่อบรมสั่งสอนให้เป็นคนดี ซื่อสัตย์สุจริต มีความรับผิดชอบ ตั้งใจทำงาน อ่อนน้อมถ่อมตน รับฟังความคิดเห็นคนอื่นเชื่อฟังคำสั่งสอนของครูอาจารย์และพ่อแม่ เป็นคนมีน้ำใจช่วยเหลือผู้อื่น เห็นแก่ประโยชน์ส่วนรวม มีน้ำใจนักกีฬา กตัญญูรู้คุณพ่อแม่ครูอาจารย์ ที่มอบหมายหัวข้อโครงการพิเศษเรื่องนี้แก่ผู้วิจัย ทั้งยังสนับสนุนในเรื่องต่างๆ ทั้งในเรื่องอุปกรณ์และสถานที่ปฏิบัติงาน รวมไปถึงคำแนะนำและความรู้ใหม่ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อีกทั้งคำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขส่วนต่างๆ ภายในระบบการทำโครงการพิเศษเรื่องนี้ให้สำเร็จลุล่วงผ่านไปด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์ ดร.พิศาล สุขวิสูตร คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สละเวลาและให้เกียรติอย่างมากในการเป็นคณะกรรมการสอบวิชาโครงการพิเศษนี้ รวมถึงให้คำแนะนำเพื่อมาปรับปรุง ทั้งการนำเสนอ การเขียนเนื้อหาโครงการวิจัยให้สอดคล้องกับทฤษฎีทางฟิสิกส์

ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้ต่างๆ ด้านฟิสิกส์ให้แก่ผู้วิจัยเพื่อนำมาใช้ในการเรียนการสอนพิเศษในครั้งนี้และนำไปใช้ประกอบวิชาชีพ

ขอขอบคุณ นายอดิศร นพรุจิกุล นักศึกษาปริญญาเอก นายวิศรุต แก่นไร่ นางสาววิวรรณ เฉลียวพงษ์ นายพิรศิลป์ เจริญยืนยาว นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คอยให้คำปรึกษาตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้ต่างๆด้านฟิสิกส์ให้แก่ผู้วิจัยเพื่อนำไปใช้ในการดำเนินชีวิตและประกอบอาชีพในอนาคตได้

ก้องกฤษฎา เปรมปรีดี

กัณฑ์วี แซ่เฮง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>5</b>
2.1 คุณสมบัติโครงสร้างของผลึก NC-FeSi <sub>2</sub>	5
2.2 คุณสมบัติโครงสร้างของผลึก β-FeSi <sub>2</sub>	7
2.3 ไดโอดเปล่งแสงรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น	8
2.4 FTDCS	10
2.5 การวิเคราะห์การวัดค่าสัมบูรณ์ของ Z	12
2.5.1 วงจร RC ที่มีการต่อกันในแบบอนุกรม	18
2.5.2 วงจร RC ที่มีการต่อกันในแบบขนาน	19
2.5.3 กราฟของโบด (Bode plot)	24
2.5.4 แบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (two diode model)	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.5 แบบจำลองอีลีเมนต์ (Element Model)	28
<b>บทที่ 3</b> วิธีการดำเนินการทดลอง	<b>30</b>
3.1 การจัดเตรียมตัวอย่าง Si	30
3.2 การเคลือบฟิล์มและการทำขั้วอิเล็กโทรด	33
3.2.1 การใช้เครื่อง FTDCS	34
3.2.2 การใช้เครื่องสปีดเตอริงเพื่อทำขั้วอิเล็กโทรด	36
3.3 การวัดค่าของกระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า ( $I$ - $V$ )	39
3.3.1 การวัดค่า $I$ - $V$	40
3.3.2 การวัด $Z'$ - $f$ , $Z''$ - $f$	45
3.3.3 การวัด $Z'$ - $f$ , $Z''$ - $f$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	46
<b>บทที่ 4</b> ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	<b>50</b>
4.1 การวัดค่า $Z$ ของเฮเทอโรโรจันต์ชั้น $NC-FeSi_2$ กับ $V$	50
4.2 การวัดค่า $Z$ ของเฮเทอโรโรจันต์ชั้น $\beta-FeSi_2/Si$ เทียบกับ $V$	57
4.3 การวัดค่า $Z$ ของเฮเทอโรโรจันต์ชั้น $\beta-FeSi_2/Si$ เทียบกับอุณหภูมิ	61
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	<b>66</b>
5.1 สรุปผลงานวิจัย	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	67
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>68</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
3.1 เส้นใยการสร้าง $p-n$ เฮเทอโรโรจังก์ชันโฟโตไดโอด	33
4.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับค่า $Z$ โดยใช้โปรแกรมจำลองของเฮเทอโรโรจังก์ชัน $NC-FeSi_2/Si$ ที่ค่า $V$ ต่างๆ	56
4.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับค่า $Z$ โดยใช้โปรแกรมจำลองของเฮเทอโรโรจังก์ชัน $\beta-FeSi_2/Si$ ที่ค่า $V$ ต่างๆ	61
4.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับค่า $Z$ โดยใช้โปรแกรมจำลองของเฮเทอโรโรจังก์ชัน $\beta-FeSi_2/Si$ ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบ XRD วัดโดยใช้วิธี 2 $\theta$ -สแกน ของฟิล์ม NC-FeSi <sub>2</sub> ที่เตรียมโดยวิธี PLD และ FTDCS	6
2.2 ภาพแสดงการวัดโดยใช้ TEM ในที่มืดของฟิล์มบาง NC-FeSi <sub>2</sub>	6
2.3 (a) ลักษณะช่องว่างแถบพลังงานของ $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> และ (b) สเปกตรัมการดูดกลืนของ $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> ที่แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงและแบบเฉียง	7
2.4 แผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ชนิด $n$ และ ชนิด $p$ ที่แยกได้และมีช่องว่างของแถบพลังงานที่แตกต่างกัน	8
2.5 การจับคู่ที่สมดุลความร้อน	9
2.6 (a) ส่วนของโฟโตไดโอด (b) สถานะการเชื่อมต่อโฟโตไดโอด $p$ - $n$	10
2.7 แผนภาพแสดงกระบวนการ FTDCS	11
2.8 วงจรสมมูล $R_p$ กับ $C_p$ และแผนภาพแสดงเฟสของค่า $-X_c$ กับ $R$	
(a) แสดงวงจรสมมูล $R_p$ กับ $C_p$ ต่อขนานกัน	12
(b) แสดงค่าสัมบูรณ์ของ $Z$	12
2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $ Z $ กับ $f$	
(a) ในกรณีที่ $C$ มีค่าต่ำ	14
(b) ในกรณีที่ $R$ มีค่าต่ำมาก	14
2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ $ Z $ กับ $f$	16
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Z'$ กับ $f$ และ $-Z''$ กับ $f$	16
2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Z'$ กับ $-Z''$	17
2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $ Z $ กับ $f$	17
2.14 กราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่า $Z$ ของวงจร $RC$ ต่ออนุกรม	18
2.15 วงจร $RC$ ต่อแบบขนาน	19
2.16 กราฟของไนควิสต์ของวงจร $RC$ ที่มีการต่อกันในแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = \frac{1}{RC}$	21
2.17 วงจร $RC$ ที่มีการต่อกันในแบบขนานอย่างง่าย (a, d) $Z$ สเปกโทรโคปี (b, e) และ แอตมิตแดนซ์สเปกโทรโคปี (c, f)	22
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Z$ ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงซ้าย	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
2.19 (a) แสดงกราฟโนควิสต์และกราฟของโบด	26
(b) แสดงกราฟของ $Z$ ของวงจรที่มี $C$ ของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด	27
2.20 (a) แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว	28
(b) และกราฟของโนควิสต์	29
2.21 (a) แสดงแบบจำลอง $CPE$	29
(b) กราฟโนควิสต์ของแบบจำลองอีลีเมนต์เฟสคงตัว	29
3.1 แสดงการตัด Si (111) เวเฟอร์ชนิด $p$ โดยใช้ที่ตัดหัวเพชร	30
3.2 (a) ปีกเกอร์ที่มี Si (111) ใส่ในอยู่อะซิโตน (b) ใส่ปีกเกอร์ที่มี Si (111) อยู่ภายในเพื่อทำความสะอาดด้วยการสั่นในเครื่องอัลตราโซนิค	31
3.3 ปีกเกอร์ที่มี Si (111) ใส่อยู่ในเมทานอล	31
3.4 แก้ว Si ในกรด HF และน้ำปอดประจุ	32
3.5 เป่า Si ด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 %	32
3.6 (a) แผนภาพของ $p-n$ เฮเทอโรจังก์ชันโฟโตไดโอด	33
(b) ภาพตัวอย่างของ $p-n$ เฮเทอโรจังก์ชันโฟโตไดโอด	33
3.7 เครื่อง FTDCS ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $NC-FeSi_2$	34
3.8 แสดงการหมุนวาล์วปรับแรงดันภายในภาชนะ	34
3.9 แสดงการใส่ชิ้นงานบนแท่นวาง	35
3.10 แสดงการปิดฝาภาชนะไว้ก่อนแล้วลดความดันอากาศเพื่อต้องการให้ภายในเป็นสุญญากาศ	35
3.11 เครื่อง FTDCS ที่มีเป่าหลายๆชนิดติดตั้งอยู่รอบๆภาชนะสุญญากาศ	36
3.12 แสดงเครื่องสปัตเตอร์ริงที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด	37
3.13 วางแผ่นหน้ากาก (Mask) ลงบนชิ้นงานเพื่อให้เคลือบเป็นลักษณะ Dot (จุด)	37
3.14 (a) ติดตั้งแผ่นเป่าบนฝาปิด	38
(b) ตัวอย่างแผ่นเป่า	38
3.15 (a) แสดงการเปิดวาล์วให้ก๊าซอาร์กอนไหลเข้าไปในภาชนะ	38
(b) แสดงปุ่มสำหรับปรับความดันก๊าซอาร์กอนและเวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ริง	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
3.16 (a) ภาพแสดงพลาสมาขณะทำการสปีดเตอร์	39
(b) ภาพตัวอย่างชิ้นงานที่ทำซ้ำ	39
3.17 (a) เครื่องวัดค่า $I-V$ และ	39
(b) ภาพขณะที่ใส่ชิ้นสารตัวอย่าง	39
3.18 (a) ภาพแสดงภาพขณะที่ใส่ชิ้นงาน	40
(b) ภาพแสดงโพรบที่ใช้วัดค่า $Z$	40
3.19 Keithley 2400 สำหรับการวัดค่า $I-V$	40
3.20 โปรแกรม $I-V$ and $C-V$ สำหรับใช้คู่กับ Keithley 2400 เพื่อวัดค่า $I-V$	41
3.21 รูปแสดงโปรแกรม E4980A Control Software ที่ใช้วัดค่า $I-V$	41
3.22 เลือกโพลเตอร์ Condition	42
3.23 แสดงการเลือกโพลเตอร์ TEST เพื่อเลือกโหมดในการวัดค่า	42
3.24 แสดงโหมดในการวัดค่าโดยจะเลือกโหมดวัด $CV-IV$	43
3.25 แสดงการเลือกขอบเขตของช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้วัดและกำหนดความละเอียด	43
3.26 แสดงค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้ในรูปของตาราง Excel	44
3.27 แสดงรูปกราฟ $I-V$ เมื่อทำการวัดค่าแล้ว	44
3.28 Agilent E4980A สำหรับการวัดคุณสมบัติของ $Z'-f$ และ $Z''-f$	45
3.29 ภาพแสดงเมื่อตั้งค่าเครื่อง Agilent E4980A เรียบร้อยแล้ว	45
3.30 ภาพแสดงขณะที่เครื่องทำการวัดค่า $Z'$ และ $Z''$	46
3.31 ภาพ (a) และ (b) แสดงการหมุนวาล์วโรตารีบี้มเพื่อลดแรงดันอากาศในภาชนะ	47
3.32 เครื่อง 335 Temperature Control ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ	48
3.33 การเตรียมไนโตรเจนเหลวเพื่อลดอุณหภูมิในภาชนะ	49
3.34 หลังจากใส่ไนโตรเจนเหลวในภาชนะทรงกระบอกจะมีน้ำแข็งเกาะรอบภาชนะ	49
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $J$ กับ $V$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน NC-FeSi <sub>2</sub> /Si	50
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log J$ กับ $V$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน NC-FeSi <sub>2</sub> /Si	51
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Z'$ กับ $f$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน NC-FeSi <sub>2</sub> /Si ที่ค่า $V$ ต่างๆ	51
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Z''$ กับ $f$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน NC-FeSi <sub>2</sub> /Si ที่ค่า $V$ ต่างๆ	52

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Z''$ กับ $Z'$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน NC-FeSi <sub>2</sub> /Si ที่ค่า $V$ ต่างๆ	53
4.6 แสดงวงจรสมมูลของเฮเทอโรจังก์ชัน NC-FeSi <sub>2</sub> /Si ในที่มีด	53
4.7 แสดงโปรแกรม Origin เพื่อใช้ในการสร้างกราฟและบันทึกข้อมูล	54
4.8 โปรแกรม EC-Lab แสดงข้อมูลกราฟจากการวัดค่า	55
4.9 แสดงวงจรสมมูลและสมการที่สอดคล้อง	55
4.10 แสดงค่า $R$ , $CPE$ , $\alpha$ ที่จำลองค่าที่เหมาะสมได้จากวงจร	56
4.11 แสดงวงจรสมมูลของเฮเทอโรจังก์ชัน NC-FeSi <sub>2</sub> /Si โดยใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร	57
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $J$ กับ $V$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> /Si	57
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log J$ กับ $V$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> /Si	58
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Z'$ กับ $f$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> /Si ที่ค่า $V$ ต่างๆ	58
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Z''$ กับ $f$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> /Si ที่ค่า $V$ ต่างๆ	59
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Z''$ กับ $Z'$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> /Si ที่ค่า $V$ ต่างๆ	59
4.17 แผนภาพแสดงวงจรสมมูลเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> /Si	60
4.18 แสดงวงจรสมมูลของเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> /Si ในที่มีดโดยใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร	61
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Z'$ กับ $f$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> /Si ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ	62
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Z''$ กับ $f$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> /Si ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ	62
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Z''$ กับ $Z'$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> /Si ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ	63
4.22 แผนภาพแสดงวงจรสมมูลเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> /Si	63
4.23 แสดงวงจรสมมูลของเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> /Si ในที่มีดโดยใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อและสัญลักษณ์	คำอธิบาย
PLD	วิธีเคลือบด้วยพัลส์เลเซอร์ (Pulse Laser Deposition)
FTDCS	วิธีการสปัตเตอร์ริงโดยหันเป้าเข้าหากันโดยใช้ไฟกระแสตรง (Facing-Target Direct-Current Sputtering)
XRD	วิธีตรวจสอบโครงสร้าง (x-ray diffraction)
TEM	วิธีตรวจสอบโครงสร้าง (Transmission Electron Microscopy)
$n$	ฟิล์มบางมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
$p$	ฟิล์มบางมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี
$Z^*$	ค่าความต้านทานเชิงซ้อน; ( $\Omega$ )
$f$	ความถี่; (Hz)
$E_g$	ช่องว่างแถบพลังงาน; (eV)
LED	ไดโอดเปล่งแสง
$E$	สนามไฟฟ้า; (N/C)
Si	สารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุซิลิกอน
$\epsilon$	สภาพยอม (Permittivities)
$\phi$	ฟังก์ชันงาน; (eV)
$E_c$	แถบนำไฟฟ้า; (eV)
$V_{bi}$	สถานะสมดุลแรงดันไฟฟ้า; (volt)
$B$	สนามแม่เหล็ก; (T)
$R_p$	ตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ; ( $\Omega$ )
$C_p$	ตัวเก็บประจุที่ต่อขนานอยู่กับตัวต้านทาน; (F)
$X_c$	ค่าจินตภาพของความจุ (capacitive reactance); (F)
$\theta$	มุมเฟส; (rad)
$D$	แฟกเตอร์สูญเสีย (dissipation factor)
$Q$	แฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor)
$ Z $	ค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน; ( $\Omega$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

คำย่อและสัญลักษณ์	คำอธิบาย
$T$	ค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่
$P$	เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วย
$C_R$	ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาริเซชัน (polarization region); (F)
$R_R$	ความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี; ( $\Omega$ )
$\omega_p$	ความถี่เชิงมุมที่ทำให้อิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพมีค่าสูงสุด; (Hz)
$Z'$	จำนวนเชิงซ้อนส่วนจริง; ( $\Omega$ )
$Z''$	จำนวนเชิงซ้อนส่วนจินตภาพ; ( $\Omega$ )
$\tau$	เวลาผ่อนคลาย (relaxation time); (s)
$Z_R$	อิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน; ( $\Omega$ )
$Z_C$	อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ; ( $\Omega$ )
$C_{geo}$	ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance); (F)
$R_b$	ความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance); ( $\Omega$ )
$\tau_D$	ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก; (s)
$\omega$	ความถี่เชิงมุม; (Hz)
$G_1$	แอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน; ( $R^{-1}$ )
$Y_a$	แอดมิตแตนซ์; (s)
$R_s$	ความต้านทานต่อที่อนุกรมกับวงจร; ( $\Omega$ )
$CPE$	อิลิเมนต์เฟสคงที่ (constant phase element); (F)
$C_{dl}$	ค่าตัวเก็บประจุเนื่องจากบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด; (F)
$\alpha$	ส่วนมุมกด (depression angle); (rad)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การตรวจจับแสงในย่านใกล้อินฟราเรด (near-infrared; NIR) เป็นประเด็นที่สำคัญในระบบการสื่อสารทางเส้นใยแก้วนำแสงระยะไกล และการเชื่อมต่อทางด้านแสงในคอมพิวเตอร์ความเร็วสูง ในหลายปีที่ผ่านมาการพัฒนาของสิ่งประดิษฐ์ที่ทำงานร่วมกันได้กับซิลิกอน (Si) และสามารถทำงานที่ความยาวคลื่นทางโทรคมนาคม 1.3 และ 1.55  $\mu\text{m}$  ถูกนำมาเป็นหัวข้อของงานวิจัยอย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่ของระบบการส่งผ่านสัญญาณทางเส้นใยแก้วนำแสงที่ความยาวคลื่นนี้เพื่อที่จะใช้ข้อได้เปรียบของลักษณะเฉพาะของการสูญเสียและการแพร่กระจายที่ต่ำ ดังนั้นนวัตกรรมทางเทคโนโลยีเพื่อจุดประสงค์พิเศษถูกนำมาใช้อย่างมากภายในอุตสาหกรรมทางด้านโทรคมนาคมถึงความมุ่งหมายของการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานที่ความยาวคลื่นเหล่านั้นและทำงานร่วมกันได้กับเทคโนโลยี Si ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน สิ่งจำเป็นที่สำคัญสำหรับสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคตคือแหล่งกำเนิดแสงและตัวตรวจจับแสงที่ทำงานที่ความยาวคลื่นที่ต้องการและทำงานร่วมกันได้กับเทคโนโลยี Si ในปัจจุบัน

เบต้าไอรอนไดซิลิไซด์ ( $\beta\text{-FeSi}_2$ ) สามารถปลูกบน Si ด้วยค่าแลชท์สไม่เข้ากัน 2% - 5% เป็นหนึ่งในตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ NIR เนื่องจากข้อดีหลายอย่าง: (i) มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูงซึ่งมีค่ามากกว่าค่าของผลึก Si ที่ 1.5 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) (ii) แถบพลังงานแบบตรงที่มีค่า 0.85 eV; (iii) เข้ากันได้ดีกับเทคโนโลยี Si (iv) เป็นสารประกอบที่เกิดจากธาตุ Fe และ Si ซึ่งพบได้ง่ายในโลก และ (v) วัสดุเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากความไม่เป็นพิษของธาตุตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ [1]

ผลึกนาโนไอรอนไดซิลิไซด์ (NC- $\beta\text{-FeSi}_2$ ) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของผลึกขนาด 3-5 nm เป็นอีกหนึ่งตัวเลือกสำหรับวัสดุสารกึ่งตัวนำในย่านใกล้แสงอินฟราเรด โดยวัสดุนี้มีคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์คล้ายกับของ  $\beta\text{-FeSi}_2$  และอะมอร์ฟัสไอรอนไดซิลิไซด์ วัสดุนี้ประกอบด้วย Fe และ Si ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมซึ่งธาตุเหล่านี้มีอยู่มากมายตามธรรมชาติและไม่เป็นพิษ วัสดุนี้เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) แบบตรงและแบบเฉียงด้วยค่า 0.74 และ 0.85 eV ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่นของการสื่อสารทางไกลโดยใช้เทคโนโลยีในช่วงจาก 1.3 - 1.55  $\mu\text{m}$  และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัสดุนี้มีค่าสูงกว่า  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  ที่ 1.2 eV นอกจากนี้ฟิล์มบางผลึก NC- $\beta\text{-FeSi}_2$  สามารถปลูกบนทุกฐานรองที่อุณหภูมิห้อง คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้วัสดุนี้เป็นที่ตัวเลือกที่น่าสนใจในเอกสารนี้การประยุกต์ทางด้านอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ อาทิเช่น ไดโอดเปล่งแสง โฟโตไดโอด และ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก ถึงแม้ว่าการประยุกต์ใช้ในโฟโตไดโอดบนรากฐานของ  $\beta\text{-FeSi}_2$  ได้ถูกรายงานแล้ว แต่ยังมีรายงานเกี่ยวกับการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์เชิงลึก NC- $\text{FeSi}_2$  อยู่ไม่มากนัก [2]

โดยในงานวิจัยก่อนหน้านี้ผลึก NC- $\text{FeSi}_2$  ฟิ์มบางที่เตรียมโดยวิธีเคลือบด้วยกระบวนการพัลส์เลเซอร์ (Pulse Laser Deposition; PLD) และวิธีการสปัตเตอริงโดยหันเป้าเข้าหากันโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (Facing-Target Direct-Current Sputtering; FTDCS) ได้ถูกตรวจสอบโครงสร้างโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง (Transmission Electron Microscope; TEM) และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุนี้ได้ถูกตรวจสอบ ได้มีการรายงานแล้วว่าผลึก NC- $\text{FeSi}_2$  ฟิ์มบางมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด  $n$  และมีค่าความเข้มข้นของพาหะ  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  และความเข้มข้นของพาหะนี้สามารถถูกทำให้ลดลงได้โดยไฮโดรจีเนชัน รอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นของ  $n\text{-type NC-FeSi}_2/p\text{-type Si}$  ได้ถูกศึกษาทางด้านไฟฟ้าและคำนวณค่าพารามิเตอร์ของโฟโตโวลตาอิก ซึ่งรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นนี้แสดงการแปลงกระแสเหมือนกับของรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นทั่วไป อย่างไรก็ตามรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นเหล่านี้ยังมีกระแสรั่วที่สูงซึ่งอาจจะมีสาเหตุจะมาจากสถานะผิว (interface states) ที่บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อสถานะผิวเหล่านี้ทำหน้าที่เหมือนกับดักสำหรับพาหะที่เกิดจากแสงและทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจวัดแสงของรอยต่อลดลงอย่างมาก

ในงานวิจัยนี้เพื่อที่จะศึกษาคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วย  $\text{FeSi}_2$  และ Si คณะผู้วิจัยต้องการวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อน ( $Z$ ) ที่รอยต่อโดยใช้เครื่องวัด LCR (Agilent E4980A) ที่ความถี่ ( $f$ ) ต่างกันและศึกษาผลของอุณหภูมิในขณะการวัดที่มีต่อลักษณะเฉพาะของ  $Z$  จากความรู้ทั้งหมดที่ผู้วิจัยมีนี้เป็นงานวิจัยแรกๆ ที่ทำการตรวจวัดลักษณะเฉพาะของ  $Z$  จากเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วย  $\text{FeSi}_2$  และ Si

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการสร้างเซทเทอร์โรจังก์ชันโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วย  $\text{FeSi}_2$  และ Si ด้วยกระบวนการเคลือบเชิงไอทางฟิสิกส์
2. วัดลักษณะเฉพาะของ  $Z$  ของเซทเทอร์โรจังก์ชันโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วย  $\text{FeSi}_2$  และ Si ที่  $f$  ต่างกัน
3. วิเคราะห์ถึงแบบจำลองจากผลของลักษณะของ  $Z$  ที่วัดได้
4. วัดลักษณะเฉพาะของ  $Z$  ของเซทเทอร์โรจังก์ชันโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วย  $\text{FeSi}_2$  และ Si ที่อุณหภูมิต่างกัน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เซทเทอร์โรจังก์ชันโฟโตไดโอดที่ประกอบไปด้วย  $\text{FeSi}_2$  และ Si จะถูกเตรียมโดยกระบวนการฟิสิกส์เชิงไอ
2. วัด  $Z$  ในสภาวะไม่มีแสงภายใต้ช่วง  $f = 20 \text{ Hz} - 2 \text{ MHz}$  โดยใช้เครื่องวัด LCR (รุ่น Agilent E4980A) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการวัด  $Z$  มีค่าในช่วง 160-300 K

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ

### ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	←→									
สร้างเซทเทอร์โรจังก์ชันโฟโตไดโอดโดยวิธีการเชิงไอทางฟิสิกส์		←→								
ศึกษาเครื่องมือที่ใช้วัด $Z$ ภายใต้ $f$ ที่ต่างกัน และอุณหภูมิที่ต่างกัน				←→						
วิเคราะห์แบบจำลองวงจรสมมูลจากลักษณะเฉพาะของ $Z$ ที่วัดได้						←→				
หาค่าตัวแปรที่สำคัญจากแบบจำลอง							←→			
จัดทำรูปเล่ม								←→		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงหลักการและขั้นตอนการเคลือบเชิงไอทางด้านฟิสิกส์เพื่อนำได้เซทเทอร์โรจังก์ชันโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วย  $\text{FeSi}_2$  และ Si
2. ได้ทราบถึงวิธีการวัด  $Z$  ที่รอยต่อของเซทเทอร์โรจังก์ชันโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วย  $\text{FeSi}_2$  และ Si
3. ได้ทราบถึงค่า  $Z$  ของเซทเทอร์โรจังก์ชันโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วย  $\text{FeSi}_2$  และ Si
4. ได้ทราบถึงผลของ  $f$  และอุณหภูมิที่มีต่อค่า  $Z$  ของเซทเทอร์โรจังก์ชันโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วย  $\text{FeSi}_2$  และ Si



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

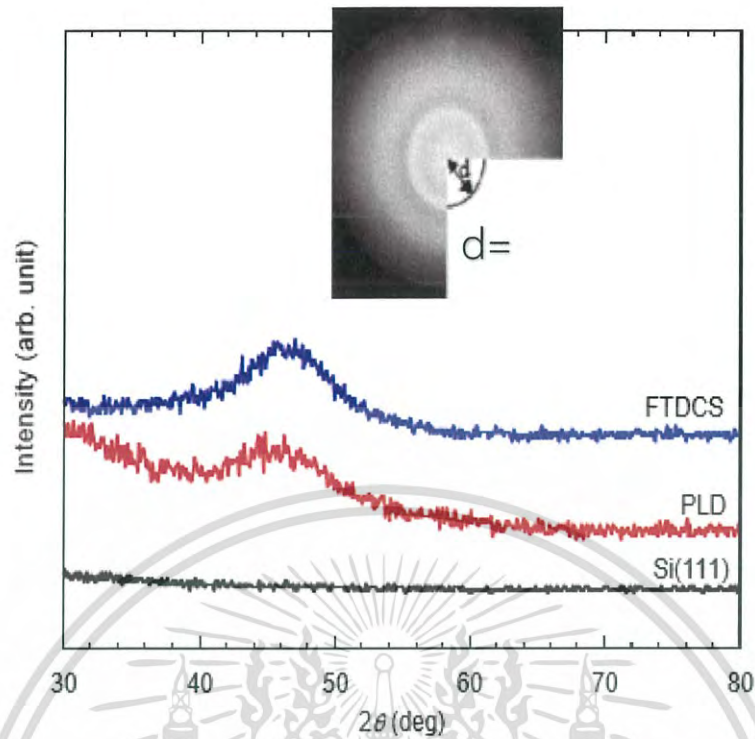
ในบทนี้จะกล่าวถึง คุณสมบัติของผลึก NC-FeSi<sub>2</sub> และ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> เทคนิคกระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี FTDCS และการวิเคราะห์การวัดค่า Z ดังที่จะแสดงในหัวข้อต่อไป

### 2.1 คุณสมบัติโครงสร้างของผลึก NC-FeSi<sub>2</sub> [2]

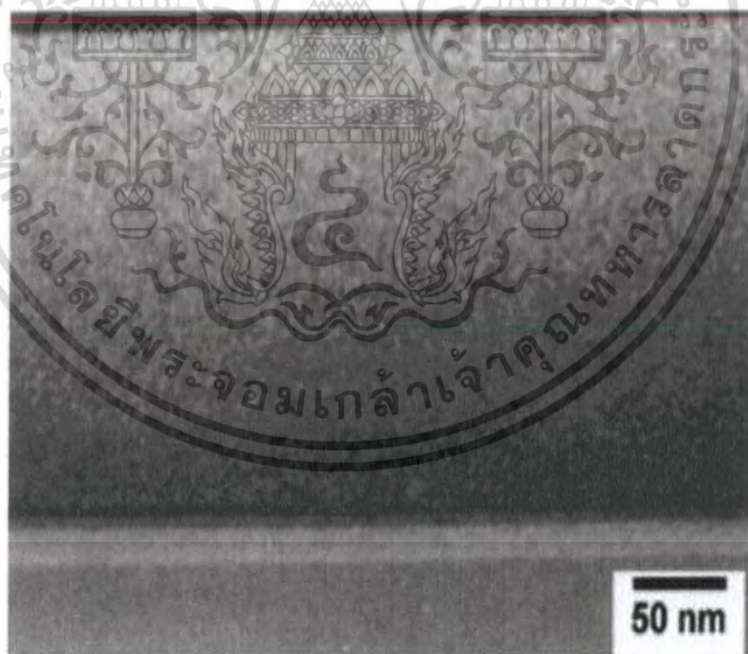
ในช่วงไม่กี่ปีมานี้ NC-FeSi<sub>2</sub> เป็นแนวโน้มใหม่สำหรับวัสดุสารกึ่งตัวนำในย่านแสงใกล้อินฟราเรด มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ใกล้เคียงกับ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> และอะมอร์ฟัสไอรอนไดซิลิไซด์ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและปลอดภัย สารกึ่งตัวนำ NC-FeSi<sub>2</sub> จะมี  $E_g$  แบบตรงและแบบเฉียงเท่ากับ 0.74 และ 0.85 eV ตามลำดับ ซึ่งจะตรงกับความยาวคลื่นช่วง 1.3 และ 1.55  $\mu\text{m}$  และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีมากกว่า  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  ที่ 1.2 eV ที่สำคัญฟิล์มบาง NC-FeSi<sub>2</sub> สามารถปลูกได้บนฐานรองรับที่ต่างกันได้ในอุณหภูมิห้อง จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประยุกต์กับอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น อินฟราเรดออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ไดโอดเปล่งแสง (LED) และเซลล์แสงอาทิตย์

ฟิล์มบาง NC-FeSi<sub>2</sub> ที่ถูกเตรียมโดย PLD และวิธี FTDCS ได้ถูกตรวจสอบโครงสร้างโดยวิธี XRD และ TEM และการตรวจสอบระบบไฟฟ้าจากรูปที่ 2.1 ได้แสดงผลการวัดโดยใช้ XRD โดย 2 $\theta$ -สแกน ที่มุมตกกระทบ 4° เกิดจุดสูงสุดของกราฟเนื่องจากโครงสร้างผลึกนาโนของฟิล์ม NC-FeSi<sub>2</sub> และ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> มีหลายระนาบผลึกสำหรับการเลี้ยวเบน เช่น 313, 331, 004, 040, 041, 114, 511, 422, และ 133 ที่ 2 $\theta$  ระหว่าง 40° และ 50° จุดสูงสุดที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลจากการซ้อนทับกันของการเลี้ยวเบนจากระนาบต่างๆ ความเข้มของจุดสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์ม NC-FeSi<sub>2</sub> ที่เตรียมโดยวิธี PLD ซึ่งประกอบด้วยผลึกขนาด 3-5 nm ซึ่งจะได้ว่าขนาดผลึกของฟิล์ม NC-FeSi<sub>2</sub> ที่เตรียมโดย FTDCS ค่อนข้างใหญ่กว่าฟิล์ม NC-FeSi<sub>2</sub> ที่เตรียมโดย PLD รูปที่ 2.2 ฟิล์มประกอบด้วยผลึกขนาด 3-5 nm จำนวนมากอาจเป็นผลึกนาโนของ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 รูปแบบ XRD วัดโดยใช้วิธี  $2\theta$ -สแกน ของฟิล์ม NC-FeSi<sub>2</sub> ที่เตรียมโดยวิธี PLD และ FTDCS

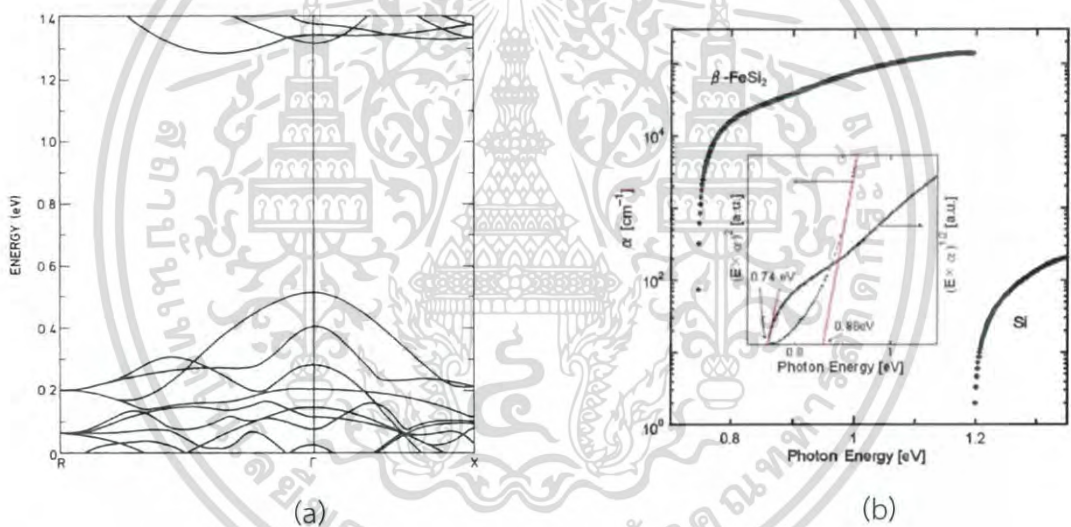


รูปที่ 2.2 ภาพแสดงการวัดโดยใช้ TEM ในที่มืดของฟิล์มบาง NC-FeSi<sub>2</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 คุณสมบัติโครงสร้างของผลึก $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> [3]

จากรูปที่ 2.3(a) แสดงแผนภาพของ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> สำหรับพลังงานที่มีค่าใกล้กับช่องว่างแถบพลังงาน เห็นได้ว่าลักษณะของช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบเฉียง ค่าความต่างระหว่างช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงและแบบเฉียงมีน้อยมาก ช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียงสามารถอธิบายส่วนของการดูดกลืนสำหรับพลังงานที่ต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง จากรูปเพิ่มเติมในรูปที่ 2.3(b)  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> มีช่องว่างแถบพลังงานทางแสงประมาณ 0.85 eV ซึ่งมากกว่าช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียง (0.76 eV) ซึ่งสัมพันธ์กับเส้นใยแก้วนำแสงสำหรับความยาวคลื่นในการสื่อสารโทรคมนาคม (1.3 และ 1.5  $\mu\text{m}$ ) [3] ในปัจจุบันนี้ระบบการส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงส่วนใหญ่ทำงานในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้เนื่องจากเกิดสารสูญเสียต่ำและลักษณะการกระจายต่ำของเส้นใยแก้วนำแสงที่มีฐานเป็นซิลิกา โดยลักษณะเฉพาะของ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> คือมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูงกว่า  $10^5$  ต่อ cm ซึ่งเป็นอย่างน้อยสองลำดับของขนาดที่ใหญ่กว่าผลึก Si ที่ 1.2 eV ดังแสดงในรูปที่ 2.3(b)

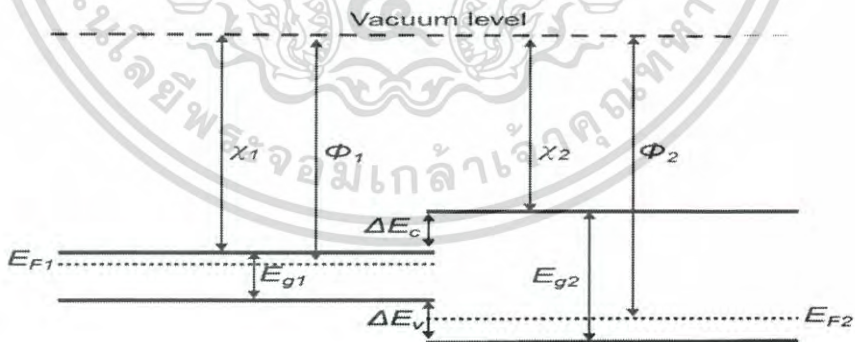


รูปที่ 2.3 (a) ลักษณะช่องว่างแถบพลังงานของ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> และ (b) สเปกตรัมการดูดกลืนของ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> ที่แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงและแบบเฉียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

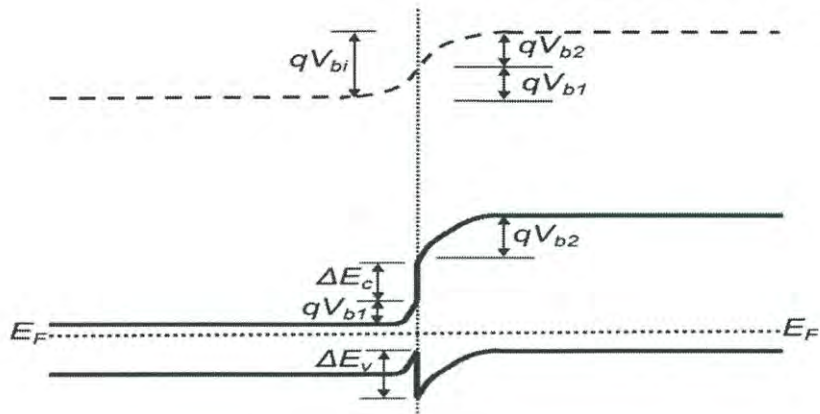
### 2.3 ไดโอดเปล่งแสงของรอยต่อเฮเทอโรโรจิงค์ชั้น

โดยทั่วไปเฮเทอโรโรจิงค์ชั้นหมายถึงผิวหน้าที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น 2 ชั้น ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ ที่ต่างชนิดกันวัสดุสารกึ่งตัวนำเหล่านี้มีช่องว่างไม่เท่ากันโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ 2 วัสดุสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดการก่อดิวของสนามไฟฟ้า ( $E$ ) โดยรอบของสารทั้ง 2 ถ้าวัสดุของสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 มีความคล้ายกันในเรื่องการนำไฟฟ้าจะเรียกว่ารอยต่อเฮเทอโรโรจิงค์ชั้นแบบเหมือนกัน แถบโค้งของเฮเทอโรโรจิงค์ชั้นไม่เรียบเท่ากับของโฮโมจิงค์ชั้นเนื่องจากความแตกต่างของแรงดึงดูดอิเล็กตรอน ฟังก์ชันงาน และอื่นๆ ซึ่งอาจทำให้เกิดสภาวะอินเตอเฟสหรือแถบที่ไม่ต่อเนื่องที่มีรูปแบบการรวมตัวกันตรงกลางแผนภาพแถบพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดที่ตรงกันข้ามกันก่อนสร้างรอยต่อแสดงใน รูปที่ 2.3 วัสดุสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 จะมีความแตกต่างของ  $E_c$  ความแตกต่างของสภาพยอม (Permittivities;  $\epsilon$ ) ความแตกต่างของฟังก์ชันงาน ( $\phi$ ), และความแตกต่างของแรงดึงดูดของอิเล็กตรอนความสัมพันธ์ของแรงดึงดูดของอิเล็กตรอนและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำจะกำหนดตามลำดับและเป็นพลังงานที่จำเป็นในการลดอิเล็กตรอนออกจากด้านล่างของแถบนำไฟฟ้า ( $E_c$ ) และจากระดับเฟอร์มิไปยังระดับสล็อตพาหะส่วนที่เป็นเครื่องหมาย 1 และ 2 หมายถึงสารกึ่งตัวนำ  $n$ -type และ  $p$ -type จากรูปที่ 2.3  $E_c$  มีค่าเท่ากับความแตกต่างของแรงดึงดูดของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำทั้งสอง รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของการคำนวณหาค่า  $p$ - $n$  ในสภาวะสมดุลแรงดันไฟฟ้า ( $V_b$ ) เนื่องจากความแตกต่างของฟังก์ชันงาน ( $\phi_2 - \phi_1$ ) เท่ากับผลรวมของ  $V$  ในตัวทั้ง 2 ด้าน ( $V_{bi} = V_{b1} + V_{b2}$ )



รูปที่ 2.4 แผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิด  $n$  และ ชนิด  $p$  ที่แยกได้และมีช่องว่างของแถบพลังงานที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



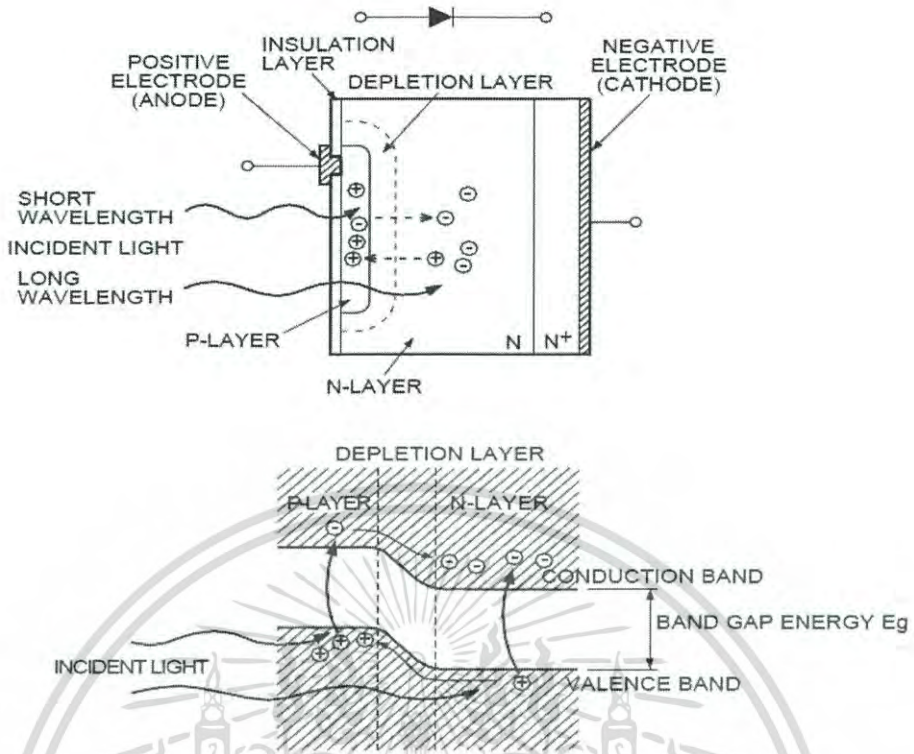
รูปที่ 2.5 การจับคู่ที่ภาวะสมดุล

โฟโตไดโอดเป็นตัวตรวจจับแสงซึ่งทำให้เกิดกระแสหรือแรงดันเมื่อรอยต่อจากสารกึ่งตัวนำถูกฉายแสง โดยคำว่าโฟโตไดโอดสามารถกำหนดได้ในวงกว้างโดยปกติแล้วจะหมายถึงเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับความเข้มของแสงในโหมดความนำที่เกิดจากแสงโฟโตไดโอดมักจะเป็นแบบไบอัสย้อนกลับโดยการไบอัสย้อนกลับนี้จะเป็นการเพิ่มความกว้างของชั้นปลอดพาหะซึ่งจะช่วยลด  $C$  และทำให้มีเวลาในการตอบสนองได้เร็วขึ้นการไบอัสย้อนกลับทำให้เกิดกระแสอิมิตัวเพียงเล็กน้อยในขณะที่กระแสที่เกิดจากแสงนั้นเป็นส่วนเชิงเส้นตรงกับควมส่องสว่าง [4-9]

โฟโตไดโอดจำแนกได้ตามฟังก์ชันและโครงสร้างดังนี้ (i) ไดโอด  $p-n$ , (ii) พินไดโอด, (iii) โฟโตไดโอดชนิดซีดกี, (iv) อวาลานซ์โฟโตไดโอด [10] โดยทั้งหมดที่กล่าวมานี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการตรวจจับความเข้มตำแหน่งสี และแสงสว่างเมื่อแสงตกกระทบโฟโตไดโอดอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างผลึกจะถูกกระตุ้นถ้าพลังงานแสงมากกว่าพลังงานของ  $E_g$  อิเล็กตรอนจะถูกนำมารวมตัวกันใน  $E_c$  โดยจะทิ้งโฮลไว้ในแถบวาเลนซ์ แสดงในรูปที่ 2.5 คู่อิเล็กตรอน-โฮลเหล่านี้เกิดขึ้นทั่วทั้งชั้น  $n$ , ชั้นปลอดพาหะ, และชั้น  $p$  ในบริเวณปลอดพาหะ  $E$  จะเร่งอิเล็กตรอนเหล่านี้ไปทางชั้น  $n$  และโฮลไปทางชั้น  $p$  อิเล็กตรอนของคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่สร้างขึ้นในชั้น  $n$  พร้อมกับอิเล็กตรอนที่มาจากชั้น  $p$  จะถูกปล่อยไว้ในแถบนำแสง ส่วนโฮลในตอนนี้ได้เกิดการแพร่ผ่านชั้น  $n$  และไปยังชั้นปลอดพาหะแล้วก็ไปรวมตัวกันในแถบวาเลนซ์ โดยลักษณะแบบนี้ที่คู่อิเล็กตรอน-โฮล ถูกสร้างขึ้นตามสัดส่วนของปริมาณแสงที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวมในชั้น  $n$  และ  $p$  สิ่งนี้ส่งผลให้ชั้น  $p$  มีประจุเป็นบวกชั้น  $n$  มีประจุเป็นลบหากมีการต่อวงจรภายนอกเข้ามาระหว่างชั้น  $n$  และ  $p$  อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากชั้น  $n$  ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ออกจากชั้น  $p$  ไปทางขั้วไฟฟ้าด้านตรงข้ามกัน คู่อิเล็กตรอน-โฮล เหล่านี้จะสร้างกระแสในสารกึ่งตัวนำเรียกว่า พาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





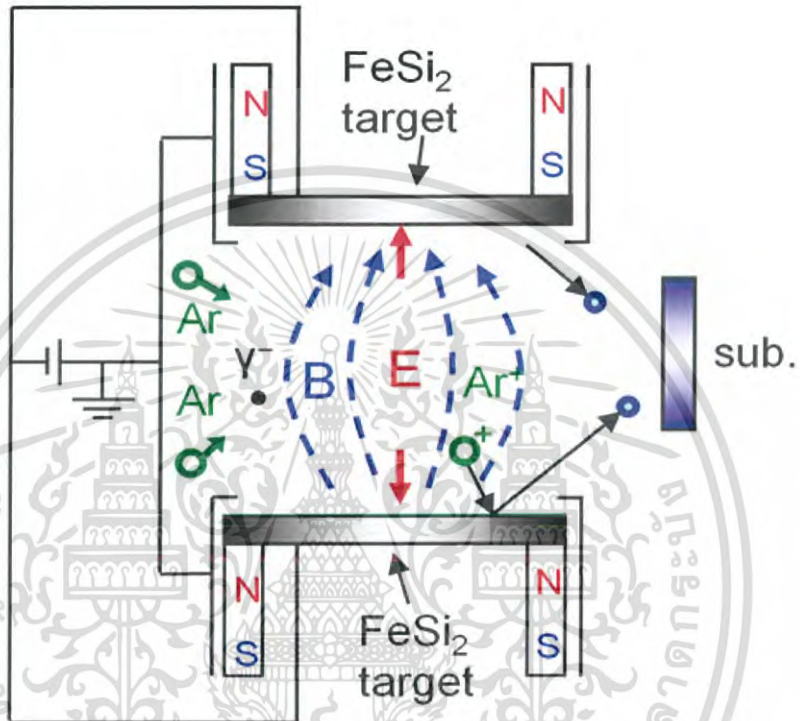
รูปที่ 2.6 (a) ส่วนของโฟโตไดโอดและ (b) สถานะการเชื่อมต่อโฟโตไดโอด p-n

### 2.4 FTDCS [11]

สปีดเตอริงเป็นกระบวนการเคลือบไอเชิงฟิสิกส์ชนิดหนึ่งซึ่งนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เช่น เคลือบฟิล์มบาง ทำความสะอาดพื้นผิวและอื่นๆ มันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาคที่ถูกยิง เช่น ไอออนที่ถูกเร่งและอะตอมที่ผิวเป้าเมื่อไอออนที่ถูกเร่งถึงผิวเป้าด้วยพลังงานที่มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่ผิวอะตอมที่เป้าจะหลุดออกจากวัสดุของแข็งที่เป็นเป้าและไปเคลือบบนฐานรอง FTDCS เป็นเทคนิคหนึ่งของการสปีดเตอริงสำหรับการเคลือบฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่ำและมีอัตราการเคลือบสูง ส่วนประกอบของ FTDCS แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.6 คู่ของแผ่นเป้าขนาดเท่ากันวางหันหน้าเข้าหากันโดยจะมีแม่เหล็กถาวรถูกวางแยกไว้หลังเป้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก (B) ที่ขยายจากเป้าไปยังที่อื่นๆ พลาสมาที่ถูกสร้างจะถูกบังคับโดย B ภายในพื้นที่การปล่อยอนุภาคที่ถูกสร้างจากสปีดเตอริงโดยกระบวนการนี้จะทำให้เกิดพลาสมาและใช้ฟิล์มเคลือบบนฐานที่ถูกติดตั้งที่แยกจากบริเวณที่เกิดพลาสมา จากรูปที่ 2.6 ตัวเป้าจะเป็นแคโทดและภาชนะสุญญากาศที่ประกอบด้วยกรวดซิลด์จะเป็นแอโนดทั้งแคโทดและแอโนดจะต่อไปยังแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ทำหน้าที่เป็น

แหล่งพลังงานสปีดเตอริงสำหรับกระบวนการปล่อยพลาสมา ในวิธีนี้อิเล็กตรอนพลังงานสูงจะถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า บังคับใน B ที่มีทิศตั้งฉากกับเป้าไอออนในเซชันของก๊าซ การสปีดเตอริงจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นจึงช่วยไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เด็ดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มอัตราการสปีดเตอร์และอัตราการปลูกฟิล์มที่สูง ในทางตรงข้ามเทคนิคแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงทั่วไปอิเล็กตรอนจะวิ่งไปที่ฐานด้านตรงข้ามกับเป้าและฐานจะวางด้านข้างกับเป้าอิเล็กตรอนและไอออนกระทบกับฐานทำให้ลดลงอย่างมาก นอกจากนี้การแผ่รังสีความร้อนจากเป้าไปยังตัวฐานจะมีค่าน้อยเพื่อให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของฐานมีค่าน้อย ดังนั้นฟิล์มควรปลูกในอุณหภูมิต่ำ

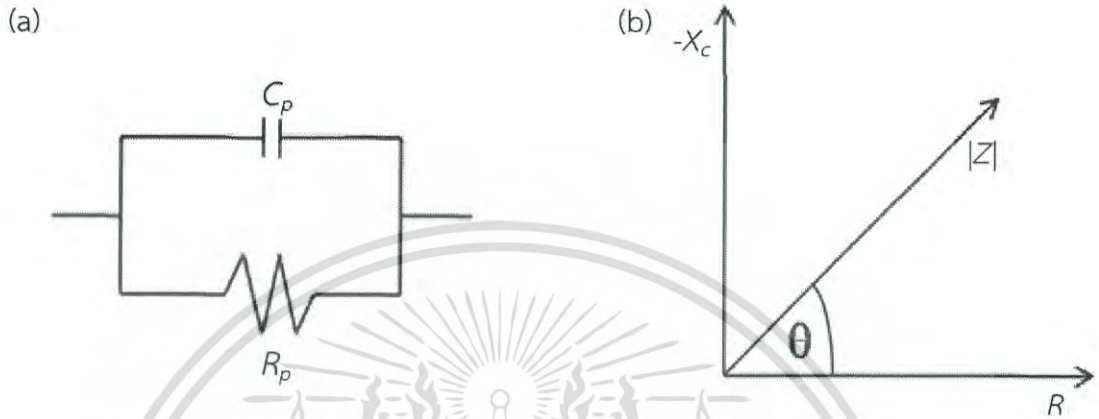


รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงกระบวนการ FTDCS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การวิเคราะห์การวัดค่าสัมบูรณ์ของ $Z$

วงจรสมมูลที่เหมาะสมในการอธิบายสมบัติของ  $Z$  ของรอยต่อ  $p-n$  คือความต้านทาน  $R_p$  ต่อขนานกับความจุ  $C_p$  ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูล  $R_p$  กับ  $C_p$  และแผนภาพแสดงเฟสของค่า  $-X_c$  กับ  $R$

(a) แสดงวงจรสมมูล  $R_p$  กับ  $C_p$  ต่อขนานกัน

(b) แสดงค่าสัมบูรณ์ของ  $Z$

ค่าจินตภาพของความจุ (capacitive reactance,  $X_c$ ) คือ

$$X_c = \frac{1}{\omega C_p} \quad (2.1)$$

มุมเฟส  $\theta$  จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$\tan \theta = \frac{|X_c|}{R_p} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอกเท่านั้น ไม่ควรนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การสูญเสียพลังงานไปในวงจรจะแสดงผ่านทางแฟกเตอร์สูญเสีย (dissipation factor,  $D$ ) คือ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \tan \theta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (2.3)$$

จะเห็นว่าเมื่อ  $f$  เพิ่มขึ้นแล้ว  $D$  จะมีค่าลดลง

และแฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor,  $Q$ ) คือ

$$Q = \frac{1}{D} = \omega R_p C_p \quad (2.4)$$

ในทางปฏิบัติฟังก์ชันที่ควรวัดคือ  $C_p-D$ ,  $C_p-Q$ ,  $C_p-G$  และ  $C_p-R_p$  โดยที่  $G$  คือ ความนำไฟฟ้าซึ่ง

$$G = \frac{1}{R_p} \quad (2.5)$$

โดยทั่วไปที่  $f$  ใดๆ ค่า  $Z$  จะเป็นดังสมการ

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

และ

$$D = \frac{Z'}{Z''} \quad (2.7)$$

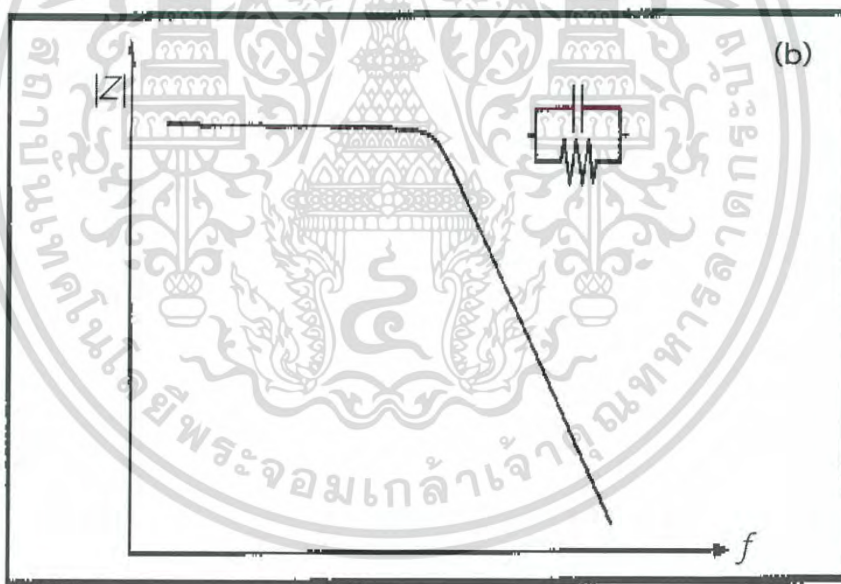
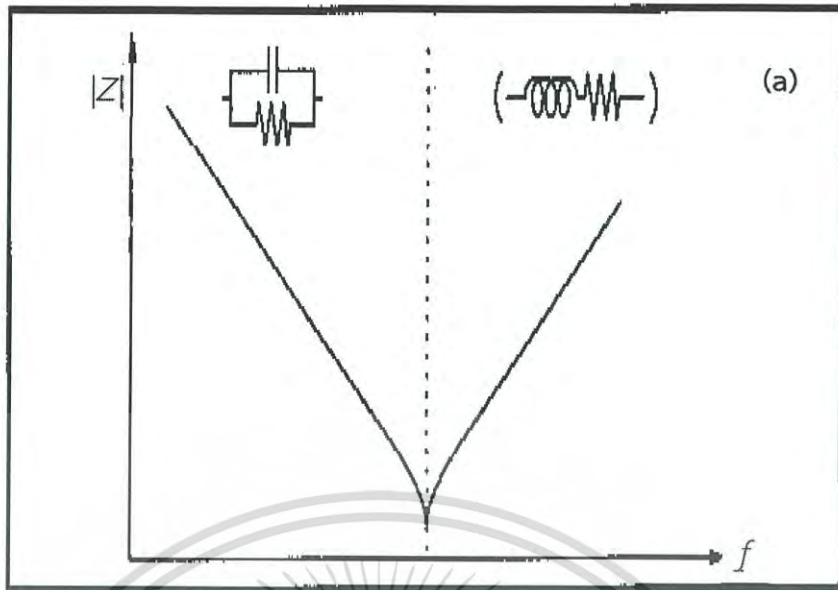
เมื่อ

$$Z' = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p R_p^2} \quad (2.8)$$

$$Z'' = \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p R_p^2} \quad (2.9)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $|Z|$  กับ  $f$  จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Large R

รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $|Z|$  กับ  $f$

(a) ในกรณีที่  $C$  มีค่าต่ำ

(b) ในกรณีที่  $R$  มีค่าต่ำมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติสภาพนำไฟฟ้ากระแสสลับจะสอดคล้องกับสมการของจอนเซอร์ (Jonscher expression) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^n \quad (2.10)$$

เมื่อ  $n$  คือเลขยกกำลัง

จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของ  $Z$  คือ

$$Z' = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (2.11)$$

และ

$$Z'' = \frac{-\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (2.12)$$

ซึ่งค่า  $R_p$  จะคำนวณได้จากจุดตัดแกน  $Z''$  ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $-Z''$  ส่วนค่าความจุ  $C_p$  จะคำนวณได้จาก  $f$  ที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลม (semi-circular) ในกรณีอุดมคติที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลมคือ  $Z' = -Z''$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} = \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (2.13)$$

จะได้ว่า

$$C_p = \frac{1}{\omega R_p} \quad (2.14)$$

ในทำนองเดียวกันเวลาผ่อนคลาย (relaxation time,  $\tau$ ) จะคำนวณได้จาก  $f_{max}$  ของครึ่งวงกลม

$$\tau = \frac{1}{\omega_{max}} = C_p R_p \quad (2.15)$$

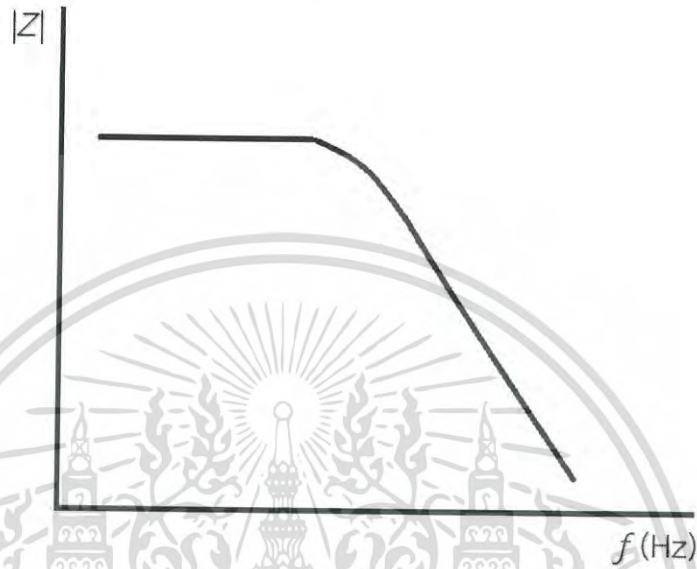
หรือ

$$\omega_{max} = C_p R_p = 1 \quad (2.16)$$

เอกสารนี้จัดทำขึ้นโดยอัตโนมัติจากสมการที่ (2.11) และ (2.12) จะได้ว่า ไม่นานมานี้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

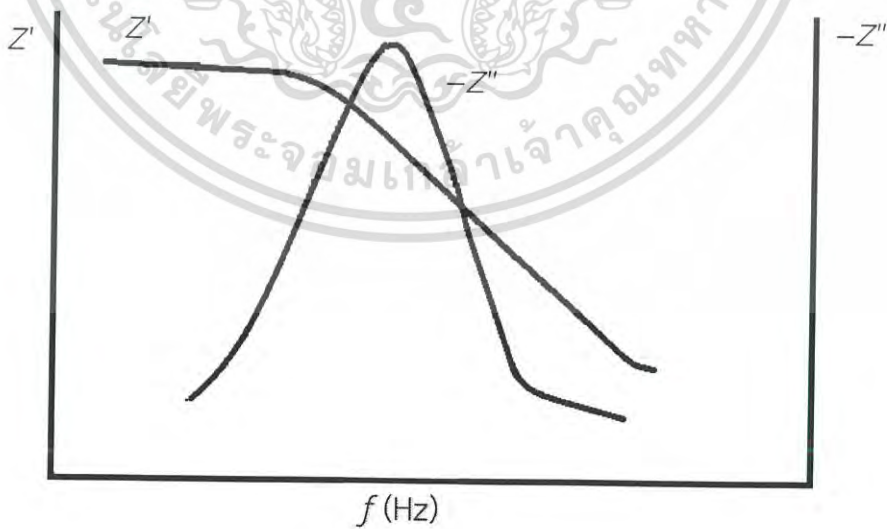
$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (2.17)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $|Z|$  กับ  $f$  จะเขียนได้ดังรูปที่ 2.9



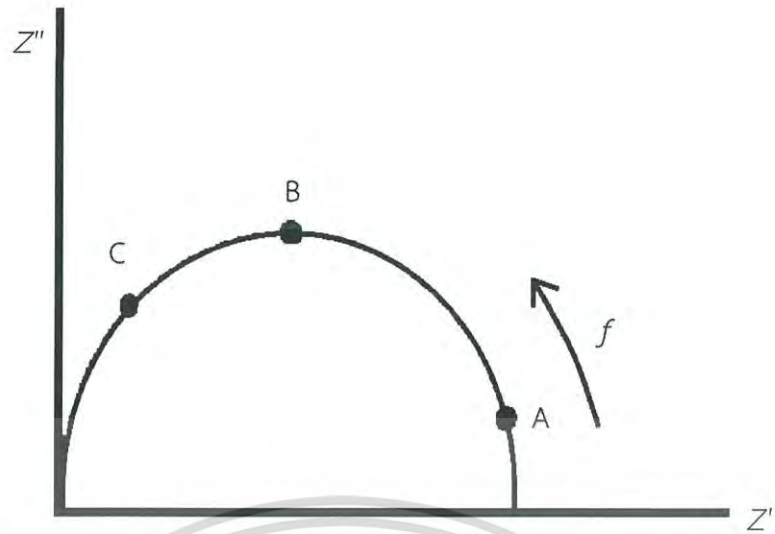
รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ  $|Z|$  กับ  $f$

แต่ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $f$  และ  $-Z''$  กับ  $f$  จะได้กราฟดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $f$  และ  $-Z''$  กับ  $f$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าก และถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $-Z''$  จะได้กราฟดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $-Z''$

- ที่  $f$  ต่ำ (ที่บริเวณจุด A)  $Z'$  จะมีค่ามาก ส่วน  $-Z''$  จะมีค่าน้อย
- ที่  $f$  ของจุดสูงสุด (ที่บริเวณจุด B)  $Z'$  จะมีค่าลดลง ส่วน  $-Z''$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นและในกรณีอุดมคติจะได้ว่า  $Z' = -Z''$
- ที่  $f$  สูงขึ้น (ที่บริเวณจุด C) ทั้ง  $Z'$  และ  $-Z''$  จะมีค่าลดลงอีกและถ้านำมาเขียนกราฟ  $|Z|$  กับ  $f$  จะได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $|Z|$  กับ  $f$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 2.5.1 วงจร RC ที่มีการต่อกันในแบบอนุกรม [12-18]

ลักษณะคล้ายกับ R สองตัวต่ออนุกรมต่อกันอิมพีแดนซ์ลัทธิ ( $Z_{RC}$ ) จะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน ( $Z_R$ ) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $Z_C$ ) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.18)$$

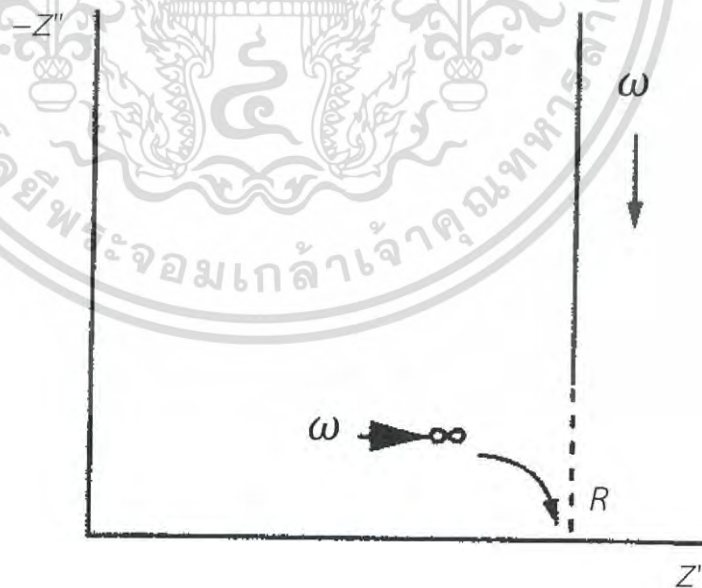
อย่างไรก็ตามค่า  $Z_C$  จะขึ้นอยู่กับ  $f$  ดังนั้นจำเป็นที่ต้องเขียนค่าของ  $Z_C$  ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่า  $Z$  โดยที่  $j = \sqrt{-1}$  ดังนั้น

$$j = \sqrt{-1} \text{ และ } Z_R = R_S$$

แล้วจะได้ว่า

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{j\omega C} \quad (2.19)$$

โดยที่  $R_S$  เป็นจำนวนจริงของ  $Z$  ส่วน  $\frac{1}{j\omega C}$  เป็นจำนวน  $Z''$  เมื่อ  $f$  เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี  $C$  มีค่าใหญ่มาแล้วจะได้ว่า  $Z_{RC}$  เข้าสู่อ่า  $R_S$  จากกราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน  $Z'$  จะเป็นค่าของ  $Z_R$  ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.14 กราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่า  $Z$  ของวงจร RC ต่ออนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

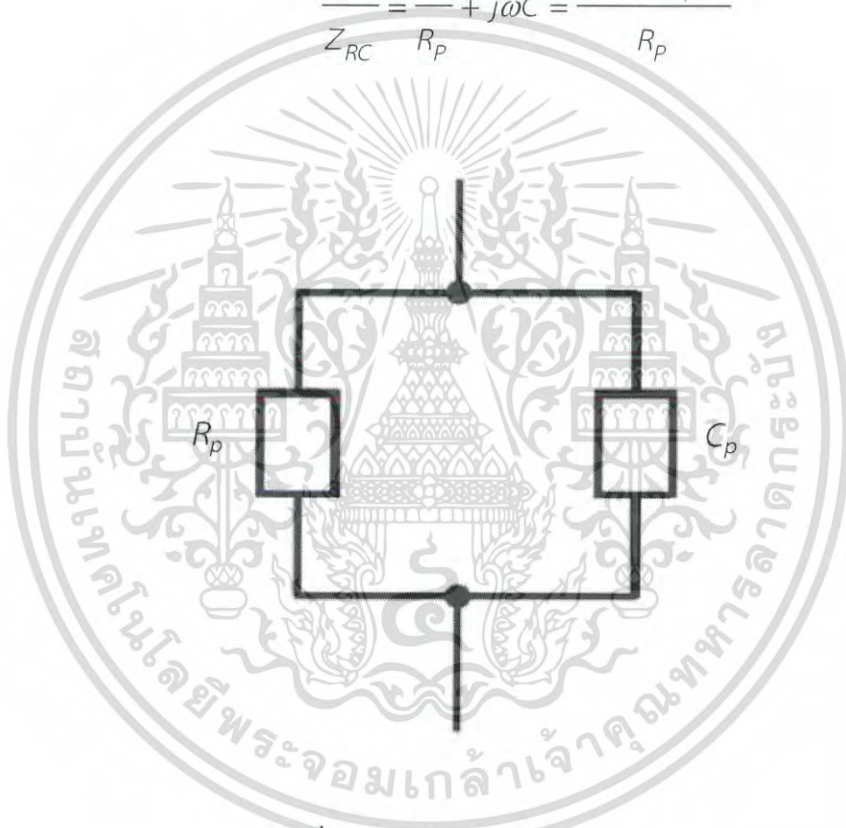
### 2.5.2 วงจร RC ที่มีการต่อกันในแบบขนาน [12-18]

ในกรณี  $Z_R$  กับ  $Z_C$  ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.14 แล้ว  $Z$  จะมีค่าดังนี้คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.20)$$

ในกรณีนี้ให้  $Z_R = R_p$  ดังนั้นสมการ (2.20) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C = \frac{(1 + j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.15 วงจร RC ต่อแบบขนาน

เพื่อที่จะแยก  $Z'$  และ  $Z''$  ออกจากกัน จำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต  $(1 - j\omega R_p C)$  คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการที่ (2.21) จะได้

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{(Z\omega R_p C + 1)(j\omega R_p C - 1)}{R_p(j\omega R_p C - 1)} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= - \left[ \frac{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}{R_p (j\omega R_p C - 1)} \right] \quad (2.23)$$

$$Z_{RC} = - \left[ \frac{j\omega R_p^2 C - R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right] \quad (2.24)$$

ดังนั้น

$$Z_{RC} = \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} - j \left( \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right) = Z' - jZ'' \quad (2.25)$$

$$= Z' - jZ'' \quad (2.26)$$

โดยที่

$$Z' = \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} = \frac{R_p}{(\omega\tau)^2 + 1} \quad (2.27)$$

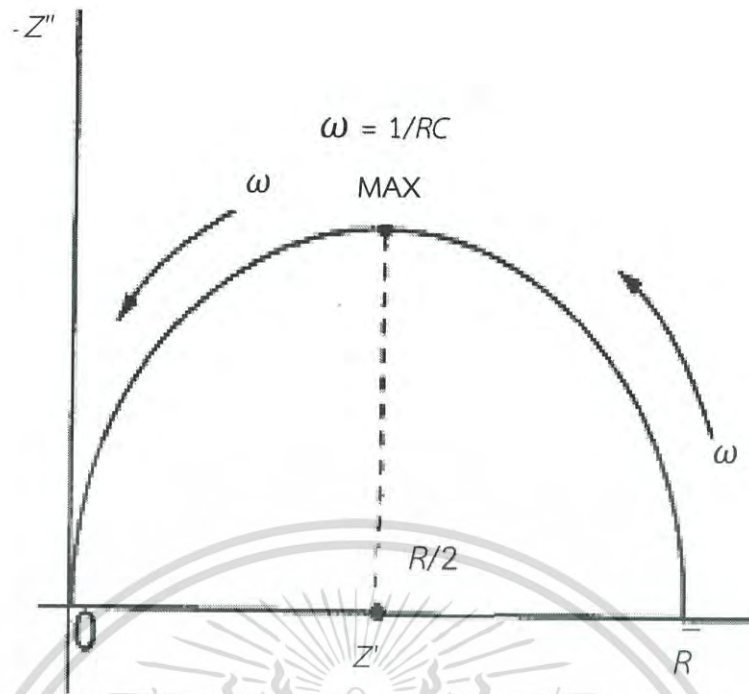
และ

$$Z'' = \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} = R_p \left[ \frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.28)$$

เมื่อ  $\tau = R_p C_p$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $Z''$  จะเรียกว่ากราฟของไนควิสต์ซึ่งกราฟวงจรร  $RC$  ที่มีการต่อกันในแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.15

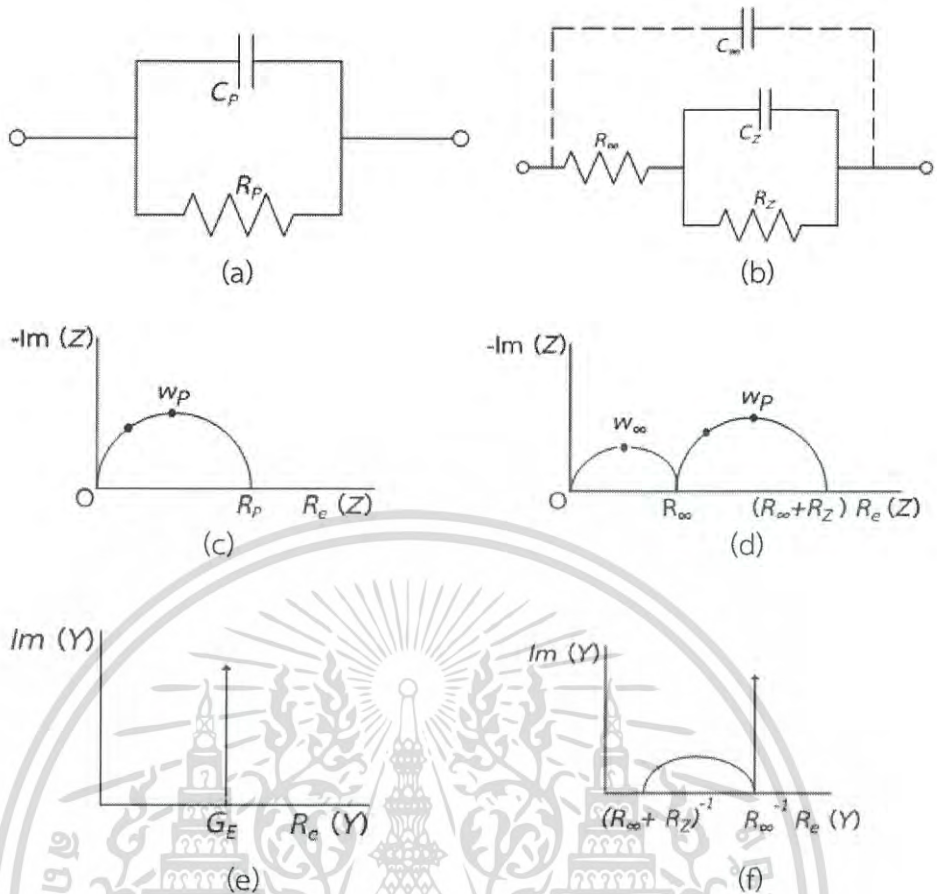
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 กราฟของโนควิสต์ของวงจร  $RC$  ที่มีการต่อกันในแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ  $\omega = \frac{1}{RC}$

วงจร  $RC$  ที่มีการต่อกันในแบบขนาน 2 รูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบ  $Z$  สเปกโตรสโคปี และแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 วงจร RC ที่มีการต่อกันในแบบขนานอย่างง่าย (a,d) Z สเปกโตรโคปี (b,e) และ แอดมิตแตนซ์สเปกโตรโคปี (c,f)

อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทำตัวนำไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิด  $C$  ที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance,  $C_{geo}$ ) ซึ่งก็คือ  $C_{\infty}$  หรือ  $C_1$  ในรูปที่ 2.16 ส่วน  $R$  ของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance,  $R_b$ ) ซึ่งก็คือ  $R_{\infty}$  หรือ  $R_1$  แล้วค่า  $\tau = R_{\infty}C_{\infty} = R_1C_1$  ความหมายของค่า  $\tau$  นี้ก็คือค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก  $\tau_D$  ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเองความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ที่ทำให้  $Z''$  มีค่าสูงสุด คือ  $\omega_p$  และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.15(b) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข  $\omega_p \tau_D = 1$  โดยทั่วไป  $\tau_D < 10^{-7} s$  ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด ( $\omega_{max}$ ) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{max} \tau_D \leq 1$  มักจะไม่ปรากฏค่า  $Z''$  ในกราฟของ  $Z$  สเปกโตรโคปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว  $\tau_D$  จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นใน  $Z$  สเปกโตรโคปีแต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข  $\omega_{max} \tau_D \geq 1$  แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของ  $Z$  สเปกโตรโคปีสารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของ  $Z$  สเปกโตรโคปี กล่าวคือกราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน  $Z'$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากกรณีที่  $R_1 = R_\infty$  และ  $C_1 = C_\infty$  ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิมพีแดนซ์โอดนี้ อยู่ในสารละลายเคมีขณะที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเราจะให้  $R_1 = R_R$  และ  $C_1 = C_R$  เมื่อ  $R_R$  คือความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมีส่วน  $C_R$  คือความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาริเซชัน (polarization region) ในสารละลายที่อยู่ติดกับขั้วอิมพีแดนซ์โอดซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.16(d) ได้กำหนดให้  $R_2 = R_R$  และ  $C_2 = C_R$  ส่วนรูป 2.16(e) จะแสดงกราฟครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงที่ของเวลาคือ  $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$  และกราฟครึ่งวงกลมที่เกิดจาก  $R_\infty$  และ  $C_\infty$  จะแสดงจุดไขว้ปลายดั่งรูปที่ 2.16(e) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่  $f$  สูงมากกว่า  $f$  ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟ  $Z$  สเปกโตรสโคปิกจะชี้ทิศทางของ  $f$  ของการวัดที่เพิ่มขึ้นและนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $-\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Im}(Z)$  กับ  $\text{Re}(Z)$  เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแรนต์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น  $Z = Z' - jZ''$  และเขียน  $\text{Im}(Z)$  แทน  $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปิกของวงจร RC ต่อขนานของวงจрдังรูปที่ 2.16(a) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัพท์คือผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน ( $G_1$ ) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $\omega C_1$ ) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_o = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.29)$$

กราฟของสมการที่ (2.29) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.16(c) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรรูปที่ 2.16(d) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ซึ่งกราฟของสมการ (2.23) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.16(f) อย่างไรก็ตามกราฟของรูปที่ 2.16(b), (c), (e) และ (f) ไม่แสดงตัวแปรค่า  $f$  เอาไว้ซึ่ง  $f$  เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลองดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมาคือแกน  $\log f$  เพื่อให้เป็น 3 มิติ

ในกรณีต่างๆ ไปทั้ง  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นกับ  $C$  และ  $R$  ซึ่งทั้ง  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นอยู่กับ  $f$  และพบว่า  $Z'$  กับ  $Z''$  มีความสัมพันธ์ต่อกันดังนี้คือ

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.30)$$

$$(Z')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของครึ่งวงกลมคือ  $R/2$  ดังปรากฏในรูปที่ 2.14 ในกรณีที่  $R_1$  ของวงจรมีค่าเป็น 0 เราไม่ว่าจะได้ว่าจุดตัดแกน  $Z'$  จะอยู่ที่ 0

### 2.5.3 กราฟของโบท (Bode plot)

$Z = Z' + jZ''$  สามารถจะเขียนอยู่ในแบบโคออร์ดิเนตตั้งฉาก (rectangular coordinate) และโคออร์ดิเนตเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 2.17 ดังนี้คือ

$$\operatorname{Re}(Z) \equiv Z' = |Z| \cos \phi \quad (2.32)$$

และ

$$\operatorname{Im}(Z) \equiv Z'' = |Z| \sin \phi \quad (2.33)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{Z''}{Z'} \right) \quad (2.34)$$

โดยที่โมดูลัสคือ

$$|Z| = \left[ (Z')^2 + (Z'')^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.35)$$

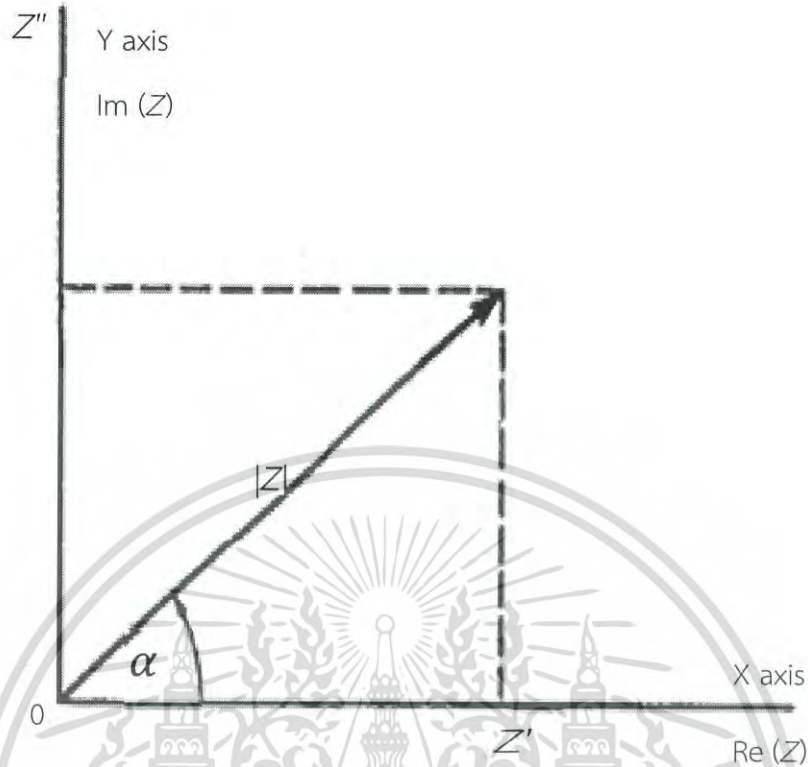
จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

$$\exp(j\phi) = \cos \phi + j \sin \phi \quad (2.36)$$

ดังนั้น

$$Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



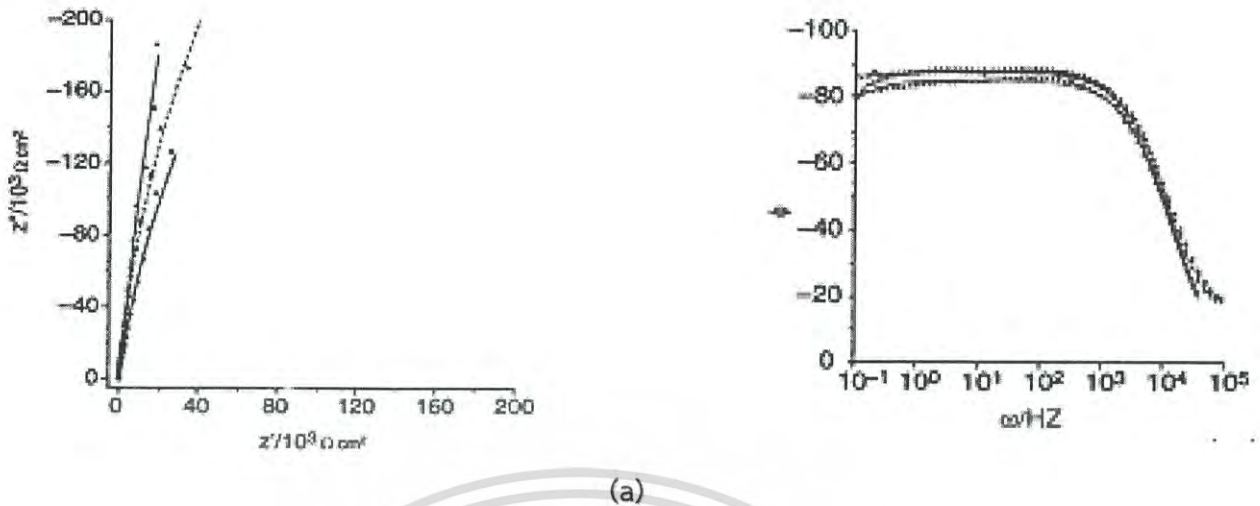
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z$  ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว

มุมเฟสระหว่างทิศทางของ  $Z'$  และ  $Z''$  จะขึ้นกับ  $f$  ที่ใช้วัดในกรณีที่ เป็น  $C$  สมบูรณ์แบบ (pure capacitor)  $\phi = -90$  องศา และ  $\phi$  ของ  $R$  จะมีค่าเป็น  $0$

กราฟของโบดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $|Z|$  กับ  $f$  และ  $\phi$  กับ  $f$  โดยแกน  $f$  จะเป็นลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบดคือ น้ำหนัก (weight) ของ  $Z$  ทั้ง  $f$  สูงและที่  $f$  ต่ำจะมีค่าเท่ากันในขณะที่กราฟของโนควิสต์ค่า  $Z$  จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่าน  $f$  ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่  $\omega \rightarrow 0$  แล้ว  $\phi = -90$  องศา กราฟของ  $\phi$  ที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม  $-90$  องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอีลิเมนต์เฟสคงที่ (constant phase element, CPE) ตัวอย่างของกราฟโบดสำหรับ  $Z$  และ  $\phi$  จะแสดงดังรูปที่ 2.18 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่นความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณ์ของผลึกพหุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.19 (a) แสดงกราฟไนควิสต์และกราฟของโบด  
(b) แสดงกราฟของ  $Z$  ของวงจรที่มี  $C$  ของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่  
ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

ค่า  $Z$  ของ  $CPE$  จะนิยามโดยค่าของ  $T$  และ  $P$  เมื่อ  $T$  คือ ค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กั  $f$  ส่วน  $P$  เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วยและมีค่าอยู่ระหว่าง  $0 \leq P \leq 1$  แต่โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.99 จำนวนจริงของ  $Z(CPE)$  จะเกี่ยวข้องกับ  $R$  และแปรตาม  $\omega^{-P}$  ส่วนจำนวนจินตภาพจะเกี่ยวกับ  $C$  และแปรตาม  $\omega^{-P}$  ด้วยเหมือนกันซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$Z(CPE) = \frac{1}{T(j\omega)^P} \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

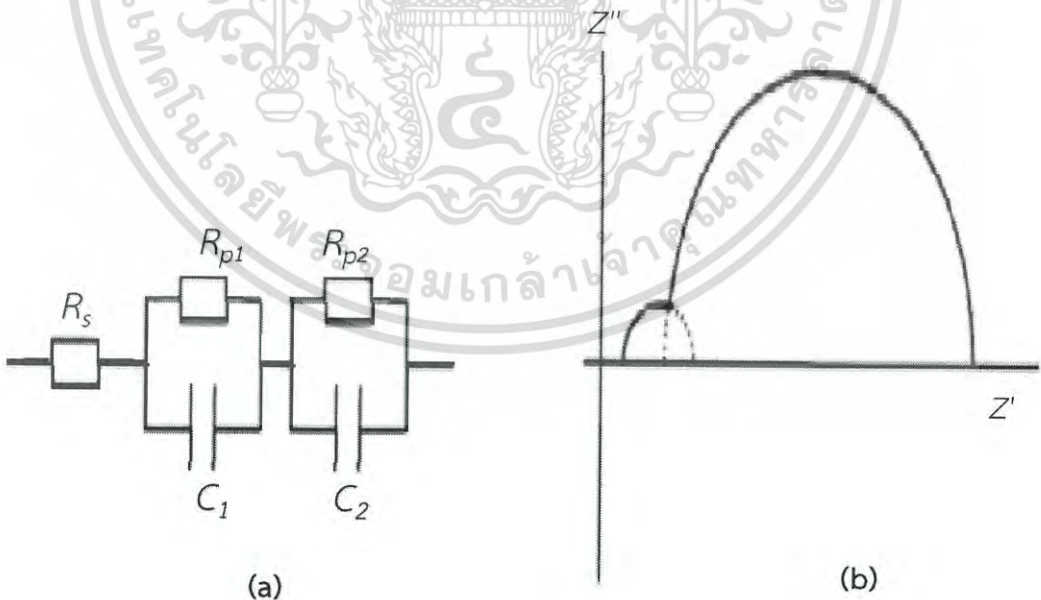
ส่วน C เนื่องจากบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด (double-layer capacitance,  $C_{dl}$ ) จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{dl} = P \sqrt{\frac{T}{R_s^{(P-1)}}} \quad (2.39)$$

พารามิเตอร์  $P$  จะสัมพันธ์กับมุมเฟส ( $\phi$ ) ดังนี้คือ  $\phi = P \left( \frac{\pi}{2} \right)$  ถ้า  $\phi$  เข้าใกล้ 1 ก็จะมีประพจน์ตัวเป็นตัวเก็บประจุสมบูรณโดยที่  $\phi$  มีหน่วยเป็นเรเดียน

#### 2.5.4 แบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (two diode model)

วงจรสมมูลของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัวจะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.19(a) ส่วนสเปกตรัมของ  $Z$  ที่มีค่าคงตัวเวลา 2 ค่าจะแสดงในรูปที่ 2.19(b) รูปครึ่งวงกลมใดเด่นกว่ากันก็ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของค่าคงตัวเวลาทั้งสองนั้นซึ่งมีค่าคงตัวเวลาที่เด่นจะเห็นเป็นรูปครึ่งวงกลมอันเดียวอย่างชัดเจนส่วนรูปครึ่งวงกลมอีกอันหนึ่งจะมองเห็นแต่บางครั้งจะปรากฏรูปครึ่งวงกลมที่บิดเบี้ยวยากที่แยกออกเป็นครึ่งวงกลมซ้อนกัน 2 วง [19-21]



รูปที่ 2.20 (a) แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (b) และกราฟของโนควิสต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.5 แบบจำลองอีลีเมนต์ (Element Model)

แบบจำลองอีลีเมนต์เฟสคงตัวเป็นวงจรที่มีโครงสร้างคล้ายกับวงจร RC ที่มีการต่อกันในแบบขนานเพียงแต่เปลี่ยนจากตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ตอบสนองต่อ  $f$  ปกติไปเป็น  $C$  ที่ขึ้นกับ  $f$  ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal frequency dependent capacitor) ซึ่งเรียก  $C$  ชนิดนี้ว่าอีลีเมนต์เฟสคงตัวพฤติกรรมตอบสนองต่อ  $f$  ไม่อุดมคตินี้เกิดจากเนื้อสารที่ไม่สม่ำเสมอ เช่น เกรนและขอบของเกรน เป็นต้น จุดศูนย์กลางของครึ่งวงกลมที่ถูกกดให้อยู่ต่ำกว่าแกน  $Z'$  (ดังรูปที่ 2.20(b)) จะมีการแจกแจงบริเวณค่าเฉลี่ย  $\tau_{\max} = \omega_{\max}^{-1}$  ซึ่ง  $Z$  ของ CPE ตัวจะแสดงในสมการ (2.40) ดังนี้คือ

$$Z(CPE) = \frac{1}{P(j\omega)^n} \quad (2.40)$$

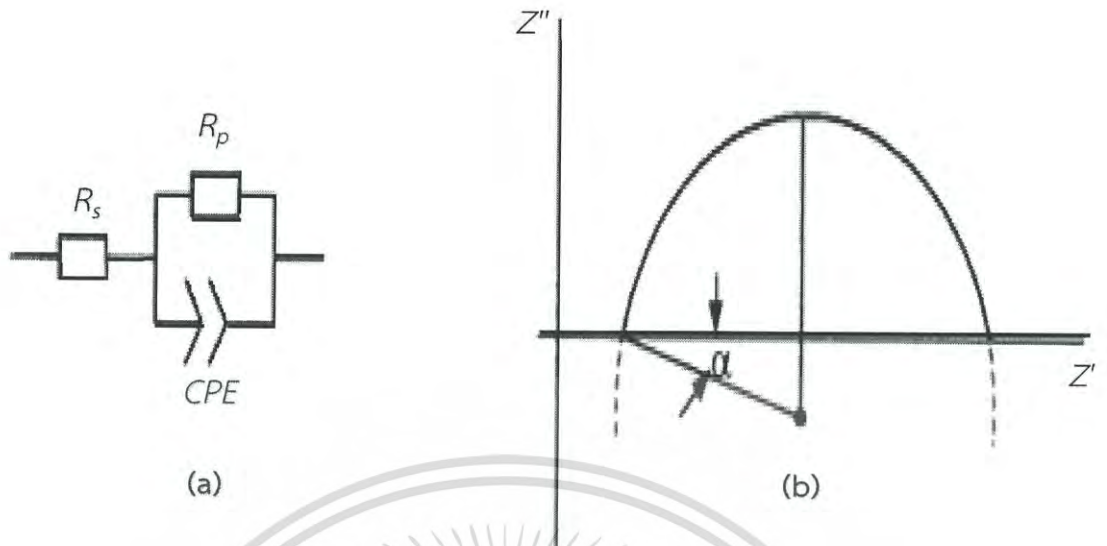
อีลีเมนต์เฟสคงตัวไม่สามารถที่จะแสดงอยู่ในรูปของ  $R$ ,  $C$  หรือ  $L$  ตัวใดตัวหนึ่งได้อย่างเด่นชัดซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า  $n$  และ  $P$  ดังนั่นคือ

$$P = C^n (R_s^{-1} + R_p^{-1})^{1-n} \quad (2.41)$$

ถ้า  $n = 1$  แล้ว  $Z(CPE)$  จะประพฤติเป็นตัวเก็บประจุในอุดมคติ แต่ถ้า  $n = 0$  แล้ว  $Z(CPE)$  จะเท่ากับ  $R_s^{-1} + R_p^{-1}$  ซึ่งถ้า  $n$  มีค่าแตกต่างไปจาก 1 มากๆ แสดงว่า  $C$  มีพฤติกรรมเบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติมาก ส่วนมุมกด ( $\alpha$ ) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\alpha = \frac{\pi}{2}(1-n) \quad (2.42)$$

โดยที่  $\alpha$  มีหน่วยเป็นเรเดียน



รูปที่ 2.21 (a) แสดงแบบจำลอง  $CPE$  และ (b) กราฟไนควิสต์ของ  $CPE$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการ ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวกับการผลิตโฟโตไดโอด การวัดลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าและการประมาณค่าพารามิเตอร์รอยต่อของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นโฟโตไดโอด ประกอบด้วยฟิล์มบาง  $\text{NC-FeSi}_2$  ที่ถูกสร้างโดย ผศ.ดร.ณัฐพร และกลุ่มวิจัย ในงานนี้ทำการวัดลักษณะเฉพาะ  $I-V$ ,  $Z'-f$  และ  $Z''-f$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\text{NC-FeSi}_2$  ชนิด  $n$  และ  $\text{Si}$  ชนิด  $p$  กับเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta\text{-FeSi}_2$  ชนิด  $n$  และ  $\text{Si}$  ชนิด  $p$

#### 3.1 การเตรียมสารตัวอย่าง Si

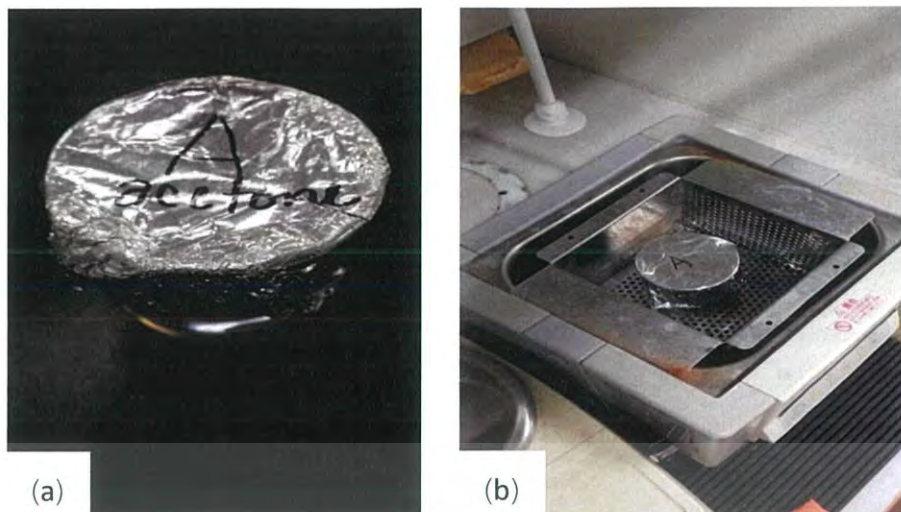
ทำการตัดสารตัวอย่าง  $\text{Si}$  (111) เวเฟอร์ชนิด  $p$  ที่มีความหนา 260 ไมโครเมตร โดยที่ตัดหัวเพชรให้มีขนาด  $3 \times 3$  เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการตัด  $\text{Si}$  (111) เวเฟอร์ชนิด  $p$  โดยใช้ที่ตัดหัวเพชร

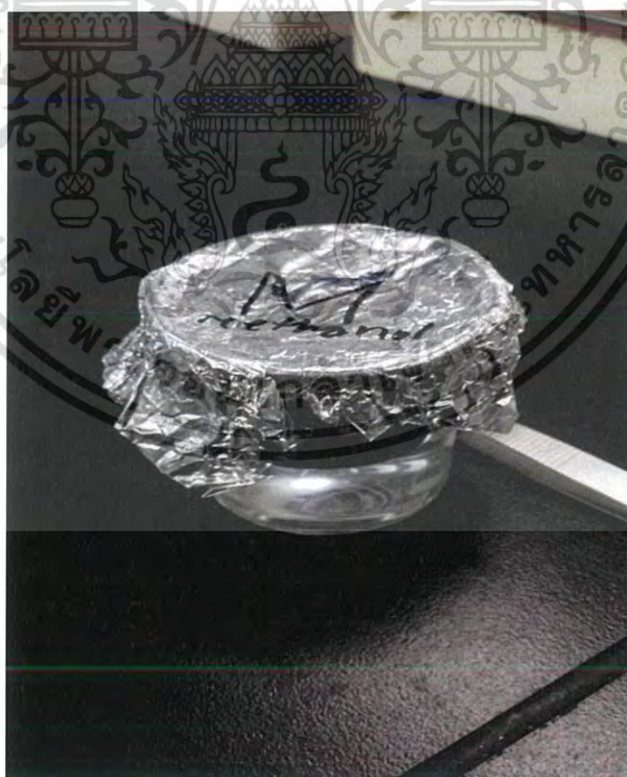
ล้าง  $\text{Si}$  โดยนำไปใส่ในบีกเกอร์ที่มีอะซิโตนเพื่อล้างฝุ่น ลายนิ้วมือและความมันแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 (a) แล้วนำไปใส่เครื่องอัลตราโซนิกที่มีน้ำใสอยู่เพื่อจ่ายคลื่นอัลตราโซนิกทำให้เกิดการสั่นของน้ำในเครื่อง มีผลให้อะซิโตนล้าง  $\text{Si}$  ได้ทั่วถึง โดยสิ้นเป็นเวลา 5 นาที แสดงดังรูปที่ 3.2 (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 (a) ปีกเกอร์ที่มี Si (111) ใส่อยู่ในอะซิโตน (b) ใส่ปีกเกอร์ที่มี Si (111) อยู่ภายในเพื่อทำความสะอาดด้วยการสั่นในเครื่องอัลตราโซนิก

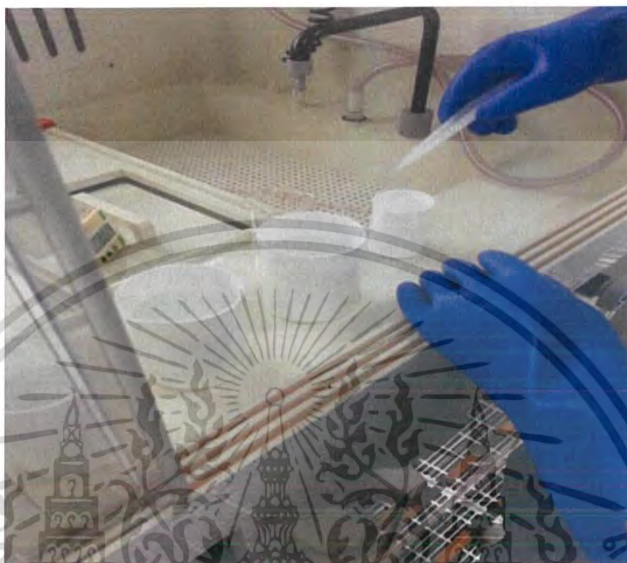
หลังจากล้างด้วยอะซิโตนแล้วจากนั้นนำ Si มาใส่ในปีกเกอร์ที่มีเมทานอลดังรูปที่ 3.3 เพื่อล้างอะซิโตนออกแล้วนำมาใส่ที่เครื่องอัลตราโซนิกที่มีน้ำใส่อยู่เพื่อจ่ายคลื่นอัลตราโซนิกทำให้เกิดการสั่นของน้ำในเครื่องให้เมทานอลล้างได้ทั่วถึงเป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 3.3 ปีกเกอร์ที่มี Si (111) ใส่อยู่ในเมทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากล้างด้วยเมทานอลแล้วนำ Si แกว่งในบีกเกอร์ที่มีกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เพื่อล้างชั้นของออกไซด์ออกเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำ Si ไปแกว่งในบีกเกอร์ที่มีน้ำปอดประจุเป็นเวลา 3 นาที ทำสองรอบแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 และนำ Si ไปใส่บีกเกอร์ที่มีน้ำปอดประจุและนำไปใส่เครื่องอัลตราโซนิกที่มีน้ำใสอยู่เพื่อจ่ายคลื่นอัลตราโซนิกทำให้เกิดการสั่นของน้ำในเครื่องทำให้น้ำปอดประจุล้างได้ทั่วถึงเป็นเวลา 5 นาที เหมือนเดิม



รูปที่ 3.4 แกว่ง Si ในกรด HF และน้ำปอดประจุ

จากรูปที่ 3.5 เมื่อล้างด้วยน้ำปอดประจุแล้วนำมาเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99% เพื่อให้ชิ้นงานแห้งและก๊าซไนโตรเจนจะไม่ทำปฏิกิริยากับชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 เป่า Si ด้วยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 %

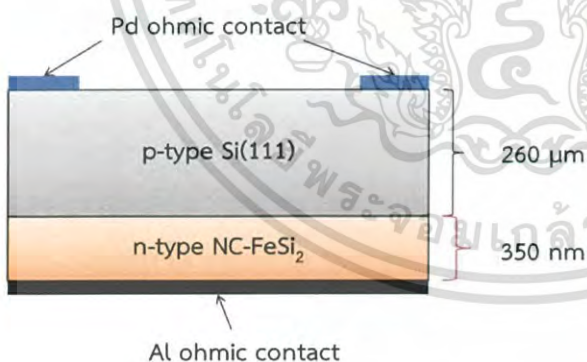
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การเคลือบฟิล์มและการทำขั้วอิเล็กทรอนิกส์

การเคลือบฟิล์มบาง  $\text{FeSi}_2$  ด้วยวิธี FTDCS ที่ใช้  $\text{FeSi}_2$  เป็นเป้า (4N) ด้วยอัตราส่วนอะตอม 1:2 NC- $\text{FeSi}_2$  เคลือบบนฐานรอง Si(111) ชนิด  $p$  ที่อุณหภูมิห้องซึ่งแสดงเงื่อนไขในการเคลือบดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการสร้าง  $p$ - $n$  เซลล์เทอร์โมโรจันซ์ชั้นโฟโตไดโอด

ความดันพื้นฐาน	$1 \times 10^{-5}$ Pa
ความดันที่ใช้ในการสเปคเตอร์	$1.33 \times 10^{-1}$ Pa
อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน	15 sccm
อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน	10 sccm
แรงดันไฟฟ้า	950 V
กระแสที่ได้จากการสเปคเตอร์	1.2 mA
ความหนาของชั้นฟิล์ม NC- $\text{FeSi}_2$	350 nm
อุณหภูมิของฐานรอง	อุณหภูมิห้อง



(a)



(b)

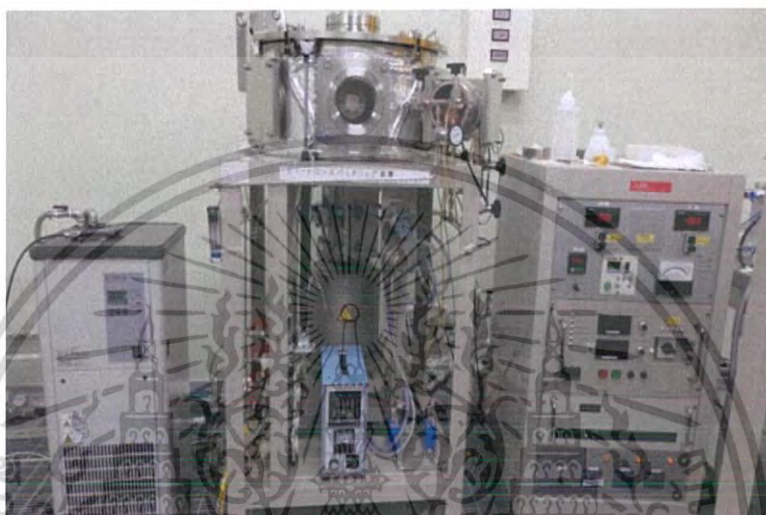
รูปที่ 3.6 (a) แผนภาพของ  $p$ - $n$  เซลล์เทอร์โมโรจันซ์ชั้นโฟโตไดโอด และ  
(b) ภาพตัวอย่างของ  $p$ - $n$  เซลล์เทอร์โมโรจันซ์ชั้นโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 3.2.1 การใช้เครื่อง FTDCS

ในการเคลือบฟิล์มบาง NC-FeSi<sub>2</sub> แสดงเครื่อง FTDCS ดังรูปที่ 3.7 โดยที่ตรงกลางเป็น ภาชนะสุญญากาศสำหรับใส่ชิ้นสารตัวอย่าง ส่วนทางขวาเป็นตัวสำหรับควบคุมแรงดันภายในภาชนะ ด้วยวิธีนี้มีปั๊มกลโรตารีทำหน้าที่ลดแรงดันอากาศเพื่อให้ในภาชนะเป็นสุญญากาศ โดยเริ่มแรกเปิด วาล์วเพื่อเพิ่มความดันอากาศเพื่อให้เปิดฝาได้แสดงดังรูปที่ 3.8 จากนั้นนำส่วนที่เป็นแท่นวางฐานรอง ออกมาล็อกตัวฐานรองไว้แต่ตัวล็อกจะบังทำให้ฟิล์มไม่ถูกเคลือบบริเวณที่ล็อกไว้



รูปที่ 3.7 เครื่อง FTDCS ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง NC-FeSi<sub>2</sub>



รูปที่ 3.8 แสดงการหมุนวาล์วปรับแรงดันภายในภาชนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.9 แสดงการใส่ชิ้นงานในแท่นวางโดยมีตัวล็อกคอยล็อกไม่ให้ชิ้นงานหลุดออกมา แต่ตัวล็อกจะบังทำให้ฟิล์มไม่ถูกเคลือบบริเวณที่ล็อกไว้



รูปที่ 3.9 แสดงการใส่ชิ้นงานบนแท่นวาง

เมื่อใส่ชิ้นงาน Si บนแท่นวางเรียบร้อยแล้ว คอยดันฝาปิดไว้แล้วลดแรงดันฝาปิดจะไม่หลุดออก แล้วทำการหมุนแท่นวางไปยังภาชนะที่มีเป้าที่ต้องการเคลือบไว้ โดยในแต่ละภาชนะจะมีเป้าที่ต่างกันอยู่จะมีอยู่สามเป้าด้วยกัน มีดังนี้  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ,  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{Si}$  โดยเราจะเลือกใช้  $\text{FeSi}_2$  ในการทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 3.10 และ รูปที่ 3.11



เอกสารนี้รูปที่ 3.10 แสดงการปิดฝาภาชนะไว้ก่อนลดความดันอากาศเพื่อต้องการทำให้ภายในเป็นสุญญากาศถ้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 เครื่อง FTDCS ที่มีเป้าหลายๆ ชนิดติดตั้งอยู่รอบภาชนะสุญญากาศ

### 3.2.2 การใช้เครื่องสเปตเตอร์ริงเพื่อทำขั้วอิเล็กโทรด

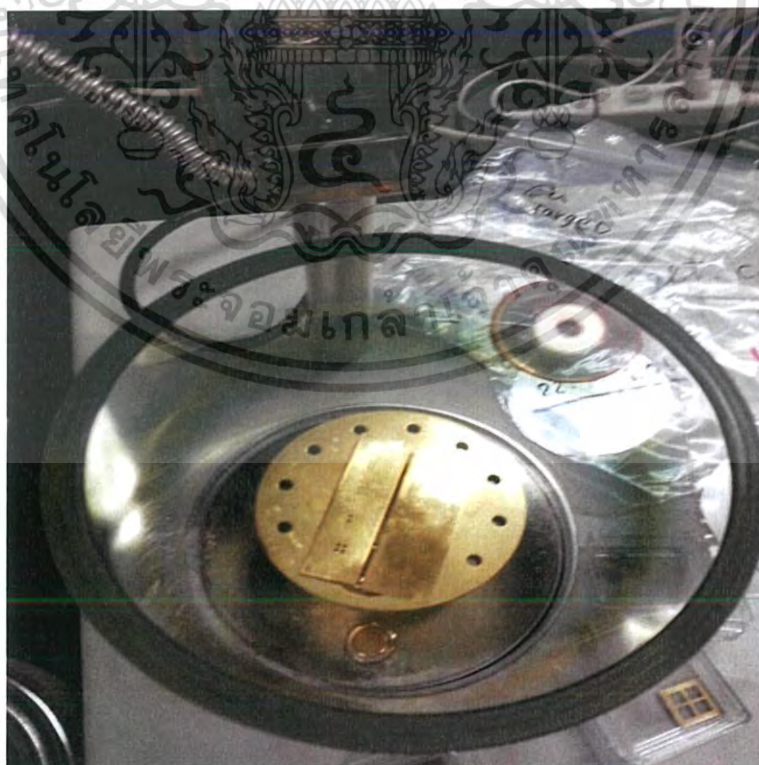
การใช้เครื่องสเปตเตอร์ริงใช้เพื่อทำขั้วอิเล็กโทรดบนฟิล์มบางหรือบน Si โดยจะมีไอออนชนกับผิวเป้าทำให้อะตอมของเป้าหลุดออกมาเคลือบกับชิ้นสารตัวอย่างซึ่งประกอบไปด้วยบีมกลโรตาที่ทำหน้าที่ลดความดันอากาศภายในภาชนะให้เป็นสุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศเป็นที่ใส่ชิ้นงานโดยภายในภาชนะมีความเป็นสุญญากาศสูง แสดงเครื่องสเปตเตอร์ริงที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



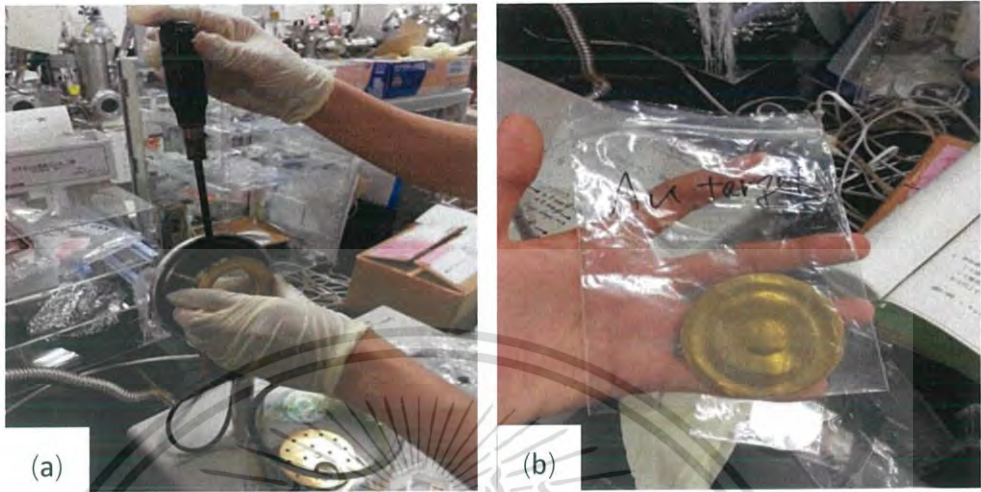
รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องสเปตเตอร์ที่ใช้ทำซั้วอิเล็กทรอนิกส์

จากรูปที่ 3.13 ก่อนการสเปตเตอร์จำเป็นต้องมีแผ่นหน้ากาก (mask) ที่มีลักษณะเป็นจุด (dot) วางบนชิ้นงานเพื่อให้หลังจากผิวเข้าหลอดออกมาเคลือบแล้วมีลักษณะเป็นจุด



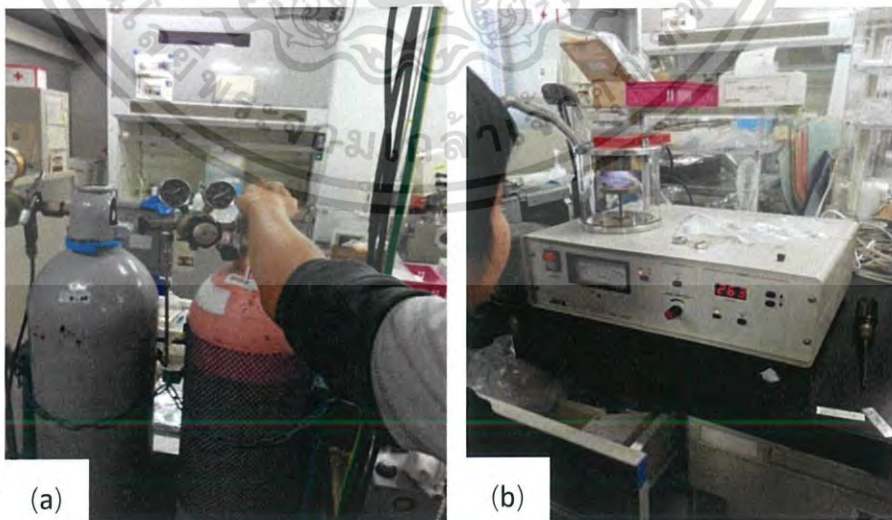
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.13 แสดงการวางแผ่นหน้ากากลงบนชิ้นงานเพื่อให้เคลือบเป็นลักษณะจุด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือกแผ่นเป่าเราจะใช้แผ่นเป่าโลหะที่เป็นพาราเดียม (Pd) เคลือบลงบนด้าน Si โดยเคลือบเป็นลักษณะจุดและด้าน  $\text{FeSi}_2$  จะเคลือบด้วยเงิน (Ag) แสดงดังรูปที่ 3.14 เมื่อปิดฝาแล้วเปิดโรตารีปั๊มเพื่อให้ความดันอากาศในภาชนะลดลงต่ำกว่า 8 ปาสคาล



รูปที่ 3.14 (a) ติดตั้งแผ่นเป่าบนฝาปิด (b) ตัวอย่างแผ่นเป่า

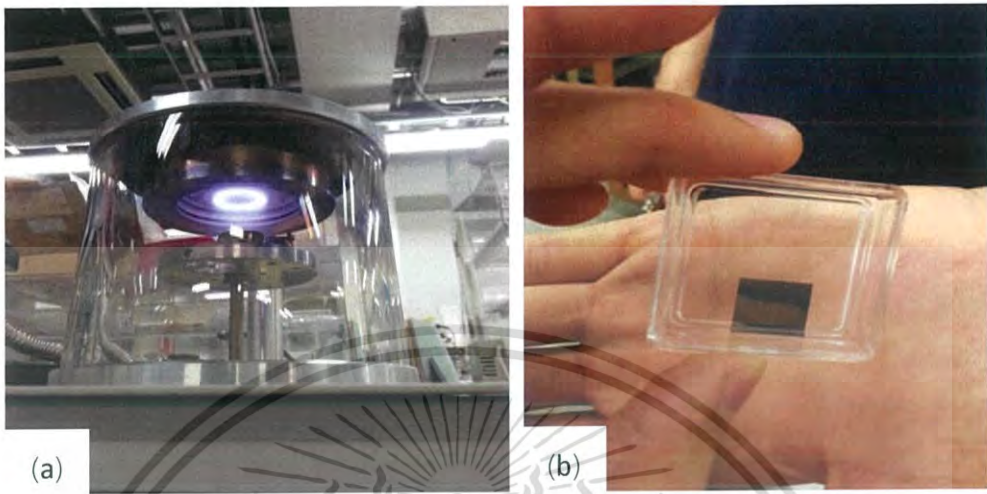
จากรูปที่ 3.15 (a) ทำการเปิดวาล์วให้แก๊สอาร์กอนไหลเข้าไปในภาชนะหมุนปั๊มควบคุมแก๊สจนความดันอากาศขึ้นเป็น 40 ปาสคาล แล้วรอ 10-20 วินาที เพื่อให้แก๊สไหลเข้ามา จากนั้นลดความดันไปที่ 10 ปาสคาล เพื่อให้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนคงที่ แล้วกดปุ่ม start จะเริ่มทำการสปัตเตอร์โดยเครื่องจะทำการสปัตเตอร์เป็นเวลา 5 นาที ขณะเครื่องทำการสปัตเตอร์เราจะสามารถมองเห็นพลาสมาเป็นแสงสีม่วงดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.15 (b)



รูปที่ 3.15 (a) แสดงการเปิดวาล์วให้แก๊สอาร์กอนไหลเข้าไปในภาชนะ (b) แสดงปั๊มสำหรับปรับความดันแก๊สอาร์กอนและจอเวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารส่วนบุคคลของโรงเรียนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

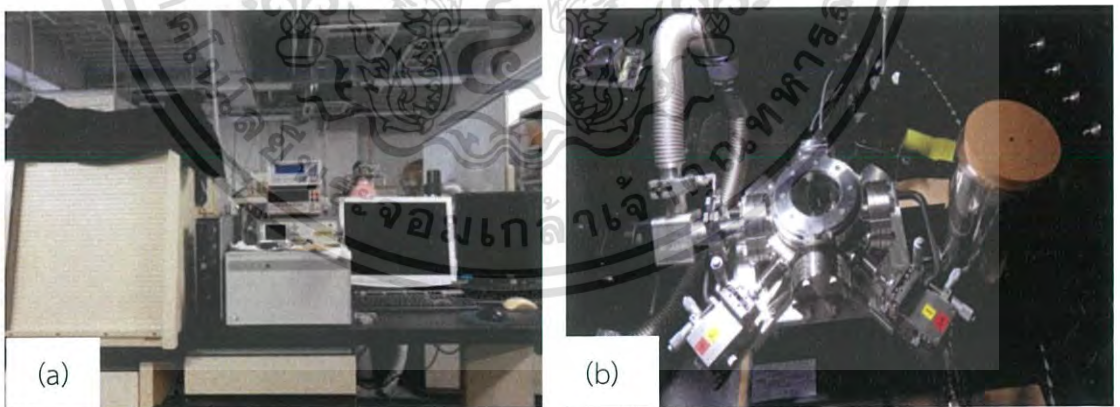
จากรูปที่ 3.15 (b) แสดงชิ้นงานที่ทำขั้วอิเล็กโทรดเรียบร้อยแล้ว โดยความหนาของอิเล็กโทรดที่ได้โดยเป้าเป็น Ag จะมีความหนาประมาณ 55-60 นาโนเมตร ในเวลา 5 นาที และความหนาของอิเล็กโทรดที่ได้โดยเป้าเป็น Pd จะมีความหนาประมาณ 30-35 นาโนเมตร ในเวลา 5 นาที



รูปที่ 3.16 (a) ภาพแสดงพลาสมาขณะทำการสปัตเตอร์ (b) ภาพตัวอย่างชิ้นงานที่ทำขั้ว

### 3.3 การวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า ( $I-V$ )

นำสารตัวอย่างใส่ในภาชนะที่สามารถทำเป็นสุญญากาศดังรูปที่ 3.17 (b) โดยวางบนแผ่นทองแดงให้โพรบ (probe) ตัวแรกสัมผัสกับขั้วด้านหน้าและโพรบตัวที่สองสัมผัสกับแผ่นทองแดง

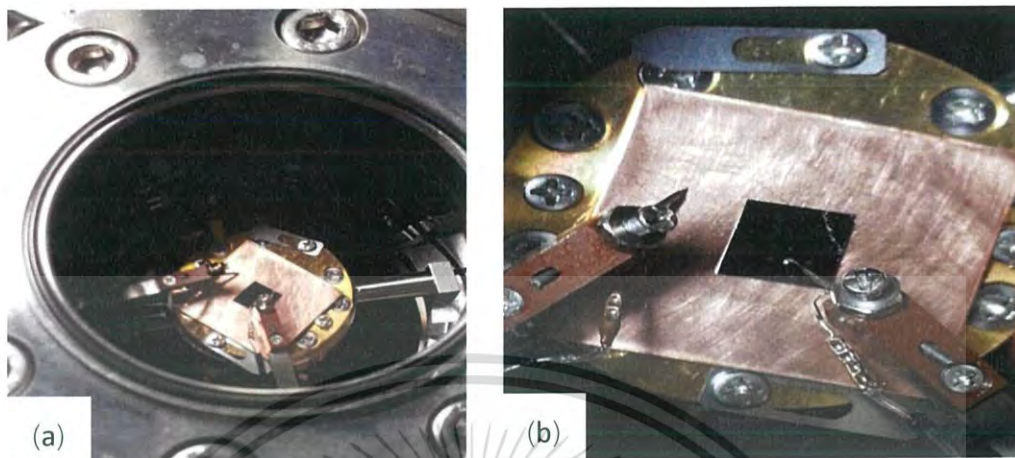


รูปที่ 3.17 (a) เครื่องวัดค่า  $I-V$  และ (b) ภาชนะที่ใส่ชิ้นสารตัวอย่าง

จากรูปที่ 3.18 (a) และรูปที่ 3.18 (b) เมื่อใส่สารตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว ให้นำโพรบด้านที่เป็นบวกสัมผัสที่อิเล็กโทรดโดยการทำให้โพรบสัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรดนั้นต้องใช้สมาธิอย่างมากเนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดมีขนาดที่เล็ก และตัวโพรบนั้นก็เล็กและเปราะบางมากอาจจะทำให้เกิดความเสียหายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าออกแรงหมุนเลื่อนโพรบแรงเกินไป เมื่อมันใจแล้วปิดฝาครอบเพื่อไม่ให้แสงเข้าและเพื่อป้องกันไม่ให้ค่า  $Z$  มีค่าผิดพลาดได้



รูปที่ 3.18 (a) ภาพแสดงภาชนะที่ใช้ชิ้นงาน (b) ภาพแสดงโพรบที่ใช้วัดค่า  $Z$

### 3.3.1 การวัดลักษณะเฉพาะ $I$ - $V$

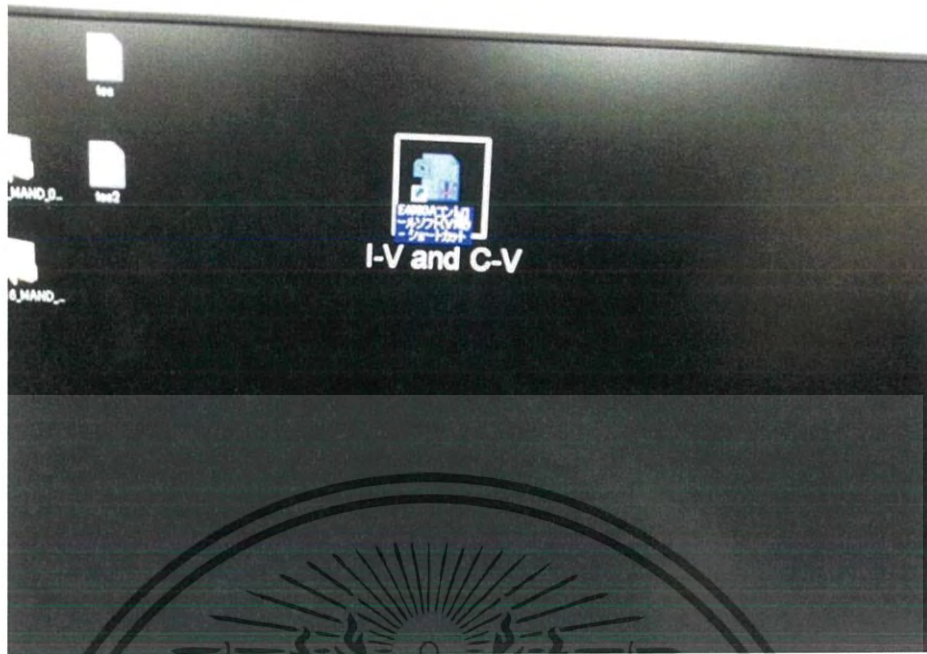
ในการวัดค่า  $I$  และ  $V$  โดยใช้เครื่อง Keithley 2400 ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ใช้ทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์สำหรับวัดค่า  $I$ - $V$  and  $C$ - $V$  ชื่อว่า E4980A Control Software



รูปที่ 3.19 Keithley 2400 สำหรับการวัดค่า  $I$ - $V$

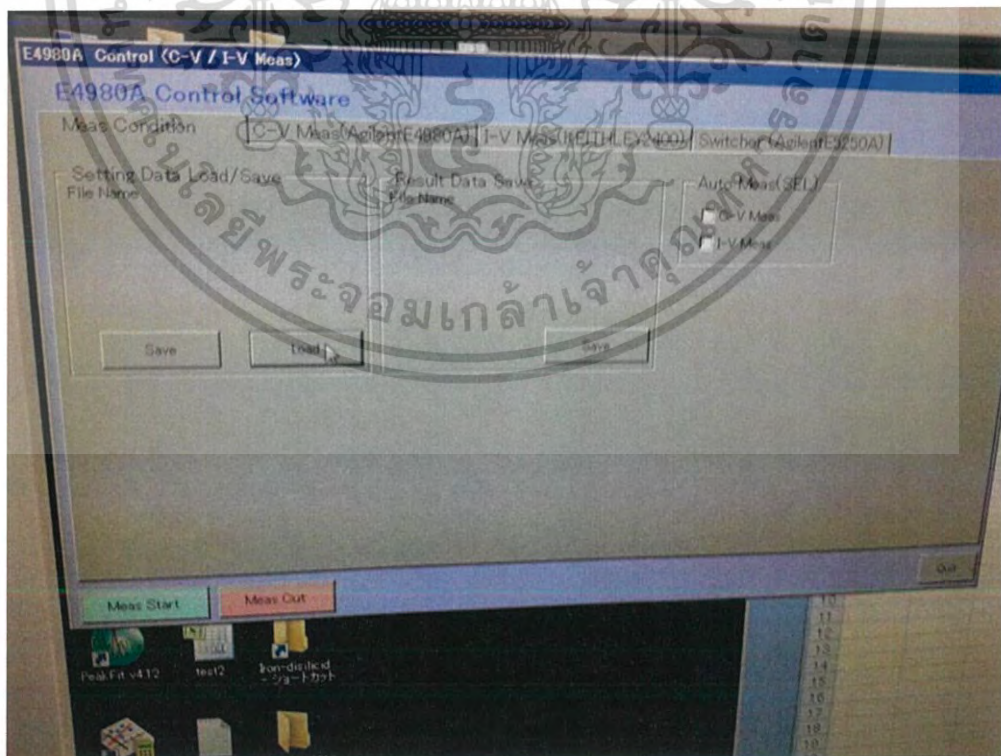
โดยเริ่มแรกทำการเปิดเครื่อง uninterruptible power supply (UPS) หรือเครื่องสำรองไฟ หลังจากนั้นเปิดเครื่อง Keithley 2400 สำหรับการวัดค่า  $I$ - $V$  แล้วตั้งค่าโปรแกรมสำหรับการวัดค่าโดยเริ่มจากเข้าโปรแกรม E4980A Control Software ดังรูปที่ 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



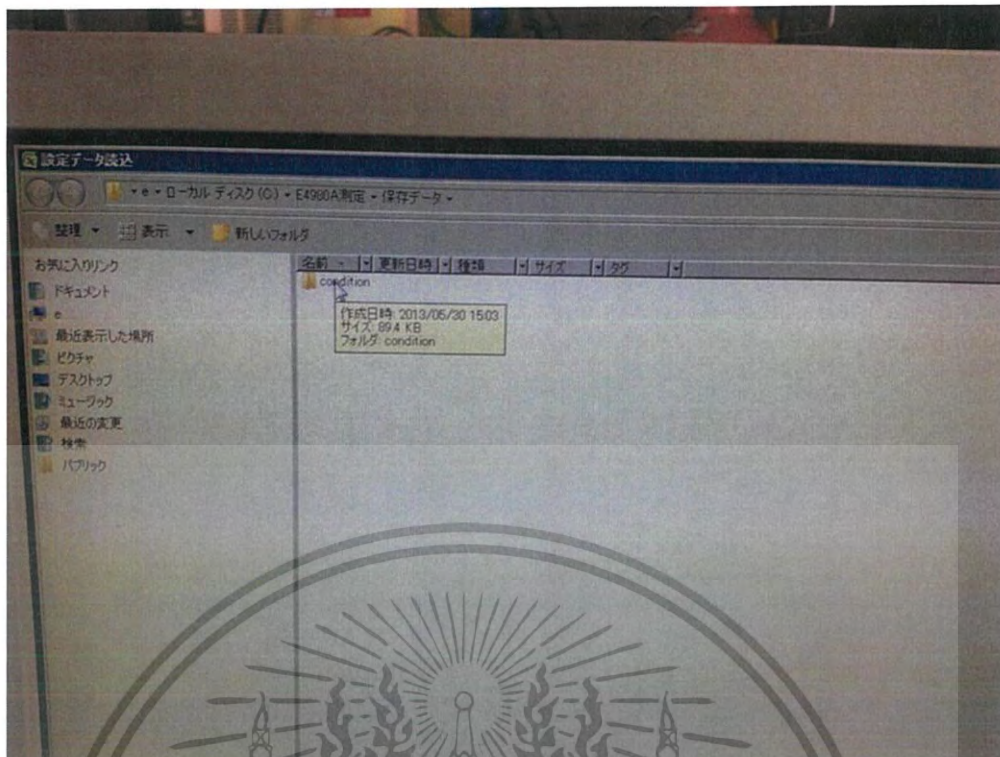
รูปที่ 3.20 โปรแกรม I-V and C-V สำหรับใช้คู่กับ Keithley 2400 เพื่อวัดค่า I-V

จากรูปที่ 3.21 เมื่อเข้าโปรแกรมวัดค่า I-V แล้วไปที่คำสั่ง Load > Condition > Test แล้วเลือกโหมดวัด C-V และ I-V แล้วเลือกวัดเฉพาะค่า I-V ดังรูปที่ 3.22 และ 3.23

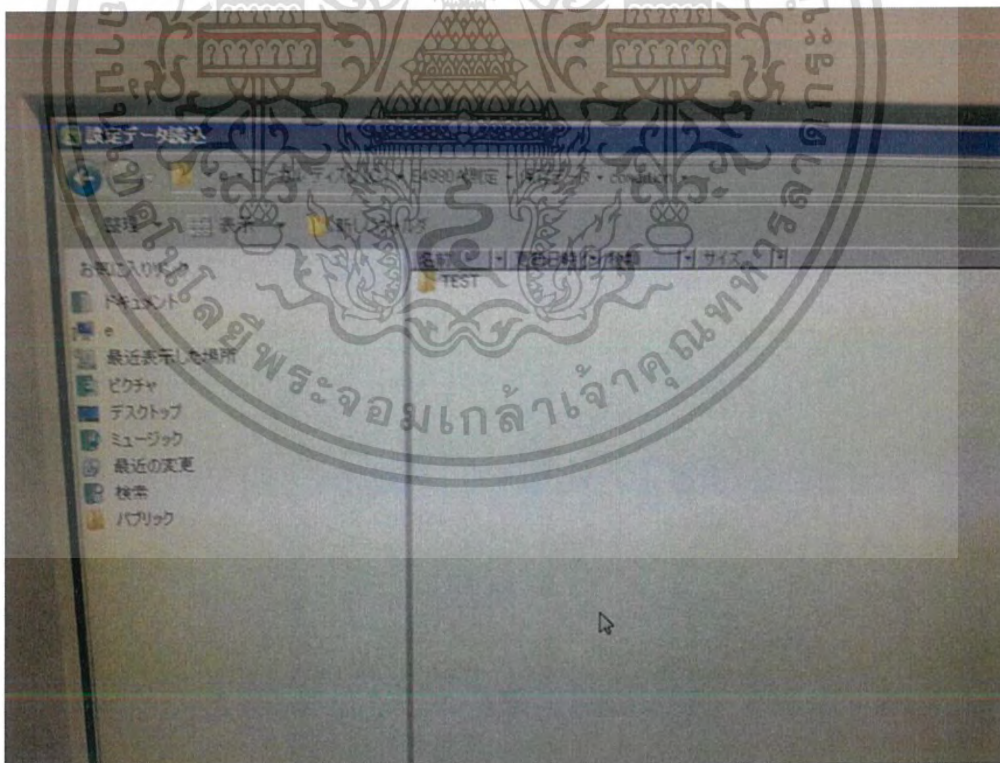


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.21 รูปแสดงโปรแกรม E4980A Control Software ที่ใช้วัดค่า I-V  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





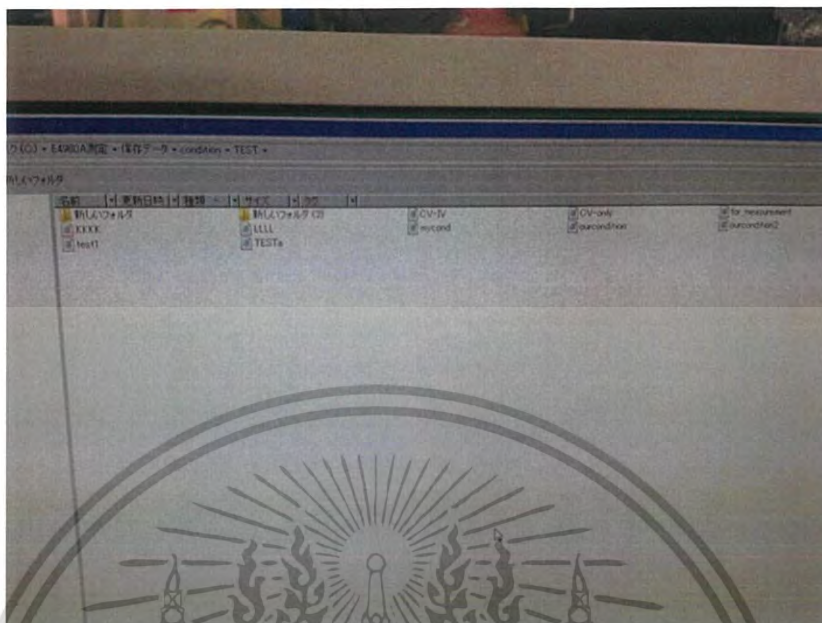
รูปที่ 3.22 เลือกโฟลเดอร์ Condition



รูปที่ 3.23 แสดงการเลือกโฟลเดอร์ TEST เพื่อเลือกโหมดในการวัดค่า

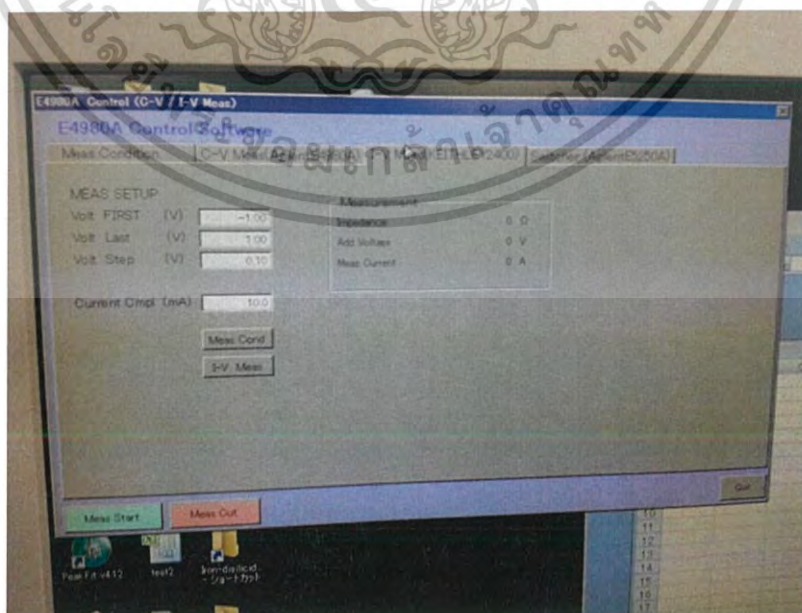
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเลือกโหมด C-V และ I-V ดังรูปที่ 3.24 เพื่อให้โปรแกรมทำการวัดค่าที่ผู้ทดลองต้องการ



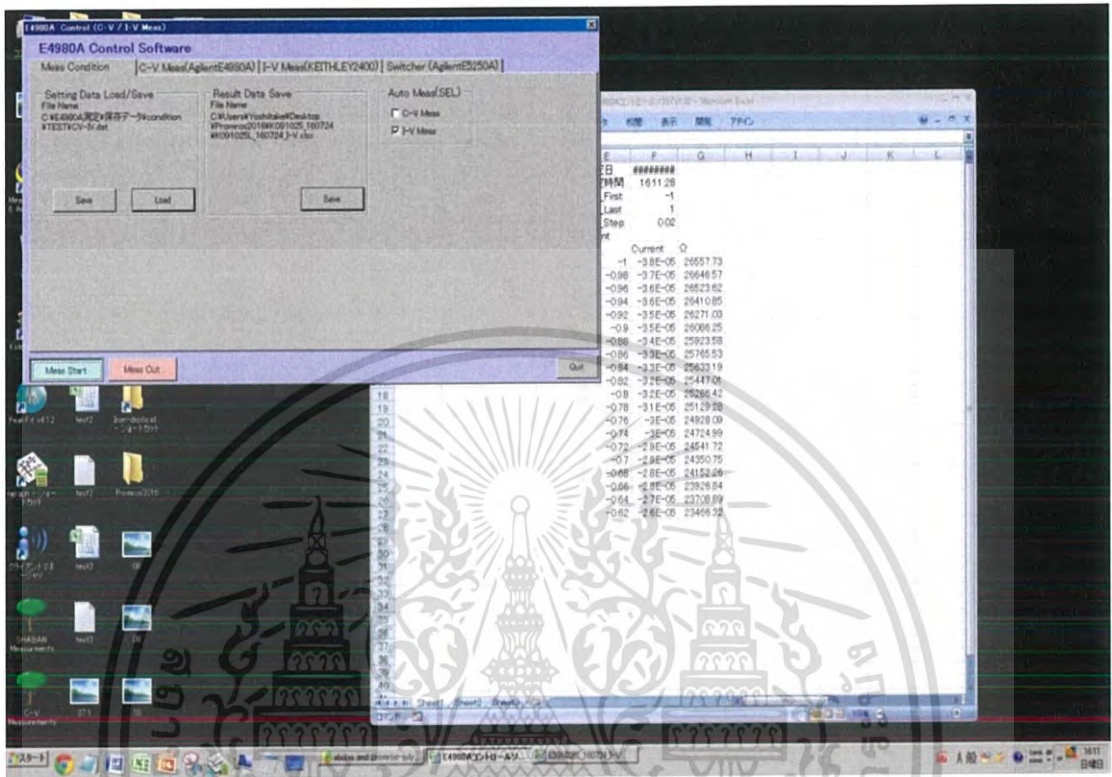
รูปที่ 3.24 แสดงโหมดในการวัดค่าโดยจะเลือกโหมดวัด C-V และ I-V

จากรูปที่ 3.25 กดที่แถบ I-V Mesa เพื่อเลือกขอบเขตของค่า V ที่วัด โดยเลือกที่ Volt FIRST เป็น -3.0 โวลต์ และ Volt Last 3.0 โวลต์ และค่าความละเอียดของการวัดใส่ที่ Volt Step อยู่ที่ 0.01 (กรณีใช้ความละเอียดสูงจะทำให้การวัดค่าล่าช้า) จากนั้นทำการเลือกตำแหน่งที่จะบันทึกไฟล์ไว้ หลังจากนั้นกด Mesa Start เพื่อเริ่มการวัดค่า I-V

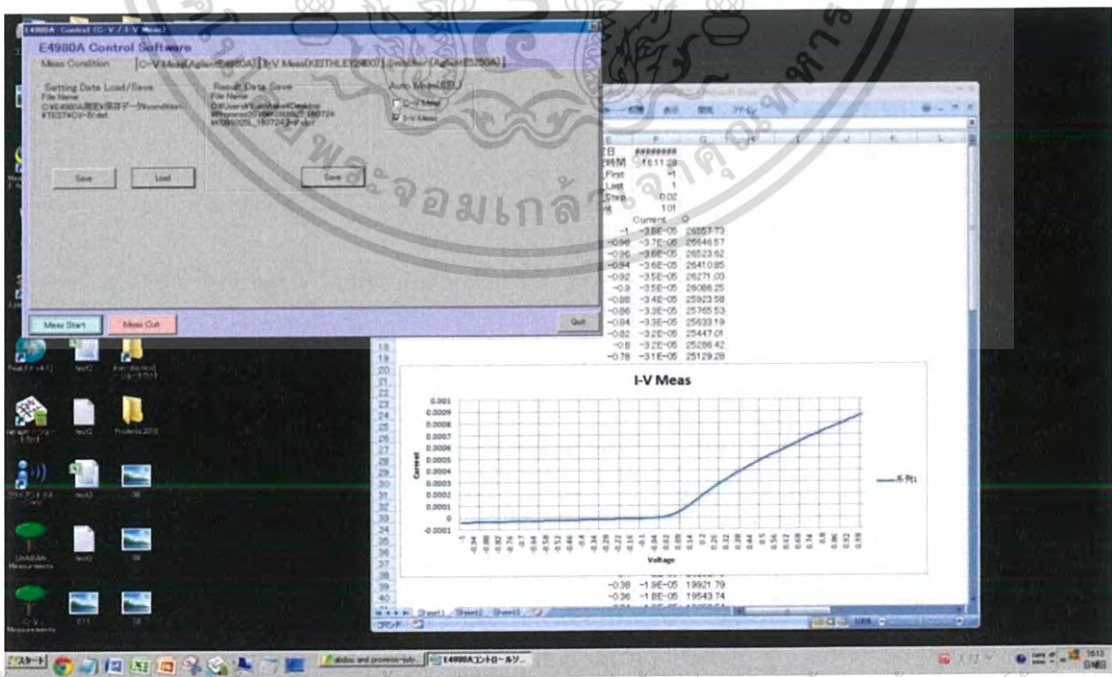


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.25 แสดงการเลือกขอบเขตของช่วง V ที่ใช้วัดและกำหนดความละเอียด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบี่ยงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากเริ่มวัดค่าแล้ว ผลลัพธ์จะแสดงออกมาในรูปตารางของโปรแกรม Excel ดังรูปที่ 3.26 หรือสามารถดูได้จากหน้าจอของเครื่อง Keithley 2400 ผลลัพธ์ที่วัดได้จะแสดงขึ้นมาทีละ V และเมื่อวัดค่าเสร็จเรียบร้อยแล้วจะแสดงเป็นรูปกราฟ I-V ออกมา ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.26 แสดงค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้ในรูปของตาราง Excel



รูปที่ 3.27 แสดงรูปกราฟ I-V เมื่อทำการวัดค่าแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

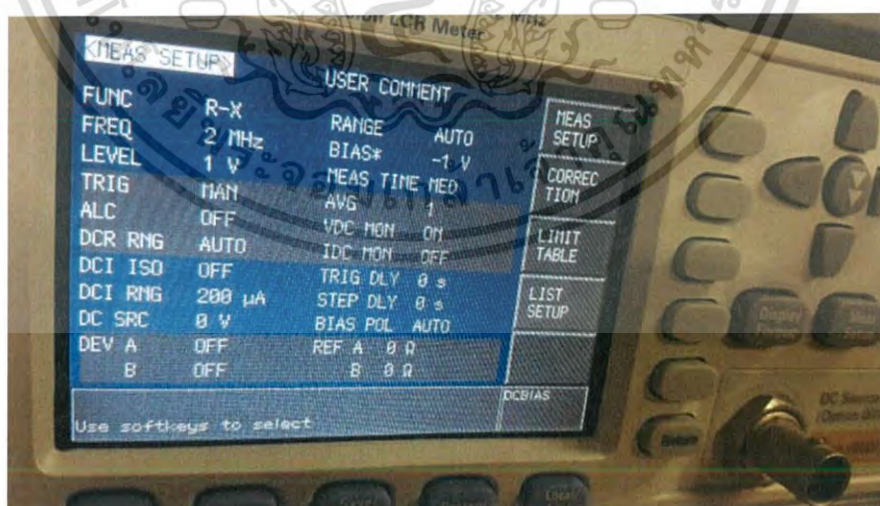
### 3.3.2 การวัดลักษณะเฉพาะ $Z'-f$ , $Z''-f$

จากรูปที่ 3.28 ค่า  $C-V$  จะถูกวัดโดย Agilent E4980A และใช้ร่วมกับ E4980A Control Software Agilent E4980A สามารถวัดค่า  $Z'-f$  และ  $Z''-f$  ในช่วง  $f$  ตั้งแต่ 1 kHz ถึง 2 MHz



รูปที่ 3.28 Agilent E4980A สำหรับการวัดคุณสมบัติของ  $Z'-f$  และ  $Z''-f$

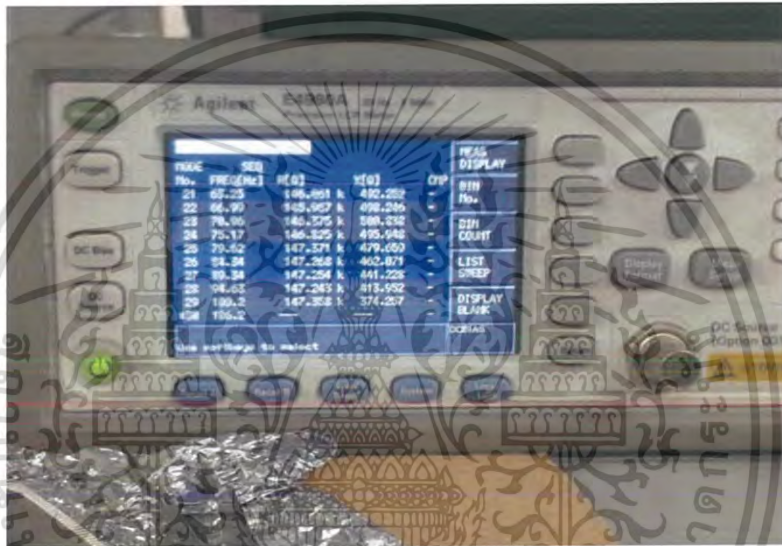
หลังจากได้กราฟ  $I-V$  แล้วกด local/log > system > Meas SETUP ที่เครื่อง Agilent E4980A แล้วทำการตั้งค่าโดยที่ตัวแรกนั้นคือ FUNC ต้องเปลี่ยนเป็น R-X, Bias เริ่มตั้งแต่  $-3.0$  โวลต์ ถึง  $3.0$  โวลต์ แล้วแต่ชนิดของสารที่จะวัดได้, Trig เปลี่ยนเป็น MAN, IDC MON เปลี่ยนเป็น OFF และ Bias POL เปลี่ยนเป็น AUTO แสดงการตั้งค่าได้จากรูป 3.29



รูปที่ 3.29 ภาพแสดงเมื่อตั้งค่าเครื่อง Agilent E4980A เรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.29 เมื่อทำการตั้งค่าข้อมูลเรียบร้อยแล้วให้ไปกดที่แถบเมนูที่มีชื่อว่า LIST SETUP จะขึ้นหน้าต่างมาให้แล้วทำการใส่  $f$  โดยที่  $f$  ตัวแรกให้ใส่ที่ 20 kHz แล้วไปที่ค่าสุดท้ายคือค่าที่ 200 แล้วให้ใส่  $f$  เป็น 2 MHz แล้วทำการกดปุ่ม Fill Log แล้วไปกดปุ่ม DC Bias ให้ไฟสีแดงทางด้านขวา ขึ้นและไปกดที่ปุ่ม Save/Recall และไปกดที่ปุ่ม Save/Data และกด Log เพื่อให้ค่าที่ตั้งค่าไว้ไม่เปลี่ยนแปลง สุดท้ายให้กดปุ่มที่มีชื่อว่า Trigger เพื่อให้ Run หาค่า  $Z'$  และ  $Z''$  ที่ทำการเปรียบเทียบกับ  $V$  ออกมาตามรูปที่ 3.30 เมื่อเครื่องวัดค่าเสร็จแล้วให้ทำการเสียบแฟลชไดรฟ์แล้วทำการบันทึกข้อมูลโดยกดไปที่ save/recall > save data > save & stop เมื่อมีตัวอักษรขึ้นทางด้านล่างว่า E498\*001 แล้วก็คือการที่ไฟล์นั้นที่ Save ไว้ในแฟลชไดรฟ์เป็นที่เรียบร้อย

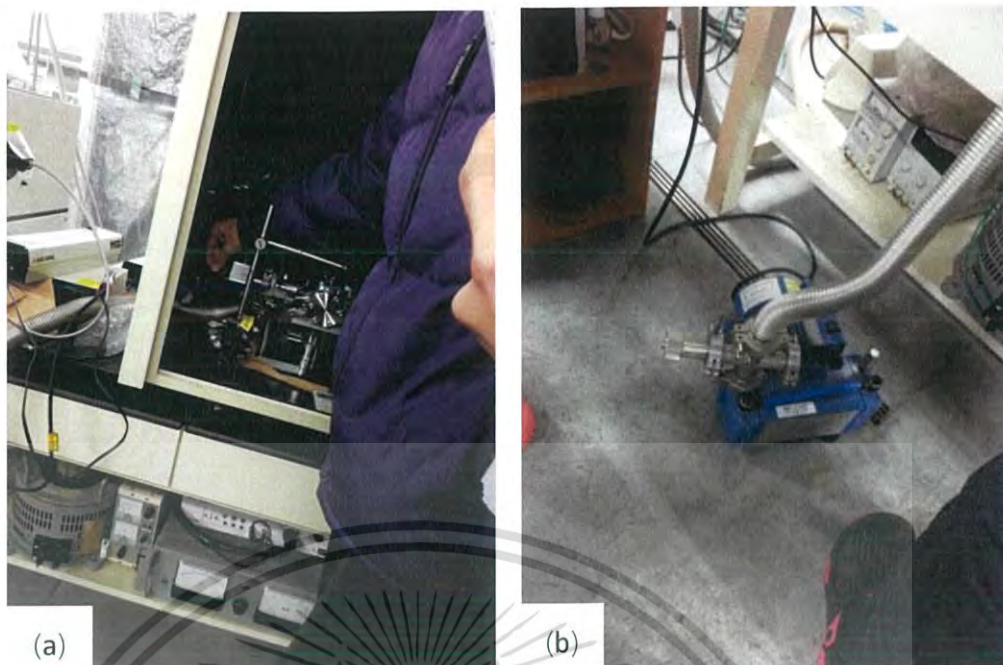


รูปที่ 3.30 ภาพแสดงขณะที่เครื่องทำการวัดค่า  $Z'$  และ  $Z''$

### 3.3.3 การวัดลักษณะเฉพาะ $Z' - f, Z'' - f$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การวัดโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินี้ต้องทำให้ภาชนะที่ใส่ชิ้นสารตัวอย่างเป็นภาชนะสุญญากาศก่อน โดยจากรูปที่ 3.31 จะใช้ปั๊มกลโรตารีในการสูบอากาศออก ในขั้นตอนแรกทำการปิดวาล์วแยกที่อยู่ข้างๆ ภาชนะเสียก่อน และจากนั้นจึงทำการเปิดปั๊มกลโรตารีสังเกตได้จากเสียงปั๊มที่ตั้งแสดงว่าปั๊มทำงานแล้ว แล้วค่อยๆ เปิดวาล์วที่ตัวปั๊มเพื่อให้สูบอากาศออกโดยต้องเปิดทีละน้อยเพื่อป้องกันไม่ไห้แรงดูดของปั๊มกระทบกับชิ้นสารตัวอย่าง

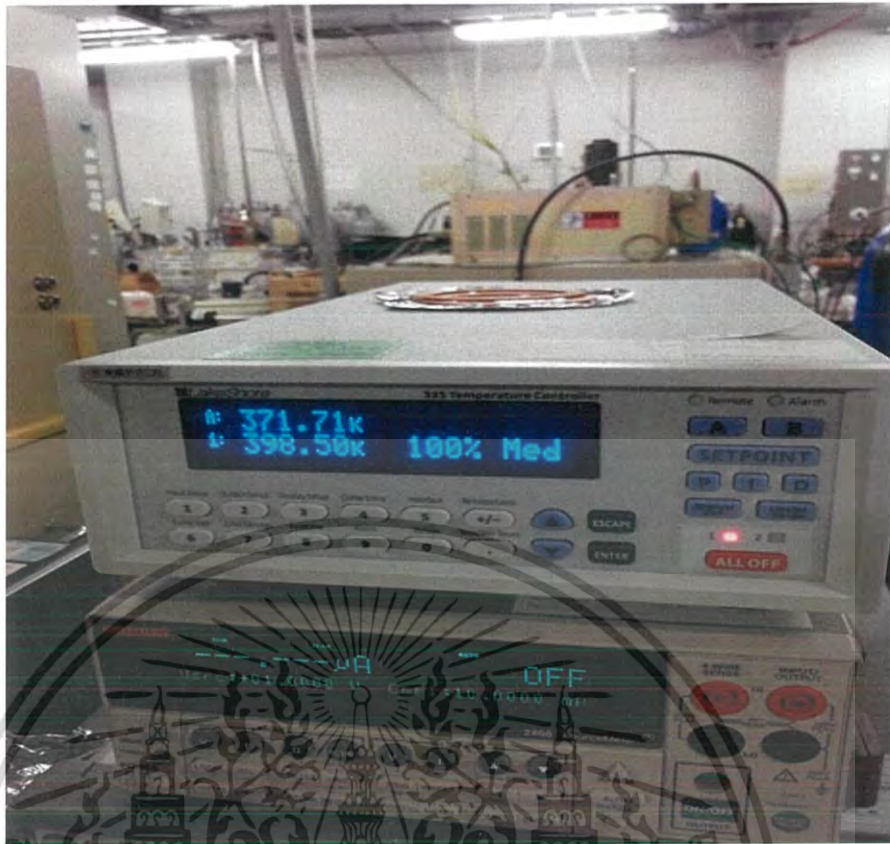
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 (a) และ (b) แสดงการหมุนวาล์วโรตารีปั๊มเพื่อลดแรงดันอากาศในภาชนะ

เมื่อทำให้ภายในภาชนะเป็นสุญญากาศแล้ว ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 เคลวิน ถึง 160 เคลวิน โดยใช้เครื่อง 335 Temperature Control ดังรูปที่ 3.32 ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ควบคุม อุณหภูมิ เริ่มต้นโดยทำการวัดที่อุณหภูมิสูงก่อน ขั้นแรกตั้ง set point ไว้ที่ 300 เคลวิน โดยการกด ปุ่ม heater range > medium ซึ่งเป็นความละเอียดในการวัดระดับกลาง (ตัวเครื่องสามารถวัดได้ สามระดับคือ high, medium, low) จากนั้นกดปุ่ม enter จะทำให้อุณหภูมิในภาชนะสุญญากาศ สูงขึ้นซึ่งในช่วงนี้จะต้องใช้เวลาพอสมควรในขณะที่รออุณหภูมิให้สูงขึ้น โดยจะทำการลดอุณหภูมิ ที่ละ 10 เคลวิน ตั้งแต่ 300, 290, 280,...,160 เคลวิน ขั้นตอนในการกดปุ่มวัด Z ที่ทำการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมินั้นจะคล้ายกับการวัด Z ที่เปลี่ยนแปลง V โดยในจอแสดงผลของเครื่องจะแสดง อุณหภูมิอยู่สองค่า ที่ค่าด้านบนเป็นค่าอุณหภูมิของตัวเครื่อง ส่วนค่าด้านล่างเป็นอุณหภูมิภายใน ภาชนะ โดยควรจรรอให้อุณหภูมิของทั้งตัวเครื่องและในภาชนะมีค่าใกล้เคียงกันแล้วจึงทำการวัด แล้วกดปุ่ม Trigger ที่เครื่อง Agilent E4980A แล้วรอให้ข้อมูล Run จนเสร็จแล้ว Save File

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



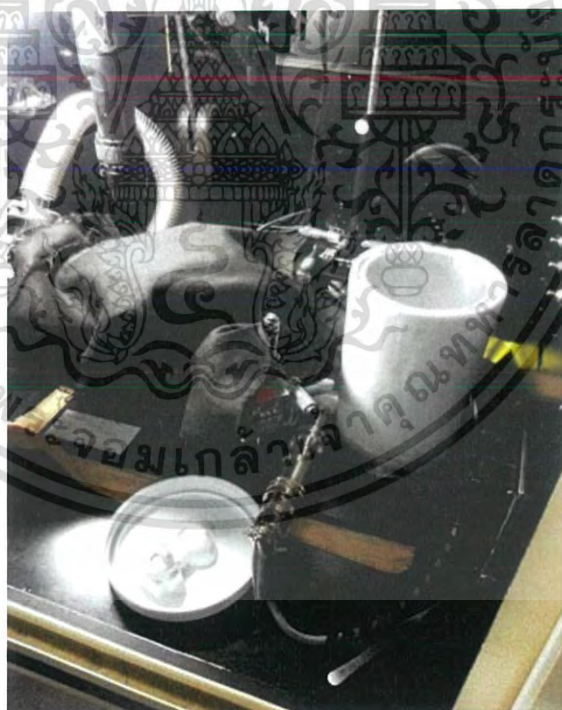
รูปที่ 3.32 เครื่อง 335 Temperature Control ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ

จากรูปที่ 3.33 ในกรณีที่วัดค่าที่อุณหภูมิต่ำจะใช้ไนโตรเจนเหลวช่วยในการลดอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึงอุณหภูมิห้องคือ 300 เคลวิน ต้องใส่ไนโตรเจนเหลวลงไปในแท่งรูปทรงกระบอกข้างๆ ภาชนะสุญญากาศเพื่อลดอุณหภูมิภายในภาชนะดังรูปที่ 3.34 เนื่องจากในช่วงต่ำกว่าอุณหภูมิห้องนี้ อุณหภูมิจะลดลงยากมากจึงต้องมีไนโตรเจนใส่เข้าไปและทำการวัดค่าเมื่ออุณหภูมิลดถึงค่าที่ต้องการ ข้อควรระวังในการใส่ไนโตรเจนคือถ้าใส่มากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจนทำให้ไม่สามารถวัดค่า  $Z$  ที่ช่วงอุณหภูมิที่ต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 แสดงการเตรียมไนโตรเจนเหลวเพื่อลดอุณหภูมิในภาชนะ



รูปที่ 3.34 ภาพแสดงหลังจากใส่ไนโตรเจนเหลวในภาชนะทรงกระบอกจะมีน้ำแข็งเกาะรอบภาชนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



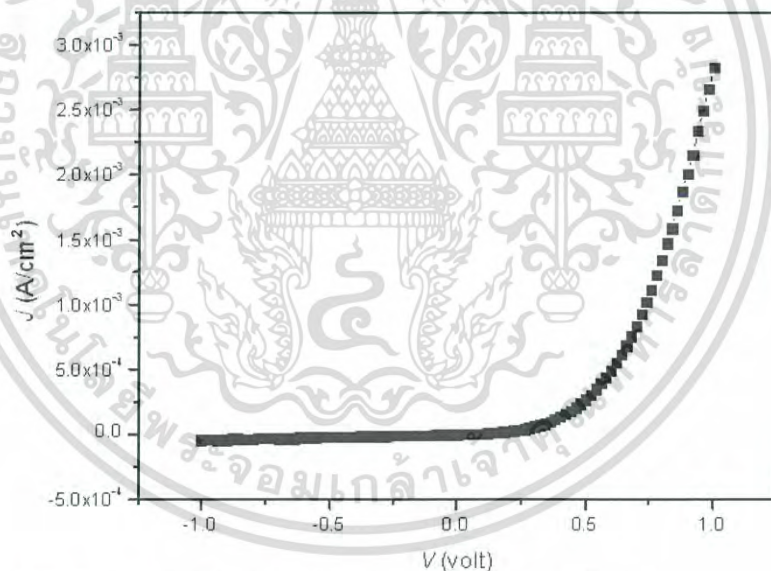
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ผลของการทดลองหาลักษณะความของ  $Z'-f$ ,  $Z''-f$  และ  $Z'-Z''$  ของเฮทเทอร์โรจังก์ชันที่สร้างขึ้นที่  $V$  ต่างกันและอุณหภูมิต่างกัน จากนั้นเปรียบเทียบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างการวัดที่ทำการเปลี่ยนแปลง  $V$  และ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากนั้นนำลักษณะความสัมพันธ์ของ  $Z'-Z''$  มาสร้างวงจรสมมูล

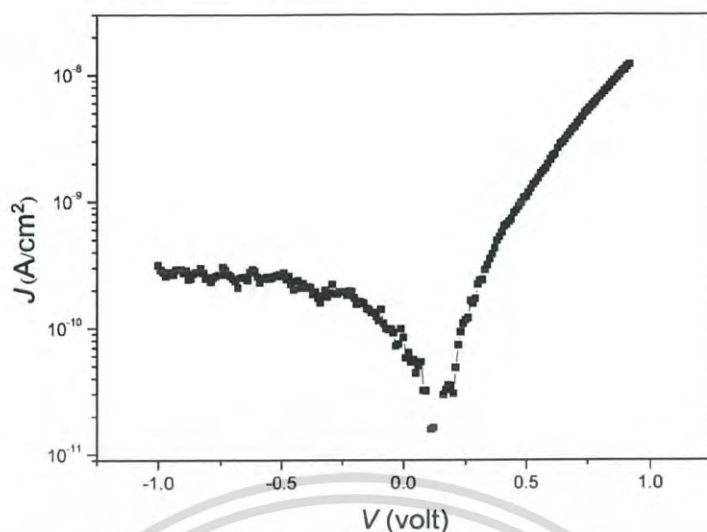
#### 4.1 การวัดค่า $Z$ ของเฮทเทอร์โรจังก์ชัน NC-FeSi<sub>2</sub> เทียบกับ $V$

จากรูปที่ 4.1 แสดงกราฟการเรียงกระแสของไดโอดโดยจะเริ่มทำงานที่ประมาณ 0.6 โวลต์ และจากรูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log J$  กับ  $V$  ของเฮทเทอร์โรจังก์ชัน NC-FeSi<sub>2</sub>/Si ในที่มืดซึ่งมีกระแสรั่วไหลอยู่ที่ประมาณ  $10^{-10}$  แอมแปร์ จะเห็นได้ว่าที่ไบอัสย้อนกลับมีกระแสรั่วไหลน้อยกว่าฝั่งไบอัสตรงอยู่เกือบสองลำดับ จึงกล่าวได้ว่ามีกระแสรั่วไหลปริมาณน้อย



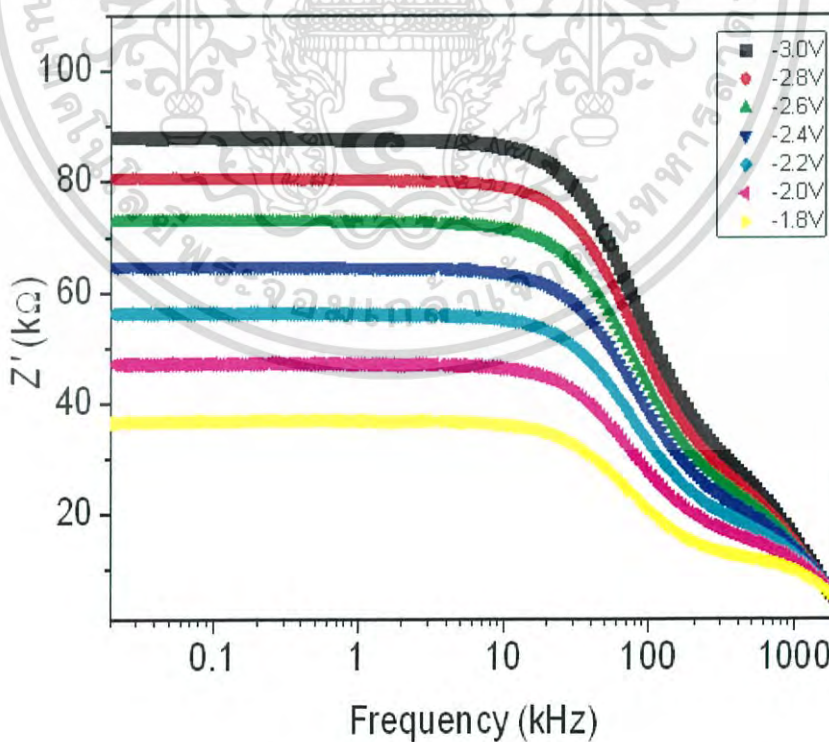
รูป 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $J$  กับ  $V$  ของเฮทเทอร์โรจังก์ชัน NC-FeSi<sub>2</sub>/Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



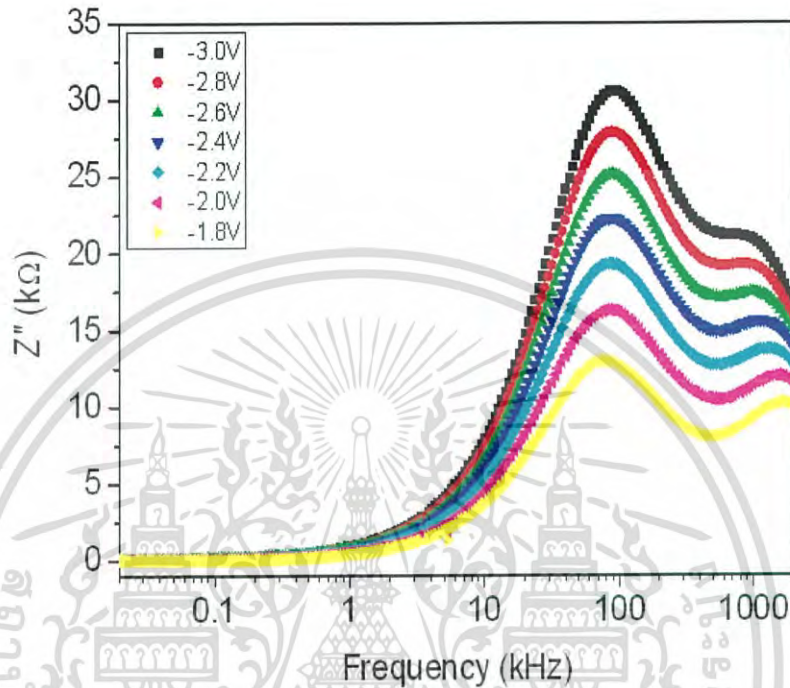
รูป 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log J$  กับ  $V$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si

จากรูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $f$  ของ NC-FeSi<sub>2</sub> แสดงการเปลี่ยนแปลง  $Z'$  เทียบกับ  $f$  ต่างๆ ในช่วงค่า  $f$  มีค่า 0.1 kHz ถึง 10 kHz ค่า  $Z'$  มีค่าคงที่และเห็นได้ชัดเจนว่า  $Z'$  ลดลงอย่างมากในช่วงที่  $f$  เท่ากับ 10 kHz ถึง 1000 kHz ที่  $V$  มีค่า -3.0 โวลต์ จะมีค่า  $Z'$  มากกว่าที่ -1.8 โวลต์



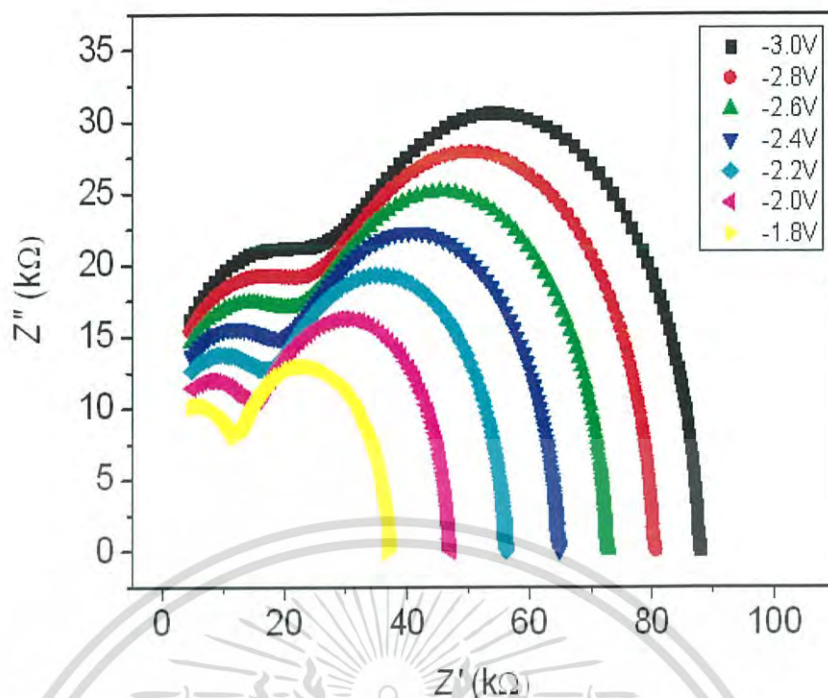
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $f$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si ที่ค่า  $V$  ต่างๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $f$  ของเฮเทอโรโรจันต์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si แสดงความแตกต่างของส่วนของ  $Z''$  ด้วย  $f$  ที่ใช้กับ  $V$  ต่างๆจะสังเกตเห็นว่าค่า  $Z''$  เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ  $f$  ที่ใช้จนถึงค่า  $f$  ที่ 100 kHz จะมีค่าเป็น  $Z''_{max}$  และจากนั้นจะลดลงตาม  $f$  ที่เพิ่มขึ้น และค่า  $Z''$  ลดลงตาม  $V$  ที่เพิ่มขึ้น



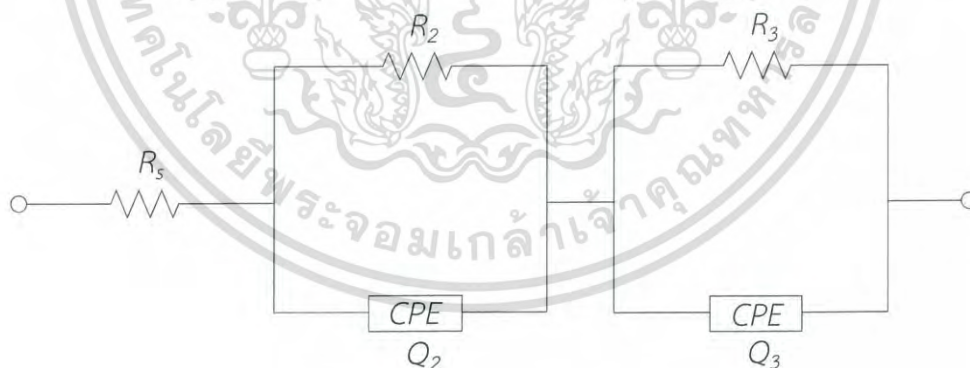
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $f$  ของเฮเทอโรโรจันต์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si ที่ค่า  $V$  ต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $Z'$  ของเฮเทอโรโรจันต์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si พบว่าเส้นกราฟนี้มีลักษณะเป็นเส้นรูปครึ่งวงกลม 2 วง โดยที่  $V$  มีค่าลบมากๆ จะมีความกว้างของครึ่งวงกลมกว้างกว่า  $V$  ที่มีค่าบวก สังเกตได้จากที่ -3.0 โวลต์ จะมีรัศมีที่กว้างกว่า -1.8 โวลต์



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $Z'$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si ที่ค่า  $V$  ต่างๆ

จากจากรูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $Z'$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si ซึ่งจะสอดคล้องกับวงจรสมมูล ที่มี  $R_1$  ต่ออนุกรมกับ  $R_2$  ที่ต่อขนานอยู่กับ  $C_1$  และต่ออนุกรมกับ  $R_2$  ที่ต่อขนานอยู่กับ  $C_2$  ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงวงจรสมมูลของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si ในที่มีด

จากรูปที่ 4.6 วงจรสมมูลของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si จะประกอบไปด้วย  $R_s$  หรือ serie resistance เป็นความต้านทานที่เกิดจากบริเวณรอยต่อขั้วอิเล็กโทรด รอยต่อ  $p-n$  หรือบริเวณเนื้อสารและ  $R_p$  หรือ parallel resistance เป็นความต้านทานที่เกิดจากบริเวณรอยต่อ  $p-n$  และกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดักภายในรอยต่อ และ  $C$  เป็นค่าตัวเก็บประจุ และเนื่องจากกราฟเป็นครึ่งวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางต่ำกว่าแกน  $X$  จึงเป็นค่า  $CPE$  จากรูปที่ 4.6 จะได้สมการ  $Z$  จากวงจรดังนี้

$$Z(f) = R_s + \frac{R_2}{R_2 Q_2 (i2\pi f)^{\alpha_2} + 1} + \frac{R_3}{R_3 Q_3 (i2\pi f)^{\alpha_3} + 1}$$

โดยจะแสดงค่า  $CPE$ ,  $R_s$ ,  $R_p$  จากโปรแกรม Origin และโปรแกรม EC-Lab ที่จำลองออกมา และเปรียบเทียบที่แต่ละโวลต์ ตั้งแต่ -3.0 โวลต์ ถึง -1.8 โวลต์

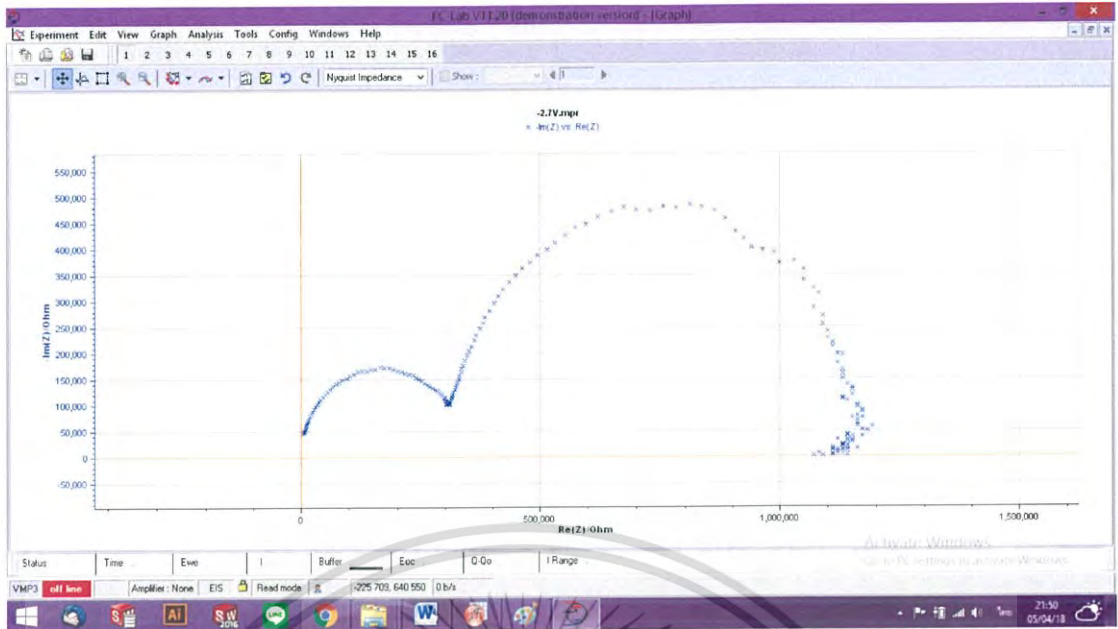
โดยจากรูปที่ 4.7 จะใช้โปรแกรม Origin บันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดค่า  $Z$  แล้วนำข้อมูลที่เป็นข้อมูลดิบหรือข้อมูลตัวเลขที่บันทึกไว้ไปเปิดในโปรแกรม EC-Lab

	Z(0)	Z(1)	R(1)
1	1.23E6	4462.53366	20
2	1.01E6	34794.12197	21.19
3	1.09E6	5630.46029	22.44
4	1.41E6	36145.50359	23.77
5	1.09E6	37029.5982	25.18
6	1.41E6	14816.94872	26.98
7	1.43E6	1726.00125	28.25
8	1.48E6	2555.22597	29.92
9	1.45E6	4637.51955	31.7
10	1.44E6	12745.05404	33.58
11	1.44E6	14937.60481	35.57
12	1.06E6	27091.6292	37.67
13	1.4E6	16249.91895	39.81
14	1.06E6	16301.09442	42.27
15	1.41E6	5039.21851	44.77
16	1.4E6	13547.79093	47.43
17	1.42E6	32015.63206	50.24
18	1.42E6	97674.446	53.21
19	1.42E6	12707.15337	56.32
20	1.46E6	26924.09713	59.71
21	1.46E6	4428.6313	63.25
22	1.51E6	25126.0493	66.99
23	1.49E6	39442.4259	70.96
24	1.46E6	57457.95839	75.17
25	1.49E6	36259.71634	79.62
26	1.49E6	40656.42945	84.34
27	1.53E6	71630.14567	89.34
28	1.54E6	63540.62988	94.63
29	1.53E6	62165.28346	100.2
30	1.47E6	52955.64026	106.2

รูปที่ 4.7 แสดงโปรแกรม Origin เพื่อใช้ในการสร้างกราฟและบันทึกข้อมูล

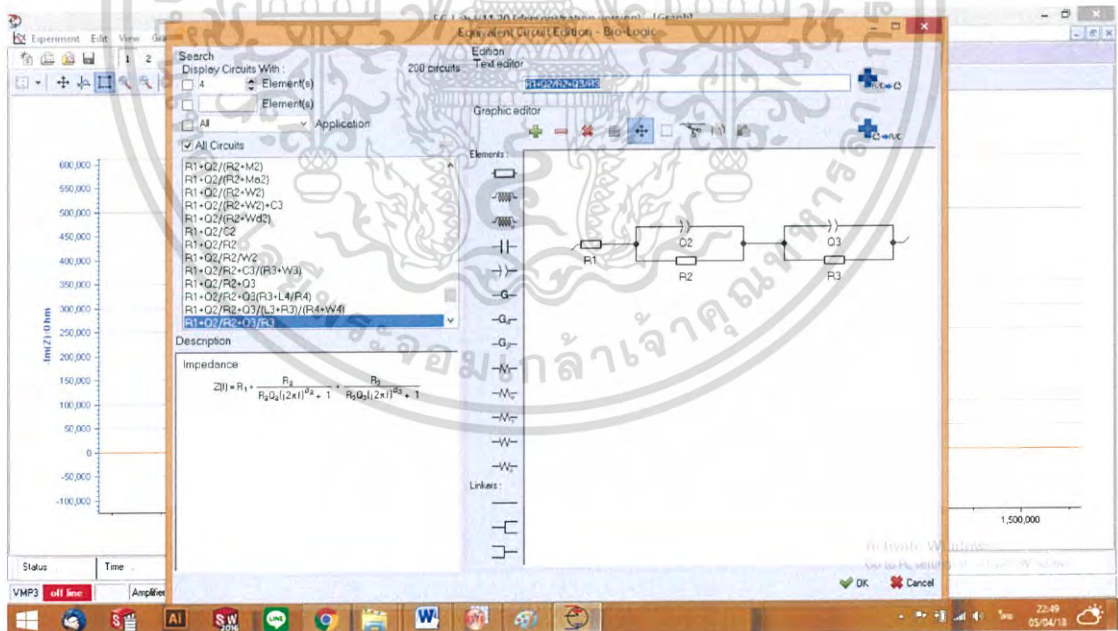
จากรูปที่ 4.8 หลังจากนั้นนำข้อมูลที่บันทึกจาก Origin เปิดในโปรแกรม EC-Lab กำหนดแกนให้ตรงตามต้องการแล้วกดตกลง โปรแกรมจะแสดงข้อมูลออกมาในรูปกราฟออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 โปรแกรม EC-Lab แสดงข้อมูลกราฟจากการวัดค่า

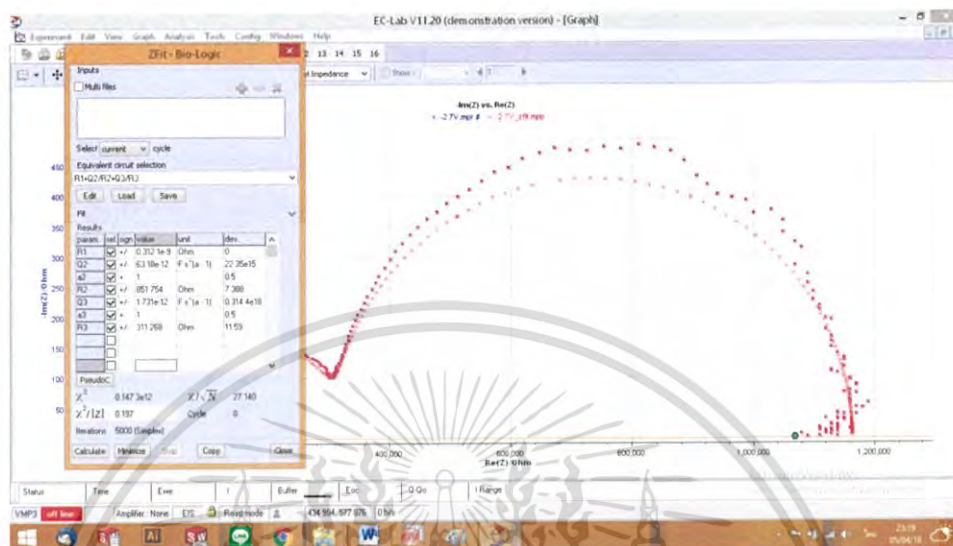
เมื่อได้กราฟแล้วทำการใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมกับวงจรโดยในขั้นแรกเลือกวงจรที่สอดคล้องกับกราฟ ซึ่งสอดคล้องกับวงจรข้างต้นที่กล่าวมาและแสดงสมการที่สอดคล้องกับวงจรตามภาพที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงวงจรสมมูลและสมการที่สอดคล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.10 เมื่อได้วงจรสมมูลและสมการที่สอดคล้องกับข้อมูลแล้วให้โปรแกรมทำการจำลองค่าของตัวแปรนั้นๆออกมา จะประกอบไปด้วยค่า  $R$ ,  $CPE$ ,  $\alpha$  ซึ่งจะแสดงออกมาที่ค่า  $V$  แต่ละค่าตั้งแต่ -3.0 โวลต์ ถึง -1.8 โวลต์



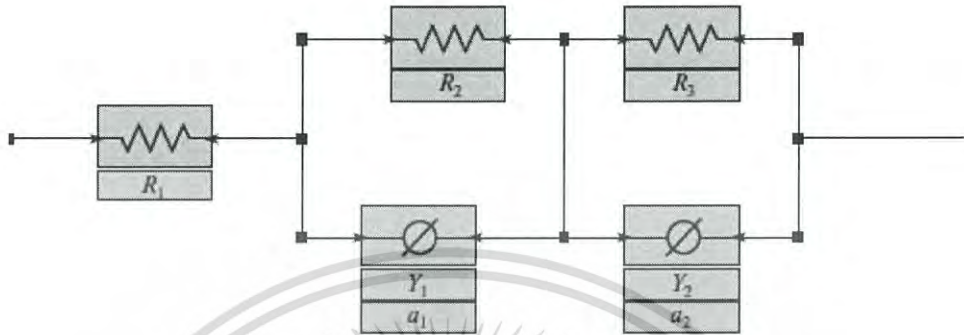
รูปที่ 4.10 แสดงค่า  $R$ ,  $CPE$ ,  $\alpha$  ที่จำลองค่าที่เหมาะสมได้จากวงจร

จากรูปที่ 4.10 เมื่อได้ค่าของตัวแปรนั้นๆ ออกมาจะแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้ในทูลค่า  $V$  ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับค่า  $Z$  โดยใช้โปรแกรมจำลองของเฮทเทอร์โรจังก์ชัน  $NC-FeSi_2/Si$  ที่ค่า  $V$  ต่างๆ

Volt	$R_s$ ( $\Omega$ )	$Q_1$ (F)	$\alpha_1$	$R_2$ ( $\Omega$ )	$Q_2$ (F)	$\alpha_2$	$R_3$ ( $\Omega$ )
-3	22,453	$1.156 \times 10^{-9}$	0.9244	60,223	$9.796 \times 10^{-9}$	0.9689	75,735
-2.8	15,049	$2.521 \times 10^{-9}$	0.9721	53,064	$5.223 \times 10^{-9}$	0.9586	69,137
-2.6	7,642	$1.980 \times 10^{-9}$	0.8061	47,073	$2.658 \times 10^{-9}$	0.9341	67,013
-2.4	7,346	$3.270 \times 10^{-9}$	0.8146	8,773	$1.240 \times 10^{-9}$	0.9121	51,254
-2.2	6,991	$7.999 \times 10^{-9}$	0.8031	8,192	$4.260 \times 10^{-9}$	0.9737	48,763
-2	5,030	$3.191 \times 10^{-9}$	0.9044	7,117	$3.040 \times 10^{-9}$	0.9137	36,872
-1.8	4,863	$2.384 \times 10^{-9}$	0.9872	6,123	$1.906 \times 10^{-9}$	0.9383	29,656

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

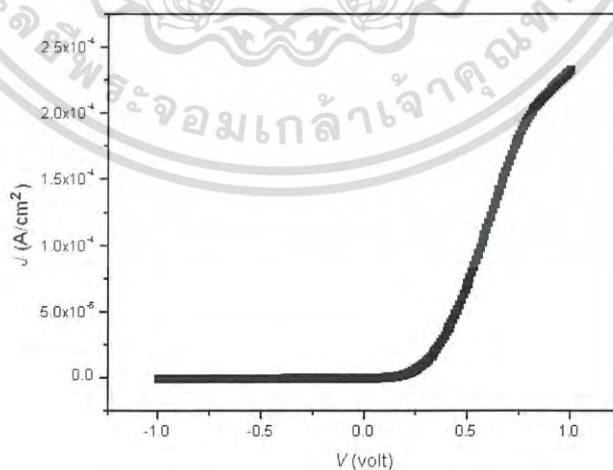
จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.1 โดยจะเห็นค่า  $R_1, R_2, R_3$  มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม  $V$  ที่เพิ่มขึ้น ค่า  $Q_1, Q_2$  จะมีค่าใกล้เคียงกันและค่า  $\alpha$  ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่ง ค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงวงจรสมมูลของเฮเทอโรจังก์ชัน NC-FeSi<sub>2</sub>/Si โดยใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร

#### 4.2 การวัดค่า $Z$ ของเฮเทอโรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si เทียบกับ $V$

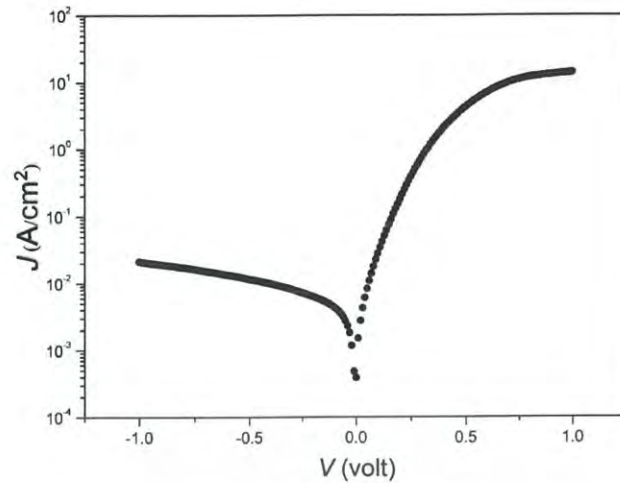
จากรูปที่ 4.12 แสดงกราฟการเรียงกระแสของไดโอดโดยจะเริ่มทำงานที่ประมาณ 0.5 โวลต์ และจากรูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log J$  กับ  $V$  ของเฮเทอโรจังก์ชัน  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si ในที่มีดีโอดซึ่งมีกระแสรั่วไหลอยู่ที่ประมาณ  $10^{-2}$  แอมแปร์ จะเห็นได้ว่าที่ไบอัสย้อนกลับมีกระแสน้อยกว่าฝั่งไบอัสตรงอยู่เกือบสองลำดับ จึงกล่าวได้ว่ามีกระแสรั่วไหลปริมาณน้อย



รูป 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $J$  กับ  $V$  ของเฮเทอโรจังก์ชัน  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si

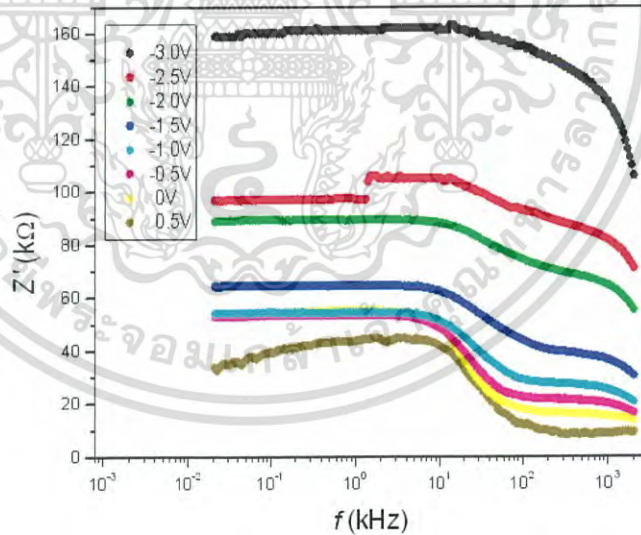
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูป 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log J$  กับ  $V$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$

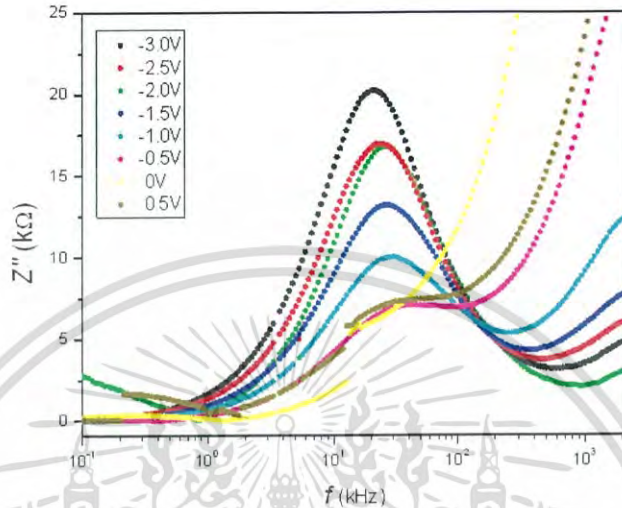
จากรูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $f$  ของ  $\beta\text{-FeSi}_2$  แสดงการเปลี่ยนแปลง  $Z'$  เทียบกับ  $f$  ต่าง ๆ ในช่วงค่า  $f$  มีค่า  $10^{-3}$  kHz ถึง 1000 kHz ค่า  $Z'$  มีค่าคงที่และเห็นได้ชัดเจนว่า  $Z'$  เริ่มมีค่าลดลงในช่วงที่  $f$  เท่ากับ 10 kHz ถึง 1000 kHz ที่  $V$  มีค่า  $-3.0$  โวลต์ จะมีค่า  $Z'$  มากกว่าที่ 0.5 โวลต์



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $f$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  ที่ค่า  $V$  ต่างๆ

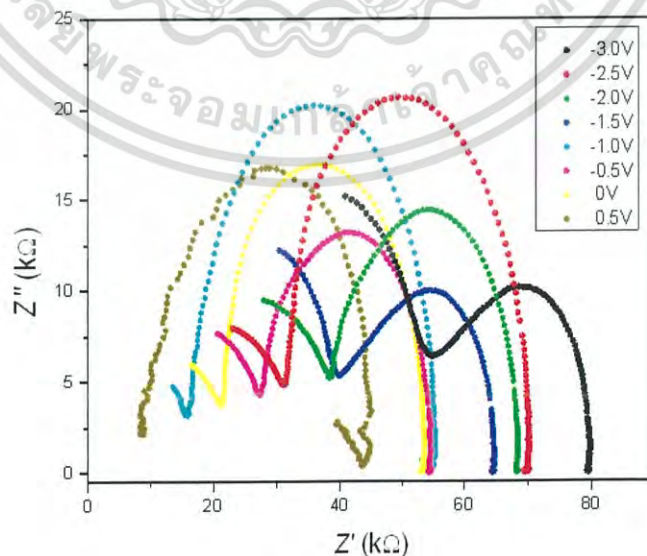
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $f$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  แสดงความแตกต่างของ  $Z''$  ด้วย  $f$  ที่ใช้กับ  $V$  ต่างๆ ตั้งแต่ -3.0 โวลต์ ถึง 0.5 โวลต์ จะสังเกตเห็นว่า ค่า  $Z''$  เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ  $f$  ที่ใช้จนถึงค่า  $f$  ที่ 100 kHz จะมีค่าเป็น  $Z''_{max}$  และจากนั้นจะลดลงตาม  $f$  ที่เพิ่มขึ้นและค่า  $Z''$  ลดลงตาม  $V$  ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $f$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  ที่ค่า  $V$  ต่างๆ

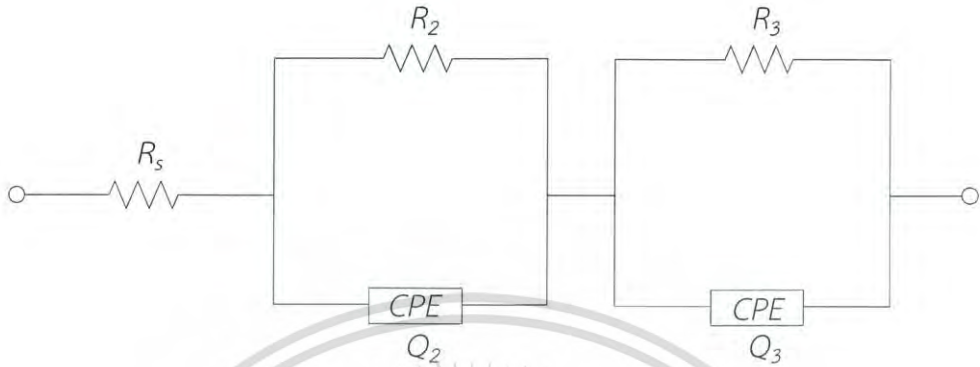
จากรูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $Z'$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  พบว่าเส้นกราฟนี้มีลักษณะเป็นเส้นรูปครึ่งวงกลม 2 วง โดยที่ค่า  $V$  มีค่าลบมากๆ จะมีความกว้างของครึ่งวงกลมกว้างกว่า  $V$  ที่มีค่าบวก สังเกตที่ -3.0 โวลต์ จะมีรัศมีที่กว้างกว่า 0.5 โวลต์ กล่าวได้ว่าวงมีรัศมีกว้างขึ้นตาม  $V$  ที่ลดลง



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $Z'$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  ที่ค่า  $V$  ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูในวงเป็นเอกสารที่สงวนไว้ไม่ให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากจากรูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $Z'$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si ซึ่งจะสอดคล้องกับวงจรสมมูล ที่มี  $R_1$  ต่ออนุกรมกับ  $R_2$  ที่ต่อขนานอยู่กับ  $C_1$  และต่ออนุกรมกับ  $R_2$  ที่ต่อขนานอยู่กับ  $C_2$  ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แผนภาพแสดงวงจรสมมูลเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si

จากรูปที่ 4.17 วงจรสมมูลของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si จะประกอบไปด้วย  $R_s$  ซึ่งเป็นความต้านทานที่เกิดจากบริเวณรอยต่อขั้วอิเล็กโทรด รอยต่อ  $p$ - $n$  หรือบริเวณเนื้อสารและ  $R_p$  เป็นความต้านทานที่เกิดจากบริเวณรอยต่อ  $p$ - $n$  และกับดักภายในรอยต่อ และ  $C$  เป็นค่าตัวเก็บประจุ และเนื่องจากกราฟเป็นครึ่งวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางต่ำกว่าแกน  $X$  จึงเป็นค่า  $CPE$  จากรูปที่ 4.17 จะได้สมการ  $Z$  จากวงจรดังนี้

$$Z(f) = R_s + \frac{R_2}{R_2 Q_2 (i2\pi f)^{\alpha_2} + 1} + \frac{R_3}{R_3 Q_3 (i2\pi f)^{\alpha_3} + 1}$$

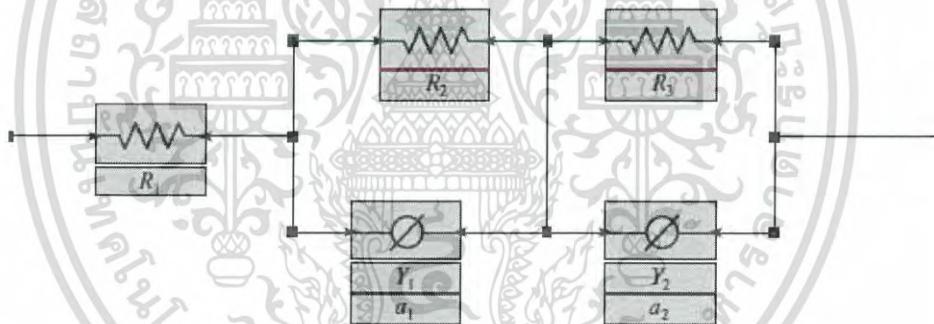
โดยจะแสดงค่า  $CPE$ ,  $R_s$ ,  $R_p$  จากโปรแกรมจำลอง Origin และ EC-Lab เช่นเดิมเพื่อเปรียบเทียบที่แต่ละ  $V$  ตั้งแต่  $-3.0$  โวลต์ ถึง  $0.5$  โวลต์ โดยค่าของตัวแปรแต่ละตัวที่จำลองออกมาได้นั้นจะแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับค่า  $Z$  โดยใช้โปรแกรมจำลองของเฮทเทอร์โรจังก์ชัน  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si ที่ค่า  $V$  ต่างๆ

Volt	$R_s$ ( $\Omega$ )	$Q_1$ (F)	$\alpha_1$	$R_2$ ( $\Omega$ )	$Q_2$ (F)	$\alpha_2$	$R_3$ ( $\Omega$ )
-3	20,730	$9.37 \times 10^{-9}$	0.8538	37,343	$7.96 \times 10^{-9}$	0.9862	35,377
-2.5	19,874	$3.21 \times 10^{-9}$	0.8908	35,044	$6.65 \times 10^{-9}$	0.9322	29,277
-2.0	16,830	$4.78 \times 10^{-9}$	0.9838	28,885	$4.36 \times 10^{-9}$	0.9553	29,032
-1.5	16,218	$3.15 \times 10^{-9}$	0.9226	27,781	$1.29 \times 10^{-9}$	0.9252	23,764
-1.0	15,777	$5.21 \times 10^{-9}$	0.9115	23,085	$2.63 \times 10^{-9}$	0.9084	23,083
-0.5	15,384	$3.70 \times 10^{-9}$	0.8931	21,289	$4.34 \times 10^{-9}$	0.9052	22,815
0	14,380	$4.06 \times 10^{-9}$	0.8753	20,100	$3.20 \times 10^{-9}$	0.8824	18,583
0.5	13,932	$3.19 \times 10^{-9}$	0.9368	10,589	$4.13 \times 10^{-9}$	0.8589	11,692

จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.2 โดยจะเห็นค่า  $R_s$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตาม  $V$  ที่เพิ่มขึ้นค่า  $Q_1$ ,  $Q_2$  จะมีค่าใกล้เคียงกันและค่า  $\alpha$  ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 4.18

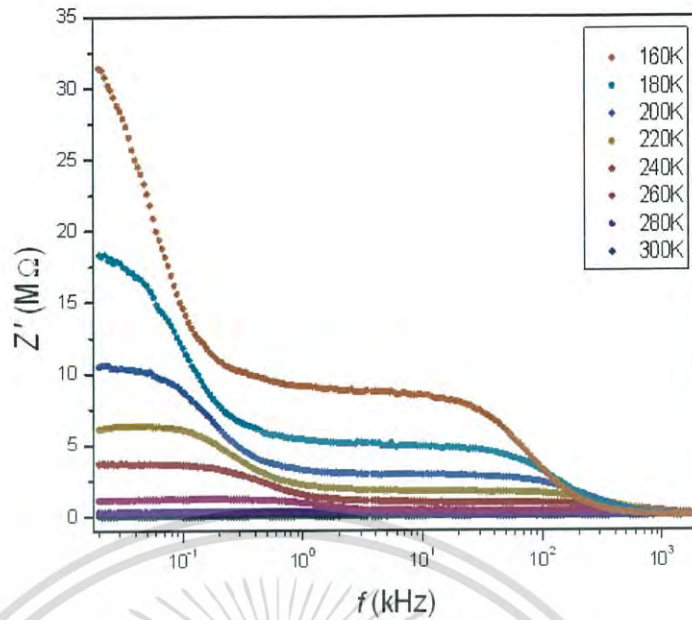


รูปที่ 4.18 แสดงวงจรสมมูลของเฮทเทอร์โรจังก์ชัน  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si ในที่มีคโดยใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร

#### 4.3 การวัดค่า $Z$ ของเฮทเทอร์โรจังก์ชัน $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si เทียบกับอุณหภูมิ

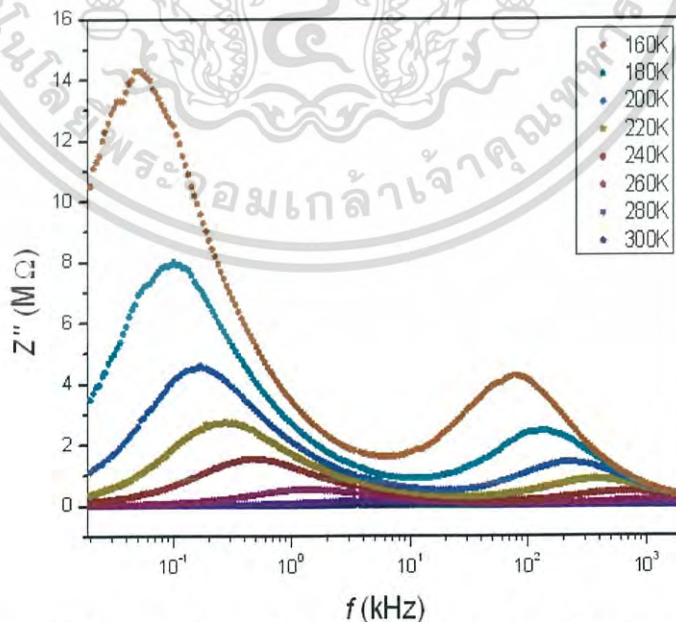
จากรูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $f$  ของเฮทเทอร์โรจังก์ชัน  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si แสดงการเปลี่ยนแปลง  $Z'$  เทียบกับ  $f$  ต่างๆ ในช่วงค่า  $f$  มีค่า 0.01 kHz ถึง 1 kHz พบว่าค่า  $Z'$  มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและจะค่อยๆ ลดลงถึงที่  $f$  มีค่าประมาณ 10 kHz แล้วจากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งจนมีค่าเป็น 0 หรือเข้าใกล้ 0 ที่อุณหภูมิมีค่า 300 เคลวิน จะมีค่า  $Z'$  น้อยกว่าที่ 160 เคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



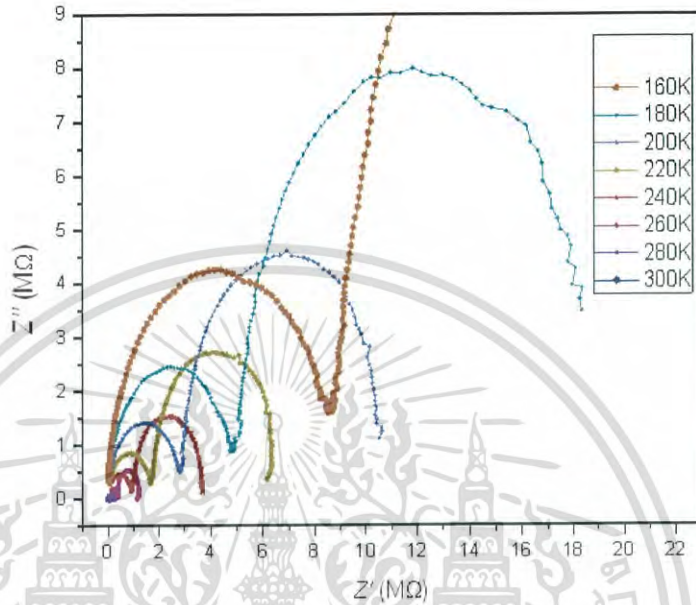
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $f$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $f$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  แสดงความแตกต่างของ  $Z''$  ด้วย  $f$  ที่ใช้กับอุณหภูมิต่างๆตั้งแต่ 300 เคลวิน ถึง 160 เคลวิน จะสังเกตเห็นว่าค่า  $Z''$  เพิ่มขึ้นสูงสุดที่  $f$  มีค่า 0.1 kHz เป็น  $Z''_{max}$  และลดลงอีกครั้งเมื่อ  $f$  เพิ่มขึ้นจนถึงค่า  $f$  ที่ 100 kHz จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งและจะลดลงตาม  $f$  ที่เพิ่มขึ้นจนมีค่าเข้าใกล้ 0 และค่า  $Z''$  ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



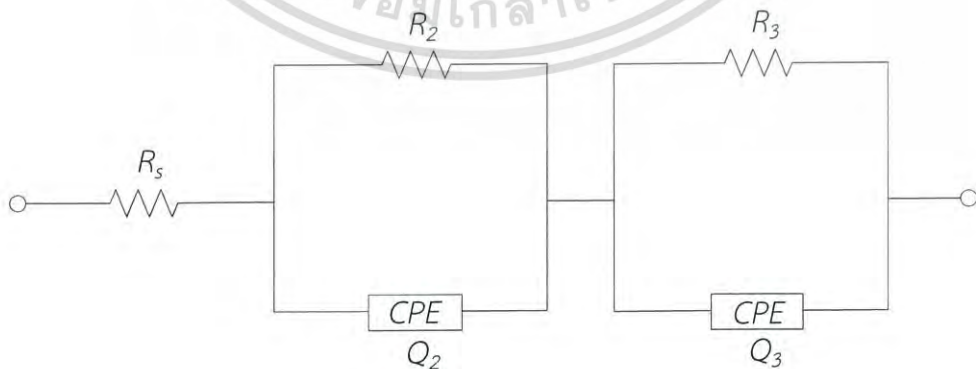
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $f$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  ที่อุณหภูมิต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $Z'$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si พบว่าเส้นกราฟเหล่านี้มีลักษณะเป็นเส้นรูปครึ่งวงกลม 2 วง โดยที่อุณหภูมิต่ำจะมีวงกว้างกว่าที่อุณหภูมิสูง สังเกตได้จากที่ 160 เคลวิน จะมีรัศมีที่กว้างกว่า 300 เคลวิน กล่าวได้ว่าวงมีรัศมีกว้างขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นหรือลดน้อยลง



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $Z'$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากจากรูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z''$  กับ  $Z'$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si ซึ่งจะสอดคล้องกับวงจรสมมูล ที่มี  $R_1$  ต่ออนุกรมกับ  $R_2$  ที่ต่อขนานอยู่กับ  $C_1$  และต่ออนุกรมกัน  $R_2$  ที่ต่อขนานอยู่กับ  $C_2$  ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แผนภาพแสดงวงจรสมมูลของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 วงจรสมมูลของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si จะประกอบไปด้วย  $R_s$  เป็นความต้านทานที่เกิดจากบริเวณรอยต่อขั้วอิเล็กโทรด รอยต่อ  $p$ - $n$  หรือบริเวณเนื้อสารและ  $R_p$  เป็นความต้านทานที่เกิดจากบริเวณรอยต่อ  $p$ - $n$  และกับดักภายในรอยต่อ และ  $C$  เป็นค่าตัวเก็บประจุ และเนื่องจากกราฟเป็นครึ่งวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางต่ำกว่าแกน  $X$  จึงเป็นค่า  $CPE$  จากรูปที่ 4.22 จะได้สมการ  $Z$  จากวงจรดังนี้

$$Z(f) = R_s + \frac{R_2}{R_2 Q_2 (i2\pi f)^{\alpha_2} + 1} + \frac{R_3}{R_3 Q_3 (i2\pi f)^{\alpha_3} + 1}$$

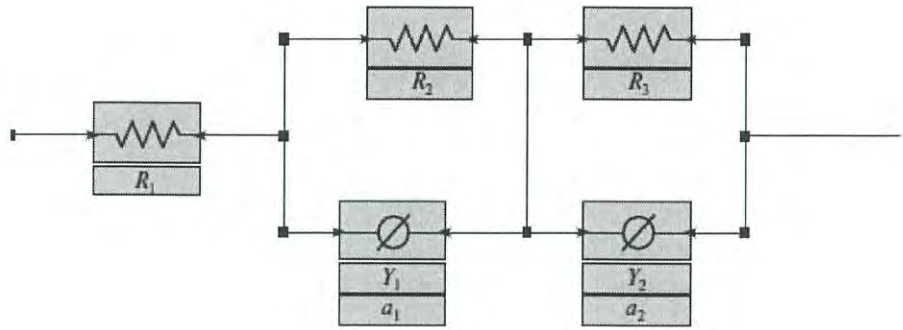
โดยจะแสดงค่า  $CPE$ ,  $R_s$ ,  $R_p$  จากโปรแกรมจำลอง Origin และ EC-Lab เช่นเดิมเพื่อเปรียบเทียบที่แต่ละอุณหภูมิ ตั้งแต่ 160 เคลวิน ถึง 300 เคลวิน แต่เนื่องจากที่อุณหภูมิ 300 เคลวินขึ้นไปไม่สามารถวัดค่าได้หรือค่ามีความคลาดเคลื่อนสูง โปรแกรมจึงไม่สามารถจำลองค่าออกมาได้ โดยค่าของตัวแปรแต่ละตัวที่จำลองออกมานั้นจะแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับค่า  $Z$  โดยใช้โปรแกรมจำลองของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ

T	$R_s$ ( $\Omega$ )	$Q_1$ (F)	$\alpha_1$	$R_2$ ( $\Omega$ )	$Q_2$ (F)	$\alpha_2$	$R_3$ ( $\Omega$ )
300	20,594	$8.94 \times 10^{-9}$	0.9462	62,069	$3.85 \times 10^{-9}$	0.9913	22,141
280	48,139	$1.49 \times 10^{-9}$	0.9479	146,488	$1.77 \times 10^{-9}$	0.9387	32,170
260	315,605	$6.68 \times 10^{-9}$	0.9436	308,067	$2.93 \times 10^{-9}$	0.9876	374,349
240	439,056	$3.46 \times 10^{-9}$	0.9666	$1.46 \times 10^6$	$2.91 \times 10^{-9}$	0.8613	$1.95 \times 10^6$
220	645,479	$6.53 \times 10^{-9}$	0.9574	$1.56 \times 10^7$	$4.47 \times 10^{-9}$	0.9546	$1.60 \times 10^7$
200	$1.11 \times 10^6$	$8.60 \times 10^{-9}$	0.8094	$5.01 \times 10^7$	$7.44 \times 10^{-9}$	0.9028	$1.07 \times 10^7$
180	$2.11 \times 10^6$	$2.39 \times 10^{-9}$	0.8817	$4.10 \times 10^7$	$1.92 \times 10^{-9}$	0.9046	$1.92 \times 10^7$
160	$3.33 \times 10^6$	$6.37 \times 10^{-9}$	0.8937	$8.93 \times 10^7$	$6.18 \times 10^{-9}$	0.8577	$2.90 \times 10^8$

จากค่าของตัวแปรที่แสดงออกมาตามตารางที่ 4.3 โดยจะเห็นค่า  $R_s$ ,  $R_{p1}$ ,  $R_{p2}$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ลดลง ค่า  $Q_1$ ,  $Q_2$  จะมีค่าใกล้เคียงกันและค่า  $\alpha$  ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งค่าตำแหน่งของตัวแปรจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงวงจรสมมูลของเฮเทอโรโรจิงค์ชั้น  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  ในที่นี้ใช้โปรแกรมจำลองค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 5

# สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะค่า  $Z$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si และเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si โดยได้ทำการศึกษาการตั้งแตการเตรียมสารตัวอย่าง การเคลือบฟิล์มบาง การทำขั้วอิเล็กโทรด การวัดค่า  $I$ - $V$  และการวัดค่า  $Z$  โดยทำการเปรียบเทียบที่ค่า  $V$  และอุณหภูมิต่างกัน

โดยในการวิจัยในขั้นแรกได้ทำการวัดค่า  $I$ - $V$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si เพื่อทดสอบความเป็นไดโอด พบว่ามีกระแสรั่วไหลปริมาณน้อยและเริ่มนำกระแสที่ 0.6 โวลต์ เห็นได้ว่าเป็นไดโอด จากนั้นทำการวัดค่า  $Z'$  และ  $Z''$  ที่  $f$  ตั้งแต่ 20 Hz ถึง 2 MHz โดยทำการวัดที่ค่า  $V$  ต่างกันตั้งแต่ -3.0 โวลต์ ถึง 0.5 โวลต์ สังเกตได้ว่าที่ค่าแรงดันเป็นลบมากค่า  $Z'$  และ  $Z''$  จะมีค่ามากกว่าที่  $V$  มีค่าบวก เมื่อเปรียบเทียบค่า  $Z'$  กับ  $Z''$  จะได้กราฟที่มีลักษณะครึ่งวงกลม 2 วงเป็นวงเล็กและวงใหญ่โดยที่  $V$  มีค่าลบมากจะมีความกว้างของครึ่งวงกลมกว้างกว่า  $C$  ที่มีค่าบวก สังเกตได้จากที่ -3.0 โวลต์ มีรัศมีวงกว้างกว่าที่ 0.5 โวลต์ จึงกล่าวได้ว่า  $V$  มีผลต่อค่า  $Z'$  และ  $Z''$  โดยจากกราฟครึ่งวงกลมสองวงจะสอดคล้องกับวงจรสมมูลที่ประกอบไปด้วย  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $CPE$  โดยที่  $R_p$  ต่อขนานกับ  $CPE$  2 ชุดต่ออนุกรมกันและต่ออนุกรมกับ  $R_s$  และเมื่อทำการวัดค่าโดยทำการเปลี่ยนอุณหภูมิตั้งแต่ 300 เคลวิน ถึง 160 เคลวิน พบว่าค่า  $Z'$  กับ  $Z''$  จะมีค่าลดลงตาม  $f$  ที่เพิ่มขึ้นและที่อุณหภูมิค่าค่า  $Z'$  กับ  $Z''$  จะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z'$  กับ  $Z''$  พบว่าเส้นกราฟนี้มีลักษณะเป็นเส้นรูปครึ่งวงกลม 2 วง โดยที่อุณหภูมิต่ำจะมีวงกว้างกว่าที่อุณหภูมิสูง สังเกตได้จากที่ 160 เคลวิน จะมีรัศมีที่กว้างกว่า 300 เคลวิน กล่าวได้ว่าวงรัศมีกว้างขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นหรือลดน้อยลง และสอดคล้องกับวงจรสมมูลลักษณะเดียวกับการเปรียบเทียบโดยเปลี่ยนแปลง  $V$  ที่ประกอบไปด้วย  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $CPE$

ในงานวิจัยของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si ได้ทำการวัดค่า  $I$ - $V$  ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si เพื่อทดสอบความเป็นไดโอด พบว่ามีกระแสรั่วไหลปริมาณน้อยและเริ่มนำกระแสที่ 0.6 โวลต์ เห็นได้ว่าเป็นไดโอด จากนั้นทำการวัดค่า  $Z'$  และ  $Z''$  ที่  $f$  ตั้งแต่ 20 Hz ถึง 2 MHz โดยทำการวัดที่ค่า  $V$  ต่างกันตั้งแต่ -3.0 โวลต์ ถึง -1.8 โวลต์ พบว่าค่า  $Z'$  มีค่าลดลงในช่วง  $f$  มีค่าประมาณ 10 kHz ในส่วนของค่า  $Z''$  ที่  $f$  มีค่าประมาณ 100 kHz เห็นได้ว่า  $Z''$  มีค่าสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่า  $Z'$  กับ  $Z''$  พบว่าเส้นกราฟนี้มีลักษณะเป็นเส้นรูปครึ่งวงกลม 2 วง โดยที่  $V$  มีค่าลบมากจะมีความกว้างของครึ่งวงกลมกว้างกว่า  $V$  ที่มีค่าบวก สังเกตได้จากที่ -3.0 โวลต์ เห็นได้ว่ามีรัศมีที่กว้างกว่า -1.8 โวลต์ และสอดคล้องกับวงจรสมมูลที่ประกอบไปด้วย  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $CPE$  โดยที่  $R_p$  ต่อขนานกับ  $CPE$  2 ชุดต่ออนุกรมกันและต่ออนุกรมกับ  $R_s$  กล่าวของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การวัดชั้นสารตัวอย่างมากกว่า 1 ชั้น จะได้สามารถนำมาเปรียบเทียบผลการวิจัยได้
2. ควรวัดที่วัดเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi<sub>2</sub>/Si เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิต่างๆ เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิ
3. ควรวัดค่าขณะฉายแสงอินฟราเรดเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ในที่มืดและที่สว่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Promros, N. 2012. "Application of Iron disilicides to photodiodes." Ph.D. Thesis of Kyushu University
- [2] T. Yoshitake, M. Yatabe, M. Itakura, M. Kuwano, and Y. Tomokiyo, Appl. Phys. Lett. 83,3057 (2003)
- [3] Yoshitake, T. Inokuchi, Y. Yuri, A. and Nagayama, K. 2006. "Direct epitaxy growth of semiconducting  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> thin films on Si (111) by facing targets direct-current sputtering" Applied Physics Letter 88: 182104-1-182104-3
- [4] Sze S.M. and Kwok K. Ng. Semiconductor Devices Physics and Technology. 3rd ed. United States of America: John Wiley & Sons. 2007.
- [5] Kittel C. Introduction to Solid State Physics. 8th ed. United States of America: John Wiley & Sons. 2005.
- [6] ดุสิต เครื่องงาม. "โซลิตสเตรทฟิสิกส์." พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่น. 2535.
- [7] Schroder D.K. Semiconductor Material and Device Characterization. New York: John Wiley & Sons, Inc., Publication. 1990.
- [8] เอกชัย วิลามาศ. "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่ออวิวิธพันธ์ CdS/CdTe" วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [9] ไกรศักดิ์ ยืนยง "การศึกษาข้อสัมผัสไอหุ้มมิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์" วิทยานิพนธ์ ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง. 2553.
- [10] photodiode, [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>
- [11] Yoshitake, T. Nakagawa, Y. Nagano, A. Ohtani, R. Setoyama, H. Kobayashi, E. Sumitani, K. Agawa, K. and Nagayama, K. 2010. "Structural and Physical Characteristics of Ultra nanocrystalline Diamond/Hydrogenated Amorphous Carbon Composite Films Deposited Using a Coaxial Arc Plasma Gun. " JJAP. Vol. 49. 015503.

เอกสารนี้ [12] สิทธิชัย โภไคยอุดม ไร่ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับวงจรรวมยุคใหม่ได้พิมพ์คำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2551.

- [13] จูติกร จรรยาธรรม. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน”วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550
- [14] เอกชัย วิลามาศ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธ์  $CdS/CdTe$ ” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [15] ไกรศักดิ์ ยืนยง “การศึกษาข้อสัมผัสโอห์มิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์” วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [16] สุรียา มีเปี่ยมสมบูรณ์ “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อประยุกต์เป็นขอตักกึ่งไดโอด” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2553.
- [17] Karatas S., Altindal S., Turut A. and Cakar M. “Electrical Transport Characteristics of Sn/p-Si Schottky Contacts Revealed from I-V-T and C-V-T Measurements” Physics B. vol.329. 2007. pp. 43-50.
- [18] Banerjee, A.N., Nandy, S., Ghosh, C.K. and Chattopadhyay, K.K. “Fabrication and Characterization of All – Oxide Heterojunction p-CuAlO<sub>2+x</sub>/n-Zn<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>O Transparent Diode for Potential Application in Invisible Electronics”, Thin Solid Films, vol. 515, 2007. pp. 7324 – 7330.
- [19] Adachi S. Properties of Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. West Sussex: John Wiley&Sons. 2005.
- [20] Sub hash C. and Saroj B. “Analysis of Current–Voltage Characteristics of Inhomogeneous Schottky diodes at Low Temperatures” Appl. Surf. Sci. vol. 252. 2005. pp. 358–363.
- [21] Tataroglu A. and Altindal S. “Chracterization of Current-Voltage (I-V) and Capacitance – Voltage – Frequency (C – V – f) Feature of  $Al/SiO_2/p-Si$  (MIS) Schottky Diodes” Microelectronic Engineering. vol. 83. 2006. pp. 582-588.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้