

การศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี
RFMS เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับเฮเทอโรจังก์ชันโฟโตไดโอดและ
พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ

STUDY OF PHYSICAL PROPERTIES OF NC-FeSi₂
PREPARED BY RFMS FOR APPLYING TO
HETEROJUNCTION PHOTODIODES AND HYDROPHOBIC
SURFACE

ภัทรพล สิทธิศาสตร์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF PHYSICAL PROPERTIES OF NC-FeSi₂
PREPARED BY RFMS FOR APPLYING TO
HETEROJUNCTION PHOTODIODES AND HYDROPHOBIC
SURFACE

PATTARAPOL SITTISART

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

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับเฮเทอโรจังก์ชันโฟโตไดโอดและพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ
Study of Physical Properties of NC-FeSi₂ Prepared by RFMS for Applying to Heterojunction Photodiodes and Hydrophobic Surface

ชื่อนักศึกษา นายภัทรพล สิทธิศาสตร์ รหัสนักศึกษา 58051115

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กาจปัญญา สุวรรณสุข ประธานกรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ NC-FeSi ₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นโฟโตไดโอดและพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ
ชื่อนักศึกษา	นายภัทรพล สิทธิศาสตร์ รหัสนักศึกษา 58051115
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส

บทคัดย่อ

เฮเทอโรโรจันซ์ชั้นของซิลิกอนชนิดพีและนาโนไอรอนไดซัลไฟด์ชนิดเอ็นถูกเตรียมด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยความถี่คลื่นวิทยุ รูปแบบการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เผยพิคที่มีลักษณะกว้างในช่วงมุม 40-50° ซึ่งเนื่องมาจากการซ้อนทับของพิคจากการเลี้ยวเบนหลายจุดของ β -FeSi₂ ฐานสเปกตรัมของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ปรากฏศูนย์กลางของพิคตั้งอยู่ที่ 177 ซม.⁻¹ และ 232 ซม.⁻¹ ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ แสดงให้เห็นผลึกจำนวนมากซึ่งมีขนาดเกรนประมาณ 5 นาโนเมตร ค่าเฉลี่ยรากที่สองสำหรับความขรุขระของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ มีค่าประมาณ 4.5 นาโนเมตร ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยระหว่างพื้นผิวฟิล์ม NC-FeSi₂ และหยดน้ำมีค่าเป็น 93.5° ซึ่งแสดงถึงความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวฟิล์ม การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของความหนาแน่นของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในสภาวะมืดและสภาวะที่ได้รับการฉายแสงในย่านใกล้เคียงอินฟราเรด (NIR) ได้ถูกดำเนินการในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 ถึง 150 K จากการตรวจสอบพบว่าที่อุณหภูมิ 300 K มีพฤติกรรมการเรียงกระแสและมีการเกิดกระแสรั่วสูง ทั้งนี้กระแสรั่วถูกพบว่ามีขนาดลดลงที่อุณหภูมิ 150 K ค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ 300 K ถูกคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิโอนิคอิมิชั่นซึ่งมีค่า 1.87 ดังนั้นกระบวนขนย้ายพาหะที่โดดเด่นคือกระบวนกรรวมตัวกันของพาหะ เมื่ออุณหภูมิลดลงไปสู่ 150 K ค่าแฟกเตอร์อุดมคติถูกพบว่ามีค่ามากกว่า 2 ดังนั้นกระบวนกรขนย้ายพาหะจะถูกควบคุมโดยกระบวนกรทะลุผ่านของพาหะ นอกจากนี้การตอบสนองต่อแสง NIR ที่ 300 K ถูกพบว่าต่ำมาก ทว่าที่ 150 K อัตราส่วนระหว่างกระแสที่ตอบสนองต่อแสงและกระแสในที่มีมืดมีเพิ่มสูงขึ้นมาก

คำสำคัญ : ผลึกนาโนไอรอนไดซัลไฟด์ เฮเทอโรโรจันซ์ชั้น พื้นผิวไม่ชอบน้ำ แมกนีตรอนสปัตเตอริง ด้วยความถี่คลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Study of Physical Properties of NC-FeSi ₂ Prepared by RFMS for applying to Heterojunction Photodiodes and Hydrophobic Surface
Student	Mr. Pattarapol Sittisart Student ID 58051115
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2018
Advisor	Asst.Prof.Dr. Nathaporn Promros

Abstract

n-Type nanocrystalline iron disilicide (NC-FeSi₂)/p-type Si heterojunctions were prepared via radio-frequency magnetron sputtering at room temperature. A wide peak in a range of 40-50° due to the superposition of many diffraction peaks in β -FeSi₂ was obtained from the X-ray diffraction trace of the NC-FeSi₂ films. From Raman pattern of the NC-FeSi₂ films, the center positions was situated at 177 cm⁻¹ and 232 cm⁻¹. The surface photograph of NC-FeSi₂ films revealed a great number of crystals with a grain size of 5 nm. The root mean square roughness of the NC-FeSi₂ films was about 4.5 nm. The average contact angle between the NC-FeSi₂ film surface and water droplet was 93.5°, which was in the range of hydrophobic surface. The investigation of current density-voltage curves under the dark and illumination of near-infrared (NIR) light was conducted in temperature ranging from 300 to 150 K. A rectifying action with huge leakage current was observed at 300 K. At 150 K, the leakage current was vividly diminished around four orders of magnitude. The ideality factor (*n*) at 300 K assessed by thermionic emission theory was 1.87, which a recombination process is the dominant carrier portage mechanism. At 150 K, the *n* value was higher than 2. This exposed that the carrier portage mechanism was governed by a tunneling process. Further, the response for NIR light at 300 K was minimal. At 150 K, the ratio between the photocurrent and the dark current was elevated about two orders of magnitude.

Keywords : NC-FeSi₂ films, Heterojunctions, Hydrophobic surface, RFMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอบพระคุณ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในทุกๆ เรื่องด้วยความมุ่งมั่น จริงใจ และซื่อตรง รวมทั้งปลูกฝังให้มีแนวทางในการทำงานและการดำเนินชีวิตดังนี้

- Trust (ความเชื่อใจและความเชื่อมั่นซึ่งกันและกัน) เกิดจากการสร้าง commitment (ความไว้วางใจ การรักษาคำพูด) ครั้งแล้วครั้งเล่า แต่ถ้า commitment ถูกทำลายซักครั้งเดียว trust จะหายไ่ง่ายมาก ดังนั้น จะต้องรักษา trust ให้ได้ “เชื่อใจคนอื่นและครองตนให้เป็นที่เชื่อใจของคนอื่น”
- กล้าตัดสินใจและทำให้การตัดสินใจนั้นประสบความสำเร็จให้ได้ โดยอยู่บนรากฐานของความถูกต้องและแนวทางขององค์กร
- ดูหน้างานจริง คุยกับคนที่ปฏิบัติงานนั้น ต้องเข้าใจสถานการณ์จริง ต้องเข้าใจปัญหาจริง
- ประารถนาสิ่งใดในปฐพี เอาไม่ตรีแลงได้ตั้งใจ

ขอขอบคุณ ดร.กมลปัญญา สุวรรณสุข อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สละเวลาและให้เกียรติอย่างมากในการเป็นคณะกรรมการสอบวิชาโครงงานพิเศษนี้ รวมถึงให้คำแนะนำเพื่อมาปรับปรุง ทั้งการนำเสนอ การเขียนเนื้อหาโครงงานวิจัยให้สอดคล้องกับทฤษฎีทางฟิสิกส์

ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้ต่างๆ ด้านฟิสิกส์ให้แก่ผู้วิจัยเพื่อนำมาใช้ในโครงงานพิเศษในครั้งนี้และนำไปใช้ประกอบวิชาชีพ

ขอขอบคุณ นายอดิสร นพรุจิกุล นางสาววิวรรณ เฉลียวพงษ์ และนายพีรศิลป์ เจริญยืนยาว นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำปรึกษาตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้ต่างๆ ด้านฟิสิกส์ให้แก่ผู้วิจัยเพื่อนำไปใช้ในการดำเนินชีวิตและประกอบอาชีพในอนาคตได้

ภัทรพล สิทธิศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 คุณสมบัติโครงสร้างของผลึก NC-FeSi ₂	4
2.2 หลักการของวิธี Radio Frequency magnetron Sputtering (RFMS)	6
2.3 รอยต่อพี-เอ็น	7
2.3.1 รอยต่อในสภาวะสมดุล	7
2.4 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น	9
2.4.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ	10
2.4.2 กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ	10
2.5 ไดโอดเปล่งแสงของรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น	11
2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	14
2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..	16
2.7.1 การกำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ.....	17
2.8 การศึกษาธาตุด้วยเทคนิคทางรามาน	18
2.8.1 เทคนิคของรามานสเปคโตรสโคปี	19
2.9 การศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	20
2.10 การศึกษามุมสัมผัสด้วยเทคนิคบนพื้นผิวที่เปียกน้ำ.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 การเคลือบฟิล์ม NC-FeSi ₂ โดยวิธี RFMS.....	24
3.2 การใช้เครื่อง RFMS	25
3.3 การวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V).....	26
3.3.1 การวัดลักษณะเฉพาะ I-V ในที่มีดและฉายแสงเรเซอร์.....	27
3.3.2 การวัดลักษณะเฉพาะ I-V เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	31
3.4 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง	33
3.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)	33
3.4.2 เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (XRD).....	34
3.4.3 เทคนิคทางรามานสเปกโตรสโกปี (RAMAN).....	34
3.4.4 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM).....	35
3.4.5 เทคนิคการวัดมุมสัมผัส (Contact Angle)	35
บทที่ 4 การดำเนินงานวิจัยและผลการดำเนินการวิจัย	37
4.1 ลักษณะฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ NC-FeSi ₂ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการ RFMS	37
4.2 ผลการศึกษา XRD ของฟิล์มบาง NC-FeSi ₂ ที่ปลูกบนฐานรองรับ Si ที่เตรียม	37
โดยวิธี RFMS	
4.3 ผลการศึกษาวิธีรามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง NC-FeSi ₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS.....	38
4.4 การศึกษาลักษณะผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	39
ของฟิล์มบาง NC-FeSi ₂ ที่ปลูกบนฐานรองรับ Si ที่เตรียมโดยวิธี RFMS	
4.5 การศึกษาผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบาง NC-FeSi ₂	40
ที่ปลูกบนฐานรองรับ Si ที่เตรียมโดยวิธี RFMS	
4.6 การศึกษาความเปียกด้วยการวัดมุมสัมผัสของฟิล์มบาง NC-FeSi ₂	42
4.7 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดความหนาแน่นกระแส-แรงดัน (J-V)	42
ของรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi ₂ /Si ที่เตรียมโดยวิธี RFMS	
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	46
5.1 สรุปผลงานวิจัย	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	47
เอกสารอ้างอิง	48

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
3.1 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบาง NC-FeSi ₂ โดยวิธี RFMS	24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบ XRD วัดโดยใช้วิธี 2θ-สแกน ของฟิล์ม NC-FeSi ₂ ที่เตรียมโดยวิธี PLD และ FTDCS	5
2.2 ภาพแสดงการวัดโดยใช้ TEM ในที่มีดของฟิล์มบาง NC-FeSi ₂	5
2.3 ภาพแสดงหลักการทำงานของวิธี RFMS	6
2.4 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น.....	8
a. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นเฮเทอโรโรจังก์ชัน	
b. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นเฮเทอโรโรจังก์ชัน	
c. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นเฮเทอโรโรจังก์ชันและอยู่ในสภาวะ สมดุลเชิงความร้อน	
2.5 แสดงกลไกผลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการ..... การรวมตัวของพาหะโดย	11
a. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	
b. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	
2.6 แผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิด n และ ชนิด p ที่แยกได้และมีช่องว่าง..... ของแถบพลังงานที่แตกต่างกัน	12
2.7 แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของรอยต่อ p-n ในสภาวะสมดุล.....	12
2.8 (a) ส่วนของโฟโตไดโอดและ (b) สถานะการเชื่อมต่อโฟโตไดโอด p-n	14
2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก	15
2.10 แสดงวิธีการหาเพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	16
2.11 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
2.12 แสดงการกระเจิงของแสงรามาน.....	19
2.13 แสดงหลักการทำงานของ Dispersive Raman.....	19
2.14 แสดงลักษณะการทำงานของ FT-Raman	20
2.15 แสดงส่วนประกอบหลักของเครื่อง AFM.....	21
2.16 แสดงมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นเนื่องจากรอยต่อระหว่างสถานะของแข็ง ของเหลวและก๊าซ	22
ก) มุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา และ ข) มุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา	
3.1 รูปภาพขณะสัญญาณของเครื่อง RFMS	25
3.2 เครื่อง RF ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง NC-FeSi ₂	25
3.3 (a) เครื่องวัดค่า I-V และ (b) ภาพขณะที่ใส่ชิ้นสารตัวอย่าง.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 (a) ภาพแสดงภาพขณะที่ใส่ชิ้นงาน (b) ภาพแสดงโพรบที่ใช้วัดค่า $I-V$	26
3.5 Keithley 2400 สำหรับการวัดค่า $I-V$	27
3.6 โปรแกรม $I-V$ and $C-V$ สำหรับใช้คู่กับ Keithley 2400 เพื่อวัดค่า $I-V$	27
3.7 รูปแสดงโปรแกรม E4980A Control Software ที่ใช้วัดค่า $I-V$	28
3.8 เลือกโพลเตอร์ Condition.....	28
3.9 แสดงการเลือกโพลเตอร์ TEST เพื่อเลือกโหมดในการวัดค่า.....	28
3.10 แสดงโหมดในการวัดค่าโดยจะเลือกโหมดวัด $I-V$	29
3.11 แสดงการเลือกขอบเขตของช่วง V ที่ใช้วัดและกำหนดความละเอียด.....	29
3.12 แสดงค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้ในรูปของตาราง Excel.....	30
3.13 แสดงรูปภาพ $I-V$ เมื่อทำการวัดค่าแล้ว.....	30
3.14 แสดงรูปการวัด $I-V$ ในที่มีด.....	30
3.15 แสดงรูปการวัด $I-V$ เมื่อทำการฉายแสงเลเซอร์.....	31
3.16 (a) และ (b) แสดงการหมุนวาล์วโรตารีป้อนเพื่อลดแรงดันอากาศในสถานะ.....	31
3.17 เครื่อง 335 Temperature Control ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ.....	32
3.18 แสดงการเตรียมไนโตรเจนเหลวเพื่อลดอุณหภูมิในสถานะ.....	32
3.19 ภาพแสดงหลังจากใส่ไนโตรเจนเหลวในสถานะทรงกระบอกจะมีน้ำแข็งเกาะรอบสถานะ ...	33
3.20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ติดตั้งที่ศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส)	33
3.21 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ติดตั้งที่ศูนย์เครื่องมือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	34
3.22 กล้องรามานสเปคโตสโคปติดตั้งที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน.....	34
3.23 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ติดตั้งที่ศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส)	35
3.24 เครื่องวัดมุมสัมพัทธ์ติดตั้งที่ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ สจล.....	36
4.1 (a) แสดงลักษณะของฟิล์มบาง $NC-FeSi_2$ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS.....	37
(b) แสดงลักษณะอิเล็กโทรดของฟิล์มบาง $NC-FeSi_2$ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS	
4.2 แสดงจุดพีกของ XRD ในช่วงองศาที่ $40-50^\circ$ ของฟิล์มบาง $NC-FeSi_2$	38
ที่เตรียมโดยวิธี RFMS	
4.3 แสดงจุดพีกของ RAMAN ในช่วงองศาที่ $150-200^\circ$ และ $210-250^\circ$ ของฟิล์มบาง.....	39
$NC-FeSi_2$ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 (a) แสดงผิวหน้าของฟิล์มบาง NC-FeSi ₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS	40
(b) แสดงภาคตัดขวางของฟิล์มบาง NC-FeSi ₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS	
4.5 (a) แสดงภาพหน้าตัดพื้นผิวของความขรุขระฟิล์มบางของ NC-FeSi ₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS..	41
(b) แสดงภาพหน้าตัดในรูปแบบ 3 มิติ	
4.6 แสดงมุมสัมผัสของหยดน้ำที่กระทำลงบนผิวฟิล์มบาง NC-FeSi ₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS.....	42
4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันของเฮทเทอร์โรจังก์ชัน	43
ที่เตรียมโดยวิธี RFMS ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	
4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันของเฮทเทอร์โรจังก์ชัน	44
ที่เตรียมโดยวิธี RFMS เปรียบเทียบภายใต้การฉายแสงที่อุณหภูมิที่ 150 K และ 300 K	
4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ideality factor และ Barrier height.....	45
ของเฮทเทอร์โรจังก์ชันที่เตรียมโดยวิธี RFMS	

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อและสัญลักษณ์	คำอธิบาย
PLD	วิธีเคลือบด้วยพัลส์เลเซอร์ (Pulse Laser Deposition)
FTDCS	การสputเตอร์ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่มีเป้าเผชิญหน้ากัน (Facing-Target Direct-Current Sputtering)
RFMS	วิธีการสputเตอร์โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency magnetron Sputtering)
XRD	วิธีตรวจสอบโครงสร้าง (X-ray diffraction)
TEM	วิธีตรวจสอบโครงสร้าง (Transmission Electron Microscopy)
FESEM	วิธีตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy)
RAMAN	วิธีตรวจสอบคุณสมบัติของธาตุด้วยเทคนิคทางรามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)
AFM	วิธีตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy)
n	ฟิล์มบางมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
p	ฟิล์มบางมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี
f	ความถี่; (Hz)
E_g	ช่องว่างแถบพลังงาน; (eV)
LED	ไดโอดเปล่งแสง (Light-Emitting Diode)
Si	สารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุซิลิกอน
θ	มุมเฟส; (rad)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

จากการที่ผู้ทำโครงการงานได้ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและรายงานไว้ว่าสารกึ่งตัวนำผลึกนาโนไอรอนไดซิลิไซด์ (Nanocrystalline Iron Disilicide: NC-FeSi₂) ที่ประกอบไปด้วยผลึกที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 10 นาโนเมตร มีคุณสมบัติพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์คล้ายกันกับของอะมอร์ฟัสและ β -FeSi₂ วัสดุ NC-FeSi₂ มีคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ที่ได้รับความสนใจหลายอย่าง อาทิเช่น วัสดุนี้สามารถสร้างบนแผ่นรองรับที่มีลักษณะเป็นของแข็งหลายๆ ชนิดที่อุณหภูมิห้อง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัสดุนี้มีค่ามากกว่าของ β -FeSi₂ และค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของวัสดุนี้มีค่า 0.87 อิเล็กตรอนโวลต์ นอกจากนี้วัสดุนี้ประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอนและเหล็กที่ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อมและมีอยู่อย่างมากในธรรมชาติ ด้วยคุณสมบัติดังที่กล่าวมาวัสดุนี้จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านโฟโตโวลตาอิก โฟโตไดโอด และการเคลือบแข็ง [1,2]

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการรายงานไว้ว่าวัสดุ NC-FeSi₂ สามารถสร้างได้จากกระบวนการเคลือบไอเชิงฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition) อาทิเช่น การเคลือบแบบพัลส์เลเซอร์ (Pulsed laser deposition: PLD) [3] และการสปัตเตอร์ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่มีเป้าเผชิญหน้ากัน (Facing Target Direct-Current Sputtering: FTDCS) [4] วัสดุ NC-FeSi₂ ที่เตรียมจากวิธีดังกล่าวได้ถูกตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าและพบว่ามีความเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและมีค่าความหนาแน่นพาหะ 10¹⁸ - 10¹⁹ ลูกบาศก์เซนติเมตร และได้มีการสร้างรอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันของ p-type Si/n-type NC-FeSi₂ และ p-type Si/Si ที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (intrinsic: i)/n-type NC-FeSi₂ รวมทั้งศึกษาการตอบสนองของแสงในย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด (Near-infrared: NIR) อย่างไรก็ตามที่ผ่านมาแทบจะไม่มีรายงานการเตรียม NC-FeSi₂ โดยวิธีการแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio-Frequency Magnetron Sputtering: RFMS) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถใช้ในการเตรียมฟิล์มดังกล่าว และเป็นวิธีการนี้สามารถปลูกฟิล์มโดยใช้กับเป้าที่ไม่นำไฟฟ้าได้

ในโครงการนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธีการ RFMS โดยมุ่งเน้นที่คุณสมบัติทางด้านพื้นผิวที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการเปียกของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ และศึกษาคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าของรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นของ NC-FeSi₂/Si ที่เตรียมโดยวิธี RFMS

1.2 วัตถุประสงค์

- ศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS
- ศึกษาสมบัติทางด้านไฟฟ้าของรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นของ NC-FeSi₂/Si ที่เตรียมโดยวิธี RFMS

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- ฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ถูกเตรียมจากวิธี RFMS
- ตรวจสอบสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า (Current-Voltage: $I-V$) ในกรณีที่มีดและตอบสนองแสง ที่อุณหภูมิต่างกัน
- ตรวจสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ อาทิเช่น
 - โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์
 - โครงสร้างเชิงพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มบางโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
 - ความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์มบางโดยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
 - โครงสร้างฟิล์มโดยรามานสเปกโทรสโกปี
 - มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวฟิล์มโดยเครื่องวัดค่ามุมสัมผัส

1.4 วิธีการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา							หมายเหตุ
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	
ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและจัดหาวัสดุอุปกรณ์								
ตรวจวัดลักษณะ I-V ของรอยต่อวิวิธพันธ์ NC-FeSi ₂ /Si								
ตรวจวัดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง NC-FeSi ₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS								
วิเคราะห์ผลการทดลอง								
จัดทำรูปเล่มรายงาน								

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS
2. ได้รับลักษณะเฉพาะ I-V ของรอยต่อวิวิธพันธ์ NC-FeSi₂/Si ที่เตรียมโดยวิธี RFMS
3. ได้รับลักษณะการทำงานวิจัยและสามารถนำไปเป็นพื้นฐานในการศึกษาต่อในระดับที่สูงขึ้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

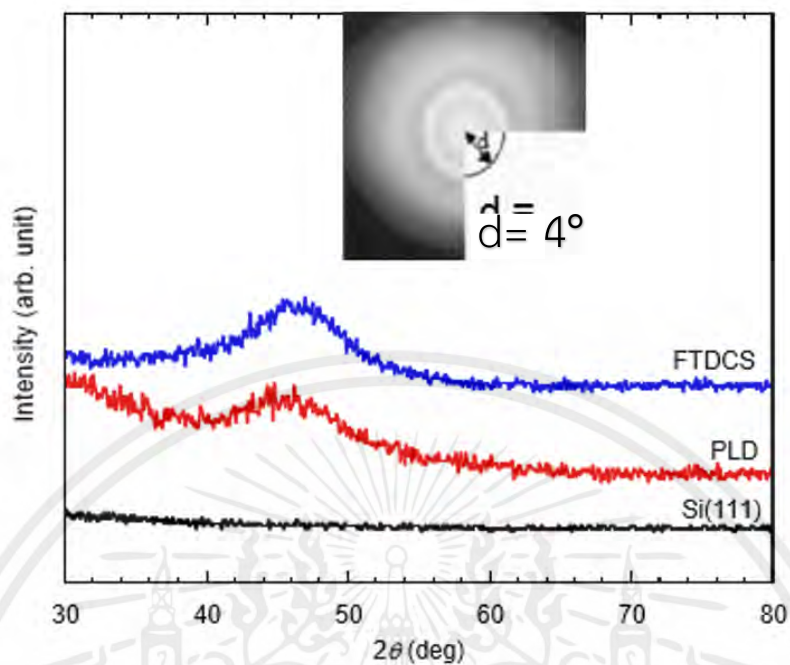
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวให้ทราบถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเริ่มต้นจากสมบัติพื้นฐานของ NC-FeSi₂ และต่อด้วยหลักการของวิธี RFMS และหลักการของวิธีในการตรวจวัดสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ลักษณะเฉพาะของ *I-V* และในสุดท้ายจะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

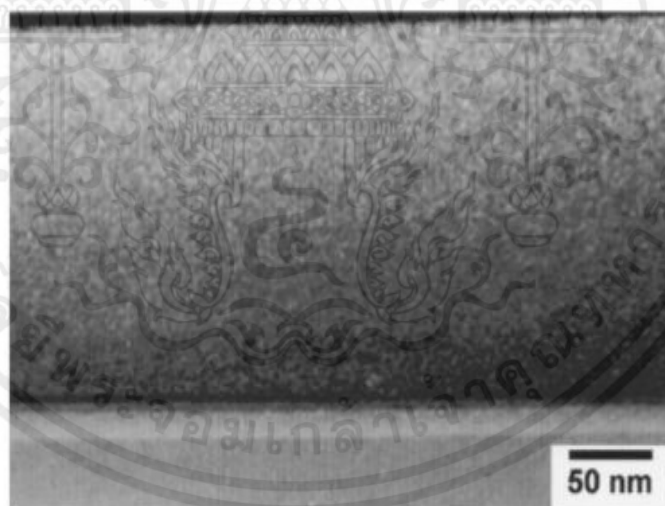
2.1 คุณสมบัติโครงสร้างของผลึก NC-FeSi₂ [5]

เป็นที่รู้กันดีว่า NC-FeSi₂ เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำในย่านแสงใกล้อินฟราเรด มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ใกล้เคียงกับ β และอะมอร์ฟัส FeSi₂ ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีอยู่อย่างมากมายในธรรมชาติ สารกึ่งตัวนำ NC-FeSi₂ มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) แบบตรงและแบบเฉียงเท่ากับ 0.74 และ 0.85 eV ตามลำดับ ซึ่งจะตรงกับความยาวคลื่นช่วง 1.3 และ 1.55 μm และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่มีมากกว่า 10^5 cm^{-1} ที่ 1.2 eV ที่สำคัญฟิล์มบาง NC-FeSi₂ สามารถปลูกได้บนฐานรองรับที่ต่างกันได้ในอุณหภูมิห้อง จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประยุกต์กับอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดเปล่งแสง (LED) และเซลล์แสงอาทิตย์

ฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่ถูกเตรียมโดย PLD และวิธี FTDCS ได้ถูกตรวจสอบโครงสร้างโดยวิธี XRD และ TEM และการตรวจสอบระบบไฟฟ้าจากรูปที่ 2.1 ได้แสดงผลการวัดโดยใช้ XRD ในแบบ 2 θ -สแกนที่มุมตกกระทบ 4° เกิดจุดสูงสุดของกราฟเนื่องจากโครงสร้างผลึกนาโนของฟิล์ม NC-FeSi₂ ซึ่งน่าจะเกิดจากการซ้อนทับกันของหลายๆ ระนาบของ β -FeSi₂ เช่น 313, 331, 004, 040, 041, 114, 511, 422 และ 133 ที่ 2 θ ระหว่าง 40° และ 50° จุดความเข้มของจุดสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์ม NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี PLD ซึ่งประกอบด้วยผลึกขนาด 3-5 nm ซึ่งจะได้ว่าขนาดผลึกของฟิล์ม NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดย FTDCS ค่อนข้างใหญ่กว่าฟิล์ม NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดย PLD รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบ XRD วัดโดยใช้วิธี 2 θ -สแกน ของฟิล์ม NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี PLD และ FTDCS

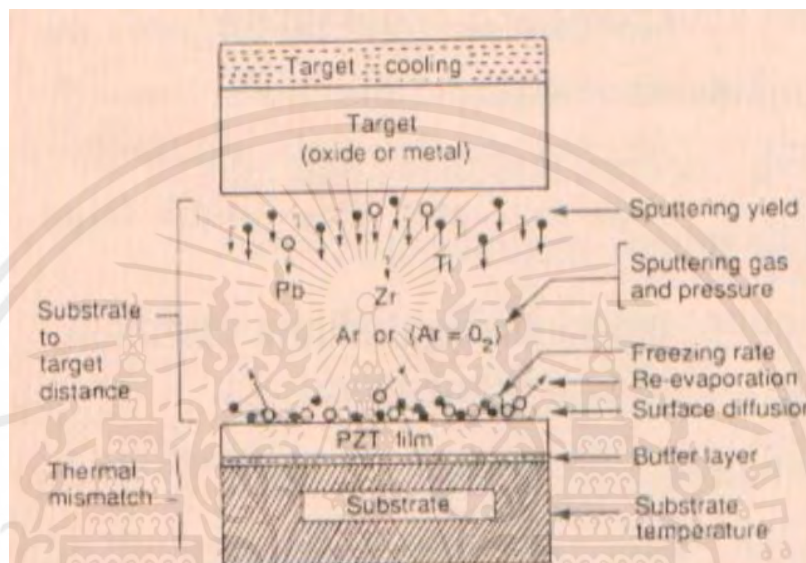


รูปที่ 2.2 ภาพแสดงการวัดโดยใช้ TEM ในที่มืดของฟิล์มบาง NC-FeSi₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หลักการของวิธี Radio Frequency magnetron Sputtering RFMS [6]

RFMS เป็นเทคนิคที่มีการส่งผ่านของอะตอมจากเป้า (target) ไปยังแผ่นรองรับ (substrate) โดยใช้หลักการส่งผ่านโมเมนตัม โดยทั่วไปแล้วเกิดจากการชนกันอย่างแรงของไอออนในเป้าที่มีพลังงานสูงมาก ซึ่งแสดงกระบวนการได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงหลักการทำงานของวิธี RFMS

ไอออนเหล่านี้เกิดจาก gas plasma ในสภาวะที่ RF ที่ได้รับพลังงานสูงจนสามารถเคลื่อนที่ไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเป้าและแผ่นรองรับ ส่วนใหญ่แล้วความถี่ RF จะใช้กับเป้าที่เป็นฉนวนเพื่อที่อิเล็กตรอนและประจุบวกสามารถชนกันบนผิวของเป้าได้ และยังช่วยลดประจุบนผิวในกระบวนการพอกพูน (deposition) ของฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอริงนี้ เป็นวิธีที่สามารถเพิ่มความเร็วของอัตราการพอกพูน (deposition rate) และยังคงควบคุมปริมาณของข้อบกพร่อง (defects) ต่างๆ ที่อาจเกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนบนแผ่นรองรับได้ดี ข้อได้เปรียบของวิธีนี้ได้แก่สามารถลดอุณหภูมิของแผ่นรองรับได้ดี เพื่อป้องกันการระเหยซ้ำของสารที่ค่าสัมประสิทธิ์การยึดตัว (sticking coefficient) น้อย

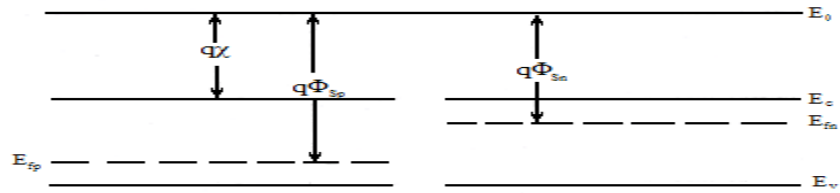
2.3 รอยต่อพี-เอ็น [7-10]

รอยต่อพี-เอ็น คือบริเวณที่ชนิดการนำไฟฟ้าของสารเปลี่ยนจากชนิดพีเป็นชนิดเอ็นหรือเปลี่ยนจากชนิดเอ็นเป็นชนิดพี โดยที่โครงสร้างของผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด รอยต่อพี-เอ็น เป็นส่วนที่สำคัญมากในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแทบทุกชนิด

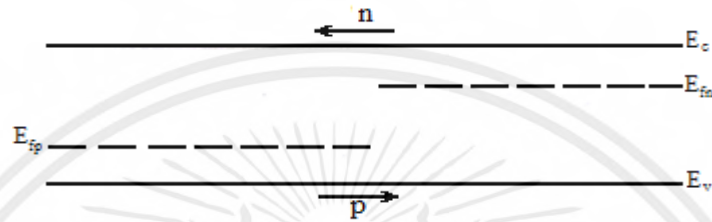
2.3.1 รอยต่อในสภาวะสมดุล

แบบจำลองของรอยต่อพี-เอ็น ในเชิงอุดมคติจะเริ่มพิจารณาที่รอยต่อแบบโฮโม (homo junction) ซึ่งทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน จึงมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากัน โดยเริ่มจากอิเล็กตรอนที่มีอยู่จำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่เข้าไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่น้อยมาก ในทำนองเดียวกันโฮลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะแพร่เข้าไปยังด้านเอ็นซึ่งมีโฮลอยู่น้อยมาก การแพร่ของพาหะเหล่านี้จะทำให้เนื้อสารขาดความเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอนอิสระไป ทำให้บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ใกล้รอยต่อแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวกเนื่องจากมีประจุบวกของไอออนของอะตอมผู้ให้ถูกทิ้งไว้ สำหรับทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็จะมีลักษณะคล้ายๆ กัน คือมีไอออนของอะตอมผู้รับซึ่งมีประจุเป็นลบปรากฏอยู่ ยังผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อโดยที่สนามไฟฟ้ามามีทิศจากทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ต้านการแพร่ซึม บริเวณรอยต่อนี้จึงปลอดจากพาหะอิสระและเรียกบริเวณนี้ว่าเขตปลอดพาหะ (depletion region) หรือบางครั้งเรียกว่า บริเวณประจุค้าง (space charge region) เนื่องจากมีประจุของไอออนสารเจืออยู่ซึ่งเป็นประจุที่ถูกตรึงอยู่กับที่ (fixed charge) ไม่ใช่ประจุอิสระ

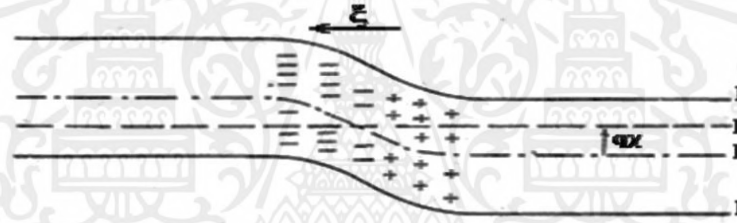
ลักษณะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่รอยต่ออาจแสดงได้โดยแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานดังรูปที่ 2.4 โดยที่รูป 2.4(a) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น รูปที่ 2.4(b) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น ซึ่งจะเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.4(c) โดยที่ ϕ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อ และ ξ คือ สนามไฟฟ้าที่รอยต่อ



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น

- ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นเฮเทอโรโรจังก์ชัน
- ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นเฮเทอโรโรจังก์ชัน
- ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นเฮเทอโรโรจังก์ชันและอยู่

ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

2.4 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น [8-15]

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้ามักเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ แสดงว่ากระบวนการนำกระแสเพิ่มขึ้นกับกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน นอกจากนั้นกระบวนการนำกระแสยังเกี่ยวข้องกับกลไกการฉีดกระแสสูง รวมทั้งการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะและสถานะผิวรอยต่อ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสภายใต้การไบอัสตรงให้กับรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$J_0 = J_{00} \exp\left(\frac{-E_a}{nkT}\right) \quad (2.2)$$

โดยที่

- V คือ แรงดันไบอัสตรง
- n คือ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด
- J_0 คือ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
- E_a คือ พลังงานกระตุ้น
- k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ = 1.38×10^{-23} J/K
- J_{00} คือ พจน์แฟกเตอร์หน้า (prefactor)

ซึ่ง J_{00} จะสัมพันธ์กับการโค้งงอของแถบพลังงาน (V_b) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนี้

$$J_{00} = qS_p N_v \left[\frac{\pi q V_b E_{00}}{kT \cosh(E_{00}/kT)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{-qV_n}{kT} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right] \quad (2.3)$$

โดยที่

$$V_b = \phi_p^i - V - V_n \quad (2.4)$$

เมื่อ S_p คือความเร็วในการรวมตัว (recombination velocity) สำหรับโฮล, N_v ความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ ϕ_p^i คือค่าแฟกซ์กัยขวางกั้นโฮลที่ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อ ค่า J_{00} นี้จะขึ้นกับกลไกการนำกระแสในรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น ลักษณะเด่นของกระบวนการการนำกระแสเนื่องจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ (โดยไม่คิดกลไกการชดเชยโม่งค์ทะลุผ่านกำแพง

ศักย์) คือแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของกักขังประจุและความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี และ $\ln J_0$ จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ

2.4.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ [7]

ชอกเคิลีย์-รีด-ฮอลล์ (Shockley-Read-Hall) ได้อธิบายการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะโดยผ่านกักขังประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยวซึ่งปรากฏอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมของสารเจือน้อย

จากแบบจำลองของ ชอกเคิลีย์-รีด-ฮอลล์ นี้จะได้ว่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) มีค่าประมาณ 2 และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ รวมทั้ง J_0 จะสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น $E_g/2$ สำหรับกรณีที่กักขังประจุมีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2

การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณผิวรอยต่อจะเป็นกลไกที่สำคัญของการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากความต่างกันของโครงสร้างที่บริเวณผิวรอยต่อมีค่าสูง ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อนั้นจะขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ฉีดเข้าไปที่บริเวณรอยต่อ

สำหรับกรณีรอยต่อแบบไม่สมมาตร (เช่น $p-n^+$) ปริมาณ $N_D > N_A$ กระแสของการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อจะเด่น แล้วแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ $\epsilon_p N_A / \epsilon_n N_D$ ซึ่ง N_D และ N_A คือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ส่วนค่า ϵ_n และ ϵ_p คือค่าไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี ตามลำดับ

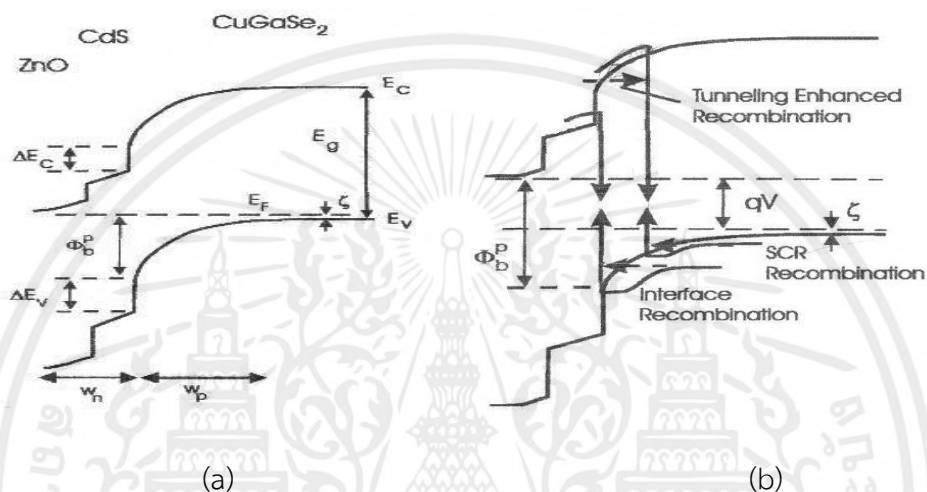
2.4.2 กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ [12]

สำหรับการนำกระแสที่มาจากกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$J = J_0(T) \exp(AV) \quad (2.5)$$

โดยที่ A คือ ความชันของกราฟระหว่าง $\ln J$ กับ V ซึ่งค่าของ A ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและเรียกว่า แฟกเตอร์แรงดัน (voltage factor) นอกจากนั้น $\ln J_0$ จะแปรตามอุณหภูมิ (ซึ่งต่างกับกรณีการนำกระแสที่เกิดจากกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน ซึ่ง $\ln J_0$ จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ)

ในที่นี้ไม่คิดถึงการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านระหว่างแถบพลังงาน (band to band tunneling) ที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จากแนวความคิดของรอยต่อขอตติ์ การโค้งงอของแถบพลังงาน โดยเฉพาะการโค้งงอของแถบวาเลนซ์จะทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลก่อนที่จะไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ถ้ากับดักประจุมีหลายระดับโฮลจะชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (multi tunneling step) โดยผ่านแต่ละกับดักประจุอย่างต่อเนื่องกัน จนกระทั่งเคลื่อนที่ไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ส่งผลให้ J_0 จะขึ้นกับอุณหภูมิบ้างเล็กน้อย

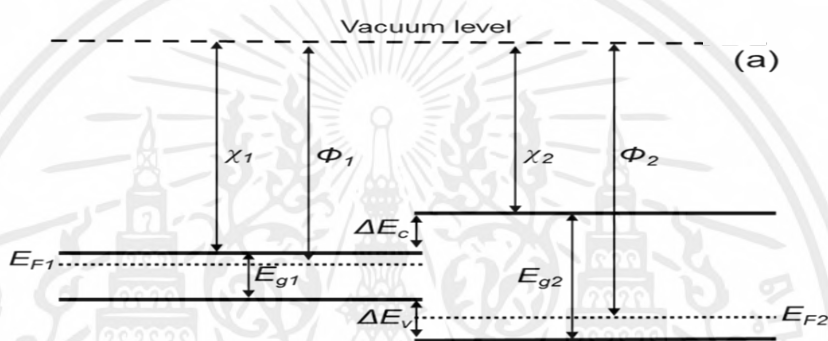


รูปที่ 2.5 แสดงกลไกผลของการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะโดย
 a. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน
 b. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

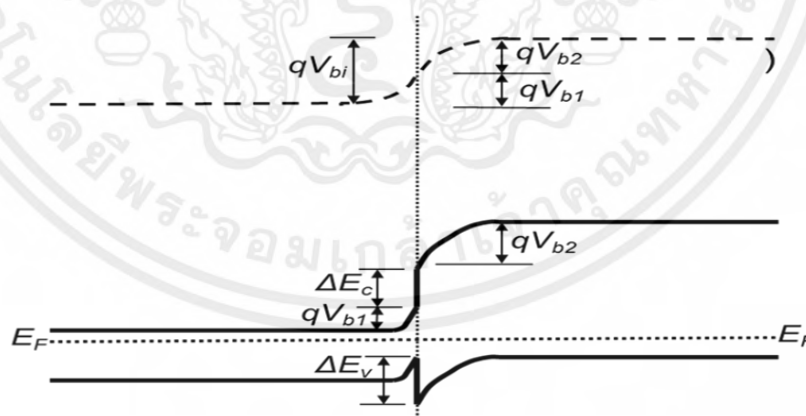
2.5 ไดโอดเปล่งแสงของรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น [7-8]

เฮเทอโรโรจันซ์ชั้น หมายถึง ผิวหน้าที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น 2 ชั้น ของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ต่างชนิดกัน วัสดุสารกึ่งตัวนำเหล่านี้มีช่องว่างไม่เท่ากันโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ 2 วัสดุสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดการกักตัวของสนามไฟฟ้า (E) โดยรอบของสารทั้ง 2 ถ้าวัสดุของสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 มีความคล้ายกันในเรื่องการนำไฟฟ้าจะเรียกว่ารอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นแบบเหมือนกัน แถบโค้งงอของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นไม่เรียบเท่ากับของโฮโมโรจันซ์ชั้นเนื่องจากความแตกต่างของแรงดึงดูดอิเล็กตรอน ฟังก์ชันงาน และอื่นๆ ซึ่งอาจทำให้เกิดสถานะอินเทอเฟซหรือแถบที่ไม่ต่อเนื่องที่มีรูปแบบการรวมตัวกันตรงกลางแผนภาพ แถบพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดที่ตรงกันข้ามกันก่อนสร้างรอยต่อแสดงในรูปที่ 2.6 วัสดุสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 จะมีความแตกต่างของ E_g ความแตกต่างของสภาพยอม (Permittivity, ϵ) ความแตกต่างของ

ฟังก์ชันงาน (ϕ), และความแตกต่างของแรงดึงดูดของอิเล็กตรอนความสัมพันธ์ของแรงดึงดูดของอิเล็กตรอนและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำจะกำหนดตามลำดับและเป็นพลังงานที่จำเป็นในการลดอิเล็กตรอนออกจากด้านล่างของแถบนำไฟฟ้า (E_c) และจากระดับเฟอร์มิไปยังระดับปลอดพาหะส่วนที่เป็นเครื่องหมาย 1 และ 2 หมายถึงสารกึ่งตัวนำ ชนิด n และ p จากรูปที่ 2.6 E_c มีค่าเท่ากับความแตกต่างของแรงดึงดูดของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำทั้งสอง รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของการคำนวณค่า p-n ในสภาวะสมดุล แรงดันไฟฟ้า (V_{bi}) เนื่องจากความแตกต่างของฟังก์ชันงาน ($\phi_2 - \phi_1$) เท่ากับผลรวมของ V ในตัวทั้ง 2 ด้าน ($V_{bi} = V_{b1} + V_{b2}$)



รูปที่ 2.6 แผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p ที่แยกได้และมีช่องว่างของแถบพลังงานที่แตกต่างกัน

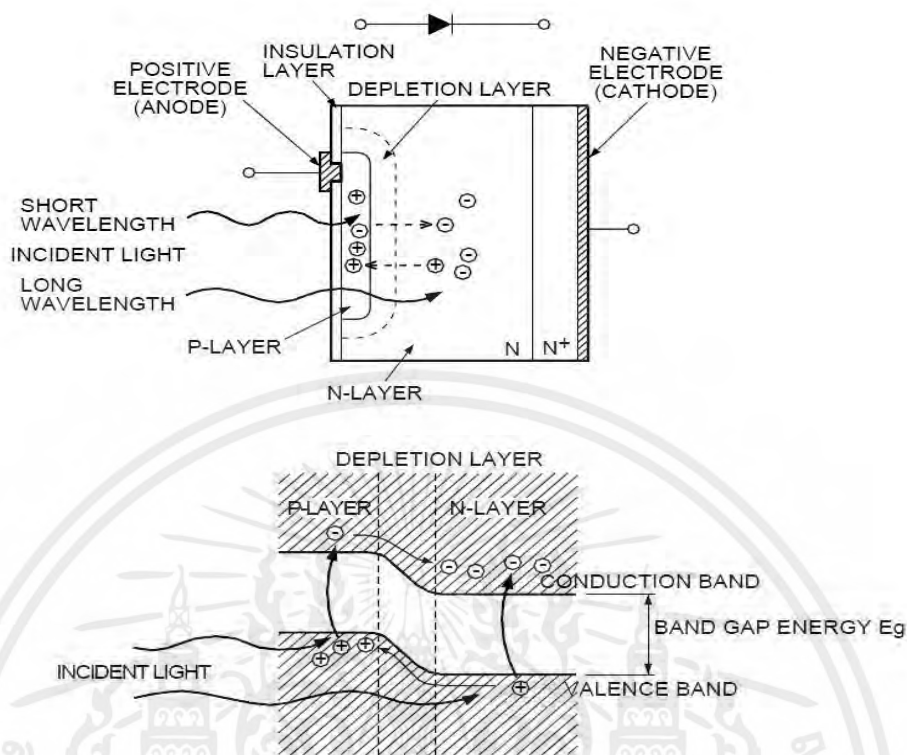


รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของรอยต่อ p-n ในสภาวะสมดุล

โฟโตไดโอดเป็นตัวตรวจจับแสงซึ่งทำให้เกิดกระแสหรือแรงดันเมื่อรอยต่อจากสารกึ่งตัวนำถูกฉายแสง โดยคำว่าโฟโตไดโอดสามารถกำหนดได้ในวงกว้างโดยปกติแล้วจะหมายถึงเซนเซอร์ที่ใช้ในการ

ตรวจจับความเข้มของแสงในโหมดความนำที่เกิดจากแสง โฟโตไดโอดมักจะเป็นแบบไบอัสย้อนกลับโดยการไบอัสย้อนกลับนี้จะเป็นการเพิ่มความกว้างของชั้นปลอดพาหะซึ่งจะช่วยลดประจุไฟฟ้าและทำให้มีเวลาในการตอบสนองได้เร็วขึ้นการไบอัสย้อนกลับทำให้เกิดกระแสในตัวเพียงเล็กน้อยในขณะที่กระแสที่เกิดจากแสงนั้นเป็นสัดส่วนเชิงเส้นตรงกับความส่องสว่าง [7-8,12,14,16]

โฟโตไดโอดจำแนกได้ตามฟังก์ชันและโครงสร้างดังนี้ (i) ไดโอด p-n, (ii) พินไดโอด, (iii) โฟโตไดโอดชนิดซีดที, (iv) อวาลานซ์โฟโตไดโอด [17] โดยทั้งหมดที่กล่าวมานี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการตรวจจับความเข้มตำแหน่งสี และแสงสว่าง เมื่อแสงตกกระทบโฟโตไดโอดอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างผลึกจะถูกกระตุ้นถ้าพลังงานแสงมากกว่าพลังงานของ E_g อิเล็กตรอนจะถูกนำมารวมตัวกันใน E_c โดยจะทิ้งโฮลไว้ในแถบวาเลนซ์ แสดงในรูปที่ 2.8 คู่อิเล็กตรอน-โฮลเหล่านี้เกิดขึ้นทั่วทั้งชั้น n, ชั้นปลอดพาหะ, และชั้น p ในบริเวณปลอดพาหะสนามไฟฟ้าจะเร่งอิเล็กตรอนเหล่านี้ไปทางชั้น n และโฮลไปทางชั้น p อิเล็กตรอนของคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่สร้างขึ้นในชั้น n พร้อมกับอิเล็กตรอนที่มาจากชั้น p จะถูกปล่อยไว้ในแถบนำแสง ส่วนโฮลในตอนนี้ได้เกิดการแพร่ผ่านชั้น n และไปยังชั้นปลอดพาหะแล้วก็ไปรวมตัวกันในแถบวาเลนซ์ โดยลักษณะแบบนี้ที่คู่อิเล็กตรอน-โฮล ถูกสร้างขึ้นตามสัดส่วนของปริมาณแสงที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวมในชั้น n และ p สิ่งนี้ส่งผลให้ชั้น p มีประจุเป็นบวก ชั้น n มีประจุเป็นลบ หากมีการต่อวงจรภายนอกเข้ามาระหว่างชั้น n และ p อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากชั้น n ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ออกจากชั้น p ไปทางขั้วไฟฟ้าด้านตรงข้ามกัน คู่อิเล็กตรอน-โฮล เหล่านี้จะสร้างกระแสในสารกึ่งตัวนำเรียกว่า พาหะ



รูปที่ 2.8 (a) ส่วนของโฟโตไดโอดและ (b) สถานะการเชื่อมต่อโฟโตไดโอด p-n

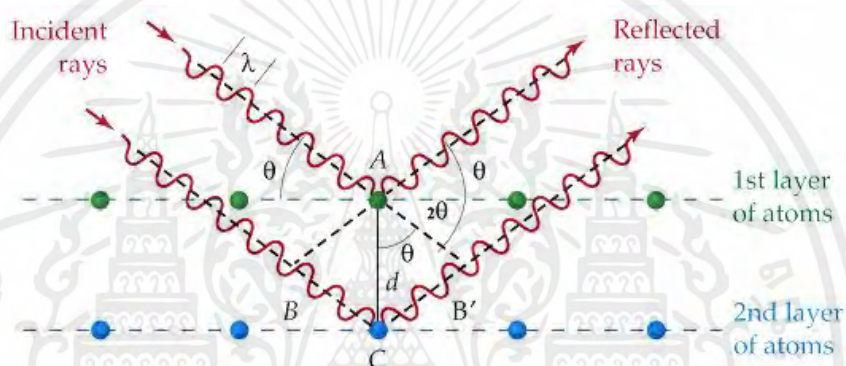
2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [7-12,18-21]

การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบใดและเมื่อทราบผลแล้ว จึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ต่อไป

วิลเลียม เฮนรี แบริก และวิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบริก (William Henry Bragg and William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนและได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (2.6)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.6)$$

- เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกที่ขนานกัน
- θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
- 2θ คือ มุมแบรกก์หรือมุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำมุมกับรังสีสะท้อน
- n คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...
- λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึก

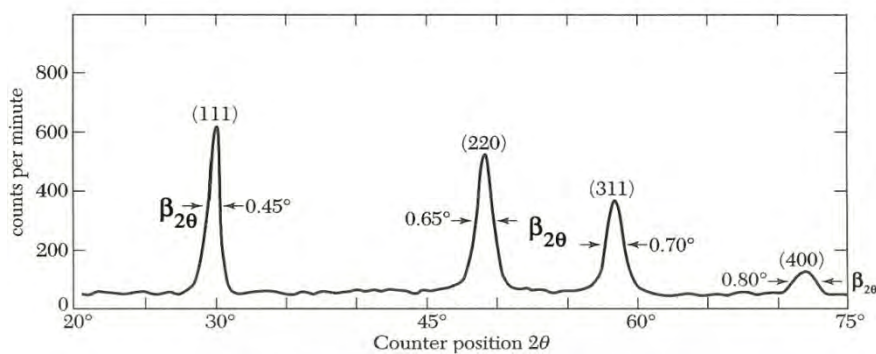
ขนาดของเกรน (D) รวมทั้งความเครียด (ϵ_s) หาได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.7)$$

ดังนั้น

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.8)$$

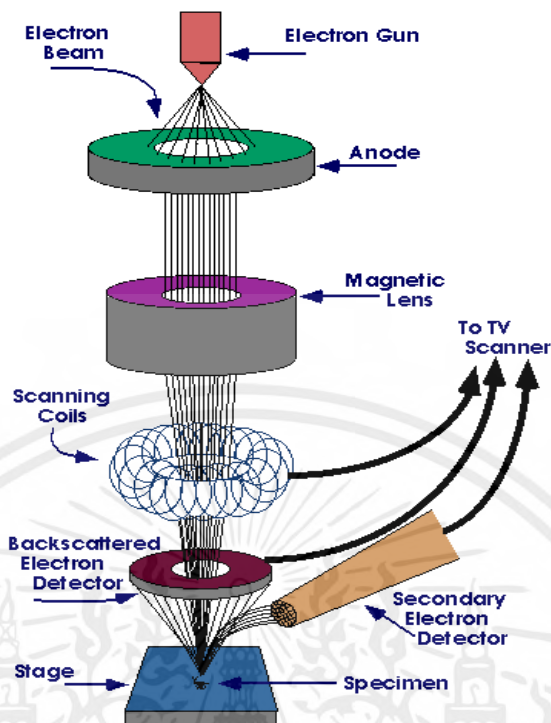
- เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
- β คือ ความกว้างเต็มช่วงที่ครึ่งค่าสูงสุดของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (full width at half maximum : FWHM)
- θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
- ϵ_s คือ ความเครียด



รูปที่ 2.10 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [7-16, 20-22]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ถูกใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคมีหลักการทำงาน คือ ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวทางกายภาพปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภาพที่เกิดจาก SEM มีลักษณะเป็นภาพสามมิติ SEM ถูกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2472-2474 แต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากอุปกรณ์ที่รวบรวมสัญญาณที่เกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ มีอำนาจแจกแจง (resolution) ต่ำ ภาพที่ปรากฏที่จอภาพจึงมีลักษณะพร่ามัวขาดรายละเอียด ในปี พ.ศ. 2508 SEM ได้รับการปรับปรุงระบบเลนส์สนามแม่เหล็กและระบบภาพให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มสนใจและได้รับความนิยมตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา



รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

หลักการทำงานของ SEM เริ่มจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าช่วง 1-40 กิโลโวลต์ ใช้เลนส์รวมแสง (condenser lens) เป็นตัวกำหนดทิศทางของกลุ่มอิเล็กตรอนและทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเป็นลำใช้เลนส์วัตถุ (objective lens) เป็นตัวโฟกัสภาพลำอิเล็กตรอนจะกราดไปยังพื้นผิวของสารตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (scanning coils) บนระนาบ x-y เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron : SE) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ (sensor) และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำไปขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอแคโทด (cathode ray tube : CRT)

2.7.1 การกำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

เมื่ออิเล็กตรอนจากขดลวดที่ถูกใช้เป็นไส้หลอด (filament) ถูกควบคุมให้เป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่างและลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้นในขณะเดียวกันสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืด-สว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิเล็กทรอนิกส์ใน SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT ใหญ่กว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กทรอนิกส์ใน SEM ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่ากำลังขยายของภาพได้ดังนี้

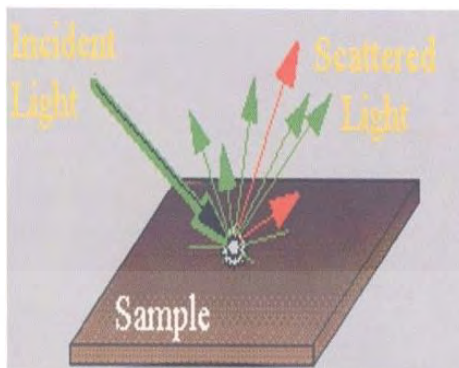
$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นบน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกราดบนสารตัวอย่างของลำอิเล็กทรอนิกส์}}$$

ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย โดยที่ลักษณะของความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูง เราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกราดต่ำ

2.8 การศึกษาธาตุด้วยเทคนิคทางรามาน [23]

ปรากฏการณ์รามานถูกค้นพบตั้งแต่ปี ค.ศ.1928 โดย Sir C.V. Raman โดยพบปรากฏการณ์การกระเจิงของแสงแบบไม่ปกติของโมเลกุลที่มีโพตอน ซึ่งต่อมาก็เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า รามาน เพื่อเป็นเกียรติแก่ผู้ค้นพบ และเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาการตรวจวัดทางด้านนี้จนถึงปัจจุบัน

ปรากฏการณ์รามานเกิดจากการที่เมื่อเรายิงแสงเลเซอร์ความเข้มสูงเข้าสู่วัสดุ โมเลกุลในวัสดุจะถูกกระตุ้นแล้วทำให้เกิดการกระเจิงของแสงออกมา ซึ่งเป็นเหตุการณ์ปกติของวัสดุต่างๆ ไป โดยแสงที่กระเจิงออกมานี้จะมีค่าความยาวคลื่นเดียวกันกับลำแสงของเลเซอร์ที่มากระตุ้น ในที่นี้จะเรียกแสงนี้ว่า แสงเลย์ไร (Rayleigh scatter) ส่วนลำแสงอีกส่วนที่มีปริมาณน้อยมาก จะมีการกระเจิงแสงที่มีความยาวคลื่นต่างออกไป ซึ่งเราจะเรียกลำแสงส่วนนี้ว่าการกระเจิงแสงของรามาน (Raman scatter) ดังรูปที่ 2.12

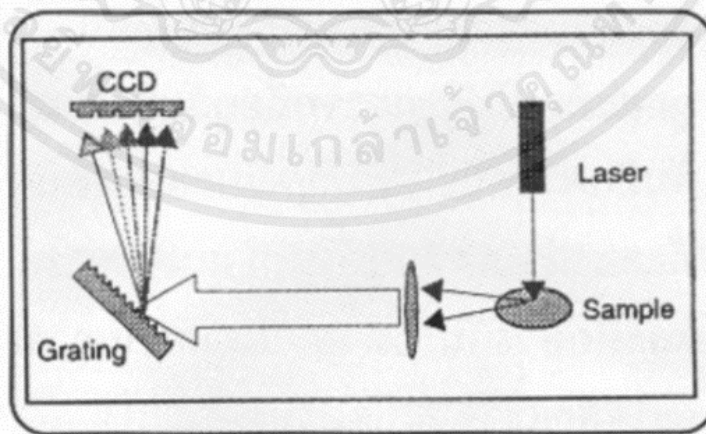


รูปที่ 2.12 แสดงการกระเจิงของแสงรามาน

2.8.1 เทคนิคของรามานสเปกโตรสโคปี

เทคนิคทางรามาน แบ่งได้ 2 แบบตามลักษณะการวัด คือ

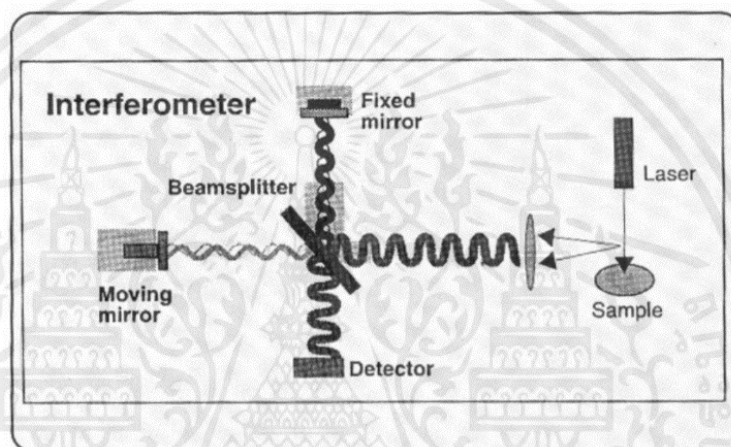
1. Dispersive Raman ใช้หลักการโฟกัสสัญญาณแสงของรามานที่เกิดบนเกรตติง (อุปกรณ์ในการแยกลำแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ) ลำแสงเหล่านี้ก็จะถูกส่งต่อไปยังตัวตรวจจับที่เรียกว่า CCD (Charge Coupled Device) ซึ่งโดยปกติตัว CCD มักจะเป็นสารประกอบของซิลิกอนที่มีค่าความไวสูง ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงหลักการทำงานของ Dispersive Raman

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. FT-Raman โดยการทำงานจะมีอุปกรณ์สำคัญคือ interferometer เพื่อทำการแยกลำแสงรามาที่ตรวจวัดได้เป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งจะเคลื่อนผ่านตัวแยกแสงออกไปยังกระจกที่เลื่อนได้ ส่วนลำแสงอีกส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนไปยังกระจกที่อยู่กับที่ โดยลำแสงทั้งสองส่วนนี้จะรวมกันอีกครั้งหนึ่งโดยใช้ชุดแยกแสงชุดเดิม และเนื่องจากสัญญาณทั้งสองส่วนเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงทำให้สัญญาณที่ได้มีการรวมกันและหักล้างกันไปด้วย โดยอาศัยการคำนวณจากคอมพิวเตอร์ก็จะได้สัญญาณสเปกตรัมออกมา โดยมีหลักการแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการทำงานของ FT-Raman

2.9 การศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy : AFM) [24]

AFM เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันทั้งในงานทางด้านวัสดุศาสตร์และชีววิทยาในทางวัสดุศาสตร์ เทคนิคนี้ใช้ในการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุชนิดต่างๆ ตลอดจนถึงสมบัติทางพื้นผิว

เครื่อง AFM ใช้หลักการทำงาน คือ การวัดอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโพรบวัดกับพื้นผิว โดยประกอบด้วยลำแสงเลเซอร์จับจ้องที่ปลายโพรบวัดตรงตำแหน่งเข็มวัดเพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงสัญญาณจังหวะของการเคลื่อนที่ของเข็มเมื่อเกิดแรงกระทำ (attractive และ repulsive interaction) กับพื้นผิว ลำแสงที่สะท้อนจากหัวโพรบวัดนี้จะวิ่งตรงไปยังดีเทคเตอร์แบบโฟโตไดโอด (photodiode detector) แล้วแปลงข้อมูลสัญญาณนี้เป็น

รูปภาพพื้นผิวและสมบัติต่างๆ ของพื้นผิว นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์เฟสโดยอาศัยความแตกต่างของความแข็งตึงและมอดุลัสของพื้นผิวที่ตำแหน่งต่างๆ ทำให้สามารถวิเคราะห์ส่วนประกอบและการจัดตัวของโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุผสมได้ ข้อมูลที่ได้จากการวัดความแตกต่างขององศาเฟส ($\Delta\phi$) ที่แสดงเป็นความเข้มของสีที่ปรากฏในรูปภาพมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งตึง (stiffness) หรือค่ามอดุลัส (modulus) ตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\Delta\phi = \frac{S}{K} \alpha E^{\frac{1}{2}} \sqrt{A} \quad (2.9)$$

เมื่อ S คือ ความแข็งตึงของพื้นผิว (surface stiffness)

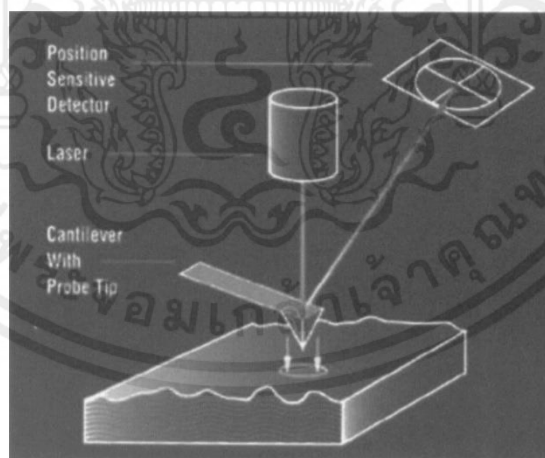
Q คือ แฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor)

K คือ ค่าคงที่ของสปริงของโพรบวัดซึ่งขึ้นกับลักษณะเฉพาะของวัสดุ

E คือ ค่ามอดุลัส

A คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างปลายเข็มกับพื้นผิวตามลำดับ

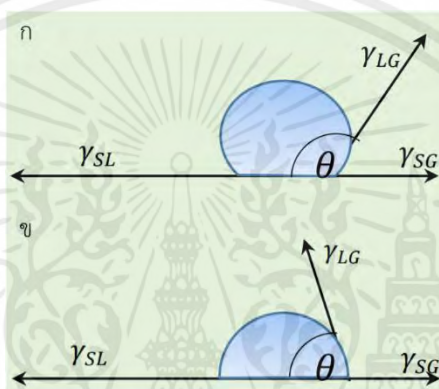
จากสมการนี้จะเห็นว่ายิ่งพื้นผิวมีค่ามอดุลัสแตกต่างกันมากเท่าใดก็จะทำให้เฟสปรากฏเป็นเฉดสีต่างกันมากเท่านั้น จากข้อมูลนี้ทำให้เราสามารถวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของโครงสร้างของวัสดุที่กำลังศึกษาได้



รูปที่ 2.15 แสดงส่วนประกอบหลักของเครื่อง AFM

2.10 การศึกษามุมสัมผัสด้วยเทคนิคบนพื้นผิวที่เปียกน้ำ [25]

น้ำเป็นของเหลวชนิดหนึ่งที่หยดน้ำมีแนวโน้มที่จะมีรูปร่างแผ่แบนและกระจายตัวเป็นพื้นผิวที่เรียกว่า พื้นผิวเปียกน้ำ (Hydrophilic Surfaces) โดยรูปร่างของหยดน้ำนี้จะแสดงให้เห็นว่าน้ำหรือของเหลวมีการยึดเกาะกับพื้นผิวมากน้อยเพียงใดโดยสามารถวัดได้จากมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวกับของเหลว มุมสัมผัสดังกล่าวสามารถนำมาอธิบายเกี่ยวกับหลักการความเปียกน้ำและไม่เปียกน้ำของพื้นผิว



รูปที่ 2.16 แสดงมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นเนื่องจากรอยต่อระหว่างสถานะของแข็ง ของเหลวและก๊าซ

ก) มุมสัมผัสมากกว่า 90 องศาและ ข) มุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา

โดยกระบวนการในการวัด คือ การสังเกตลักษณะหยดน้ำจากด้านข้าง ซึ่งถูกหยดบนพื้นผิวที่วางอยู่ในแนวราบ โดยจะทำการสังเกตและหาเส้นโค้งรอบวงของหยดน้ำที่มาสัมผัสกับพื้นผิวดังรูปที่ 2.16 มุมระหว่างเส้นรอบวงของหยดน้ำกับพื้นผิวนี้เรียกว่ามุมสัมผัส (Contact Angle) มุมสัมผัสนี้จะมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ การหาค่ามุมสัมผัสนี้จะใช้สมการของยังค์ (Young's Equation) เมื่อ γ คือพลังงานอิสระที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างของแข็ง (S) ของเหลว (L) และก๊าซ (G) ดังสมการต่อไปนี้

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{LS}}{\gamma_{LG}} \quad (3.0)$$

พลังงานอิสระนี้ยังสามารถอธิบายได้จากหลักการพลังงานอิสระในระบบที่สมดุลเนื่องจากการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคจาก 2 สถานะ โดยพลังงานนี้ยังเกี่ยวข้องกับความตึงผิว (Surface Tension) ซึ่งเป็นตัวแปรในการอธิบายถึงหน่วยของพลังงานต่อพื้นที่ผิว (จูล/เมตร²) และยังใช้ในการอธิบายถึงแรง

อันตรกิริยาระหว่างของเหลวกับพื้นผิว เช่น แรงเชื่อมแน่น (Cohesion) ซึ่งจะยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารในสถานะเดียวกันเข้าด้วยกันและแรงยึดติด (Adhesion) จะยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารระหว่าง 2 สถานะเข้าด้วยกัน หดน้ำบนพื้นผิวที่มีมุมสัมผัสน้อยกว่า 90° ($\theta < 90^\circ$) ลักษณะหยดน้ำจะแผ่แบนกระจายตัวบนพื้นผิว ซึ่งถูกเรียกว่า การเปียกนั้นหมายความว่าแรงยึดติดระหว่างของเหลวกับพื้นผิวนั้นมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นที่เกิดระหว่างของเหลวด้วยกัน แต่ถ้าหยดน้ำบนพื้นผิวมีมุมมากกว่า 90° ($\theta > 90^\circ$) จะถือว่าพื้นผิวดังกล่าวเป็นพื้นผิวไม่เปียกน้ำ นั่นคือแรงยึดติดระหว่างของเหลวกับพื้นผิวมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่น ทั้งนี้ ถ้ามุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวกับของเหลวมีค่ามากกว่า 150° ($\theta > 150^\circ$) จะเรียกพื้นผิวดังกล่าวว่าเป็นพื้นผิวไม่เปียกน้ำอย่างยิ่งยวด (Super Hydrophobic)



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงการดำเนินการ ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวกับการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS และการวัดลักษณะเฉพาะ *I-V* ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi₂/Si ในที่มีดและภายใต้การฉายแสงที่อุณหภูมิต่างกัน

3.1 การเคลือบฟิล์ม NC-FeSi₂ โดยวิธี RFMS

การเคลือบฟิล์มบาง FeSi₂ ด้วยวิธี RFMS ถูกทำโดย ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรสและนักศึกษาชาวญี่ปุ่น NC-FeSi₂ เคลือบบนฐานรอง Si(111) ชนิดที่อุณหภูมิต้องแสดงเงื่อนไขในการเคลือบดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบาง NC-FeSi₂ โดยวิธี RFMS

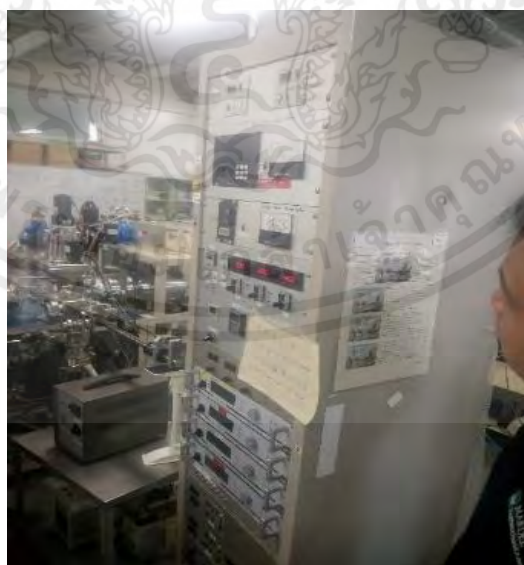
Base Pressure	1×10^{-5} Pa
Discharge pressure	2.66×10^{-1} Pa
Ar gas flow	15 sccm
Sputtering Power	20 W
Substrate	Cz-P-Si (111)
Substrate temperature	Room temperature
Thickness (NC-FeSi ₂)	300 nm

3.2 การใช้เครื่อง RFMS

ในการเคลือบฟิล์มบาง NC-FeSi₂ แสดงเครื่อง RFMS ดังรูปที่ 3.1 โดยที่ตรงกลางเป็นภาชนะสุญญากาศสำหรับใส่ชิ้นสารตัวอย่าง ส่วนทางด้านล่างเป็นตัวสำหรับควบคุมแรงดันภายในภาชนะ ด้วยวิธีนี้มีปั๊มกลโรตารีและเทอร์โบปั๊มทำหน้าที่ลดแรงดันอากาศเพื่อให้ในภาชนะเป็นสุญญากาศ



รูปที่ 3.1 รูปภาชนะสุญญากาศของเครื่อง RFMS

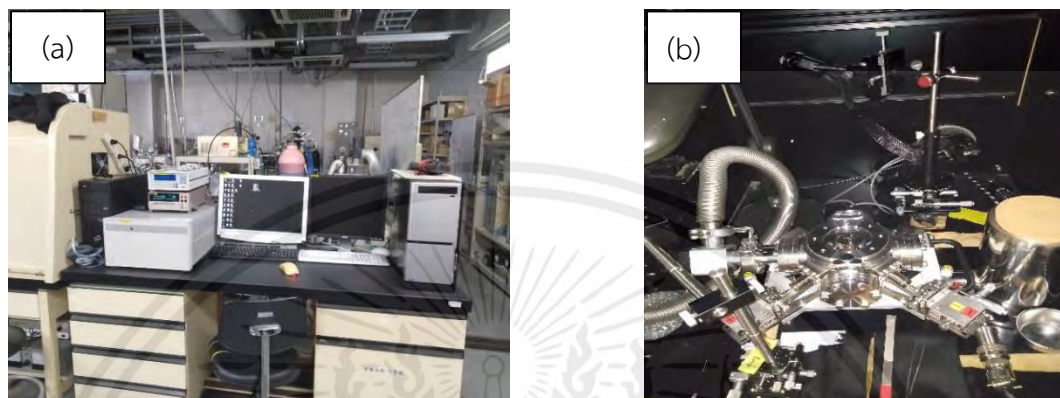


รูปที่ 3.2 เครื่อง RF ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง NC-FeSi₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

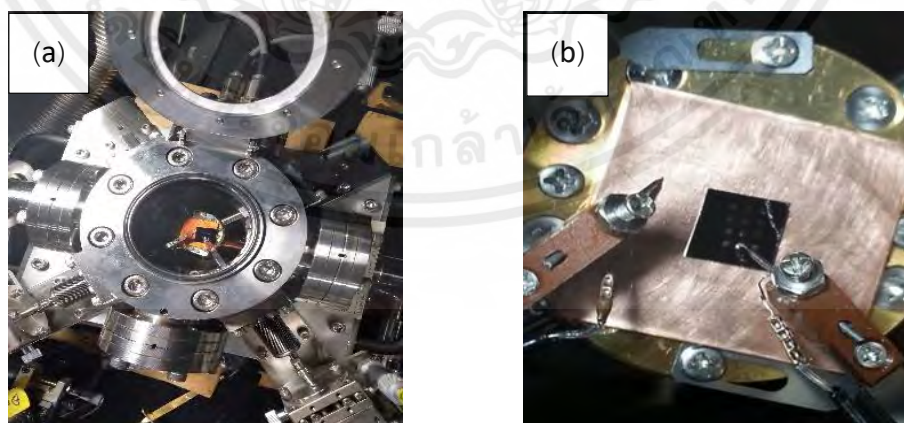
3.3 การวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I - V)

นำสารตัวอย่างใส่ในภาชนะที่สามารถทำเป็นสุญญากาศดังรูปที่ 3.3(b) โดยวางบนแผ่นทองแดงให้โพรบ (probe) ตัวแรกสัมผัสกับขั้วด้านหน้าและโพรบตัวที่สองสัมผัสกับแผ่นทองแดง



รูปที่ 3.3 (a) เครื่องวัดค่า I - V และ (b) ภาชนะที่ใส่ชิ้นสารตัวอย่าง

จากรูปที่ 3.4 (a) และรูปที่ 3.4 (b) เมื่อใส่สารตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว ให้นำโพรบด้านที่เป็นบวกสัมผัสที่อิเล็กโทรดโดยการทำให้โพรบสัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรดนั้นต้องใช้สมาธิอย่างมากเนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดมีขนาดเล็ก และตัวโพรบนั้นก็เล็กและเปราะบางมากอาจจะทำให้เกิดความเสียหายได้ถ้าออกแรงหมุนเลื่อนโพรบแรงเกินไป จากนั้นทำการปิดฝาในภาชนะสุญญากาศแล้วทำการเปิดเครื่องดูดอากาศทำการปิดไฟภายในพื้นที่ที่ต้องการทำการปิดฝาครอบเพื่อไม่ให้มีแสงไปรบกวนขณะทำการวัดแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 (a) ภาพแสดงภาชนะที่ใส่ชิ้นงาน (b) ภาพแสดงโพรบที่ใช้วัดค่า I - V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การวัดลักษณะเฉพาะ $I-V$ ในที่มีดและฉายแสงเลเซอร์

ในการวัดค่า I และ V โดยใช้เครื่อง Keithley 2400 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ใช้ทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์สำหรับวัดค่า $I-V$ and $C-V$ ชื่อว่า E4980A Control Software



รูปที่ 3.5 Keithley 2400 สำหรับการวัดค่า $I-V$

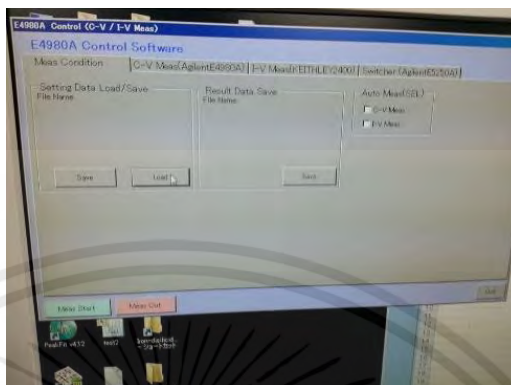
โดยเริ่มแรกทำการเปิดเครื่อง uninterruptible power supply (UPS) หรือเครื่องสำรองไฟ หลังจากนั้นเปิดเครื่อง Keithley 2400 สำหรับการวัดค่า $I-V$ แล้วตั้งค่าโปรแกรมสำหรับการวัดค่าโดยเริ่มจากเข้าโปรแกรม E4980A Control Software ดังรูปที่ 3.6



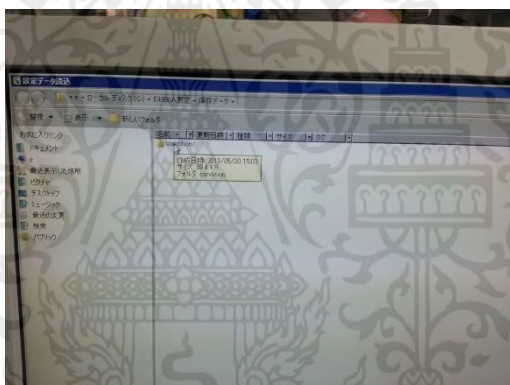
รูปที่ 3.6 โปรแกรม $I-V$ and $C-V$ สำหรับใช้คู่กับ Keithley 2400 เพื่อวัดค่า $I-V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

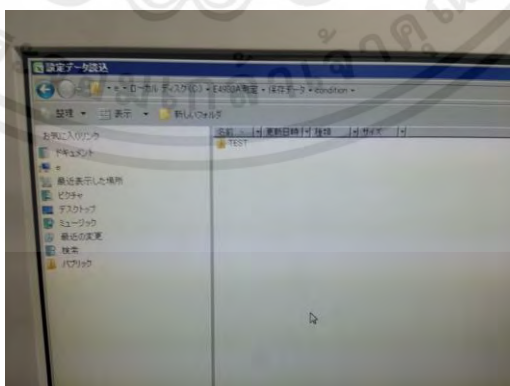
จากรูปที่ 3.7 เมื่อเข้าโปรแกรมวัดค่า I-V แล้วไปที่คำสั่ง Load > Condition > Test แล้วเลือก โหมดวัด C-V และ I-V แล้วเลือกวัดเฉพาะค่า I-V ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.7 รูปแสดงโปรแกรม E4980A Control Software ที่ใช้วัดค่า I-V

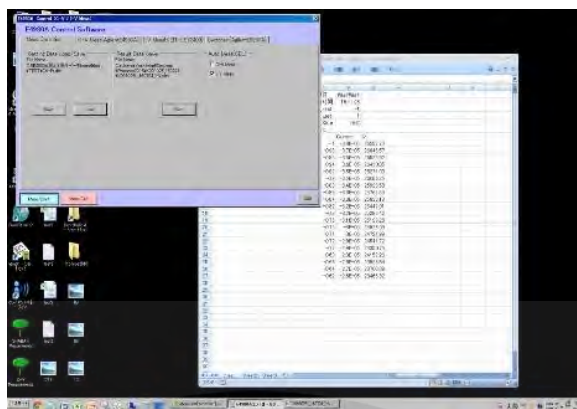


รูปที่ 3.8 เลือกโฟลเดอร์ Condition

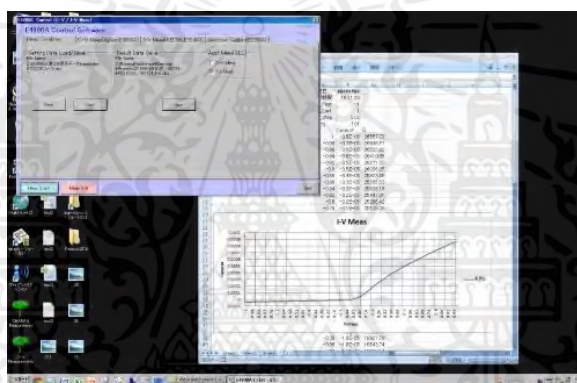


รูปที่ 3.9 แสดงการเลือกโฟลเดอร์ TEST เพื่อเลือกโหมดในการวัดค่า

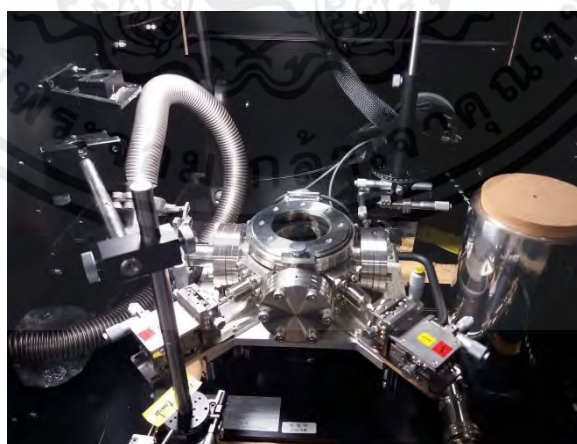
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้ในรูปของตาราง Excel

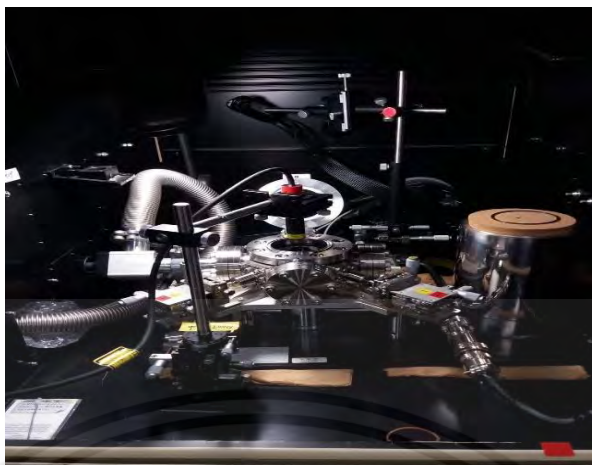


รูปที่ 3.13 แสดงรูปกราฟ I-V เมื่อทำการวัดค่าแล้ว



รูปที่ 3.14 แสดงรูปการวัด I-V ในที่มีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



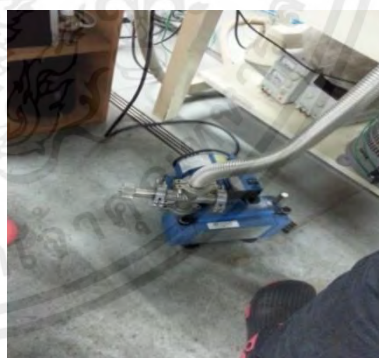
รูปที่ 3.15 แสดงรูปการวัด $I-V$ เมื่อทำการฉายแสงเลเซอร์

3.3.2 การวัดลักษณะเฉพาะ $I-V$ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การวัดโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินี้ต้องทำให้ภาชนะที่ใส่ชิ้นสารตัวอย่างเป็นภาชนะสุญญากาศก่อน โดยจากรูปที่ 3.16 จะใช้ปั๊มกลโรตารีในการสูบอากาศออก ในขั้นตอนแรกทำการปิดวาล์วแยกที่อยู่ข้างๆ ภาชนะเสียก่อน และจากนั้นจึงทำการเปิดปั๊มกลโรตารีสังเกตได้จากเสียงปั๊มที่ตั้งแสดงว่าปั๊มทำงานแล้ว แล้วค่อยๆ เปิดวาล์วที่ตัวปั๊มเพื่อให้สูบอากาศออกโดยต้องเปิดทีละน้อยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดูดของปั๊มกระทบกับชิ้นสารตัวอย่าง



(a)

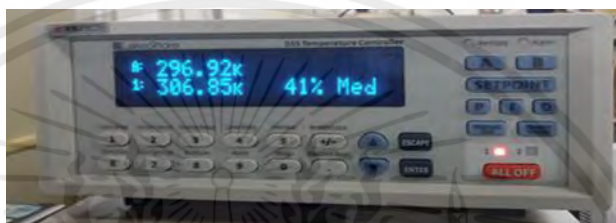


(b)

รูปที่ 3.16 (a) และ (b) แสดงการหมุนวาล์วโรตารีปั๊มเพื่อลดแรงดันอากาศในภาชนะ

เมื่อทำให้ภายในภาชนะเป็นสุญญากาศแล้ว ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 เคลวิน ถึง 150 เคลวิน โดยใช้เครื่อง 335 Temperature Control ดังรูปที่ 3.17 ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิ เริ่มต้นโดยทำการวัดที่อุณหภูมิสูงก่อน ขั้นแรกตั้ง set point ไว้ที่ 300 เคลวิน โดยการกดปุ่ม heater

range > medium ซึ่งเป็นความละเอียดในการวัดระดับกลาง (ตัวเครื่องสามารถวัดได้สามระดับคือ high, medium, low) จากนั้นกดปุ่ม enter จะทำให้อุณหภูมิในภาชนะสุญญากาศสูงขึ้นซึ่งในช่วงนี้จะต้องใช้เวลานานพอสมควรในขณะที่รออุณหภูมิให้สูงขึ้น โดยจะทำการลดอุณหภูมิทีละ 10 เคลวิน ตั้งแต่ 300, 290, 280, ..., 150 เคลวิน โดยในจอแสดงผลของเครื่องจะแสดงอุณหภูมิอยู่สองค่า ที่ค่าด้านบนเป็นค่าอุณหภูมิของตัวเครื่อง ส่วนค่าด้านล่างเป็นอุณหภูมิภายในภาชนะ โดยควรจะรอให้อุณหภูมิของทั้งตัวเครื่องและในภาชนะมีค่าใกล้เคียงกันแล้วจึงทำการวัด แล้วกดปุ่ม Trigger ที่เครื่อง Agilent E4980A แล้วรอให้ข้อมูล Run จนเสร็จแล้ว Save File



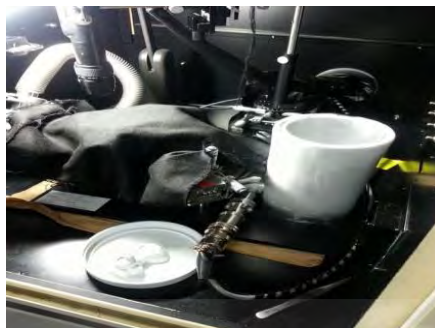
รูปที่ 3.17 เครื่อง 335 Temperature Control ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ

จากรูปที่ 3.18 ในกรณีที่วัดค่าที่อุณหภูมิต่ำจะใช้ไนโตรเจนเหลวช่วยในการลดอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึงอุณหภูมิห้องคือ 300 เคลวิน ต้องใส่ไนโตรเจนเหลวลงไปในแท่งรูปทรงกระบอกข้างๆ ภาชนะสุญญากาศเพื่อลดอุณหภูมิภายในภาชนะดังรูปที่ 3.20 เนื่องจากในช่วงต่ำกว่าอุณหภูมิห้องนี้ อุณหภูมิจะลดลงยากมากจึงต้องมีไนโตรเจนใส่เข้าไปและทำการวัดค่าเมื่ออุณหภูมิลดถึงค่าที่ต้องการ ข้อควรระวังในการใส่ไนโตรเจนคือถ้าใส่มากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจนทำให้ไม่สามารถวัดค่า I-V ที่ช่วงอุณหภูมิที่ต้องการได้



รูปที่ 3.18 แสดงการจัดการไนโตรเจนเหลวเพื่อใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แสดงหลังจากใส่ไนโตรเจนเหลวในภาชนะทรงกระบอกจะมีน้ำแข็งเกาะรอบภาชนะ

3.4 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

ฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมได้จากเทคนิค RFMS โดยจะมีการวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของฟิล์มบางที่สภาวะต่างกันเครื่องมือตรวจสอบมีดังนี้

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)
2. เอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD)
3. เทคนิคทางรามานสเปคโตรสโคปี (RAMAN)
4. กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)
5. เทคนิคการวัดมุมสัมผัส (Contact Angle)

3.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถูกใช้สำหรับตรวจสอบฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เงื่อนไขในการเคลือบโดยวิธี RFMS โดยดูลักษณะพื้นผิว top-view และ ความหนาของฟิล์มที่ 300 nm



รูปที่ 3.20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ติดตั้งที่ศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 เอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐานซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) ใช้วิเคราะห์รูปแบบความเป็นโครงสร้างผลึกของฟิล์ม



รูปที่ 3.21 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ ติดตั้งที่ศูนย์เครื่องมือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.3 เทคนิคทางรามานสเปกโตสโกปี

กล้องรามานสเปกโตสโกปี ถูกใช้สำหรับตรวจสอบโครงสร้างฟิล์มบาง NC-FeSi_2 ที่เงื่อนไขในการเคลือบโดยวิธี RFMS โดยใช้ตรวจสอบหรือตรวจวัด โครงสร้างของฟิล์มบาง NC-FeSi_2 ด้วยรามานสเปกตรัมโดยเครื่องดิสเปอร์ซิฟรามานไมโครสโคป Bruker รุ่น Senterra II ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

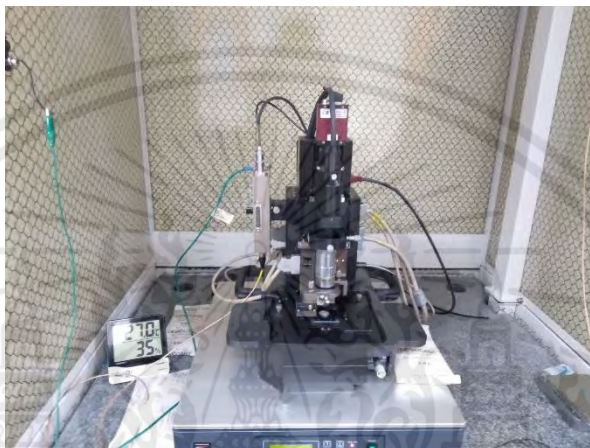


รูปที่ 3.22 เครื่องรามานสเปกโตสโกปีติดตั้งที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ถูกใช้เป็นเทคนิคสำหรับตรวจสอบสภาพพื้นผิวของโดยหลักการพื้นฐานคือ การใช้เข็มตรวจวัดขนาดเล็กทำจากซิลิคอนไนไตรด์เคลื่อนที่กราดไปทั่วบริเวณต่างๆ ของบริเวณผิวฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เงื่อนไขในการเคลื่อนโดยวิธี RFMS โดยมีเพียโซอิเล็กทริกสแกนเนอร์ เป็นตัวควบคุม



รูปที่ 3.23 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ติดตั้งที่ศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.4.5 เทคนิคการวัดมุมสัมผัส (Contact Angle)

เทคนิคการวัดมุมสัมผัส เป็นการวัดมุมที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นสัมผัสพื้นผิวกับหยดน้ำบนหน้าผิวของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ เงื่อนไขในการเคลื่อนโดยวิธี RFMS ซึ่งค่ามุมสัมผัสนี้จะสัมพันธ์กับแรงยึดติดระหว่างของแข็ง-ของเหลว และแรงเชื่อมแน่นระหว่างของเหลว-ของเหลวที่กระทำบนหยดน้ำและมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา ถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า 90 องศา นั่นคือพื้นผิวของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ เงื่อนไขในการเคลื่อนโดยวิธี RFMS จะเปียกได้ยาก แต่ถ้าค่ามุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่า 90 องศาพื้นผิวนั้นจะมีคุณสมบัติเปียกน้ำ



รูปที่ 3.24 เครื่องวัดมุมสัมผัส ติดตั้งที่ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ สจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

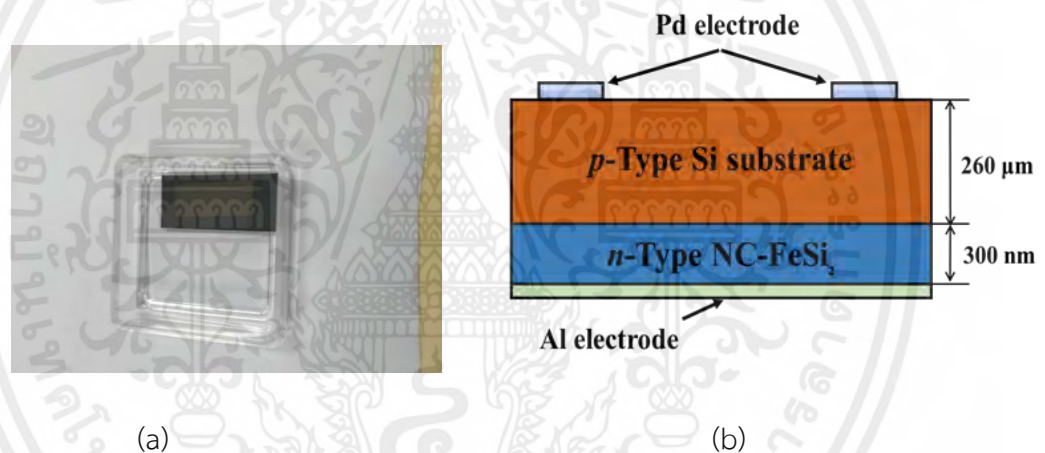
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองของสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS และลักษณะเฉพาะของ *I-V* ที่ถูกวัดในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300-150 K ในที่มีดและสภาวะการฉายแสง

4.1 ลักษณะฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ NC-FeSi₂ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการ RFMS

จากรูปที่ 4.1 เป็นการแสดงให้เห็นถึงลักษณะของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่ได้จากการเตรียมโดยวิธี RFMS

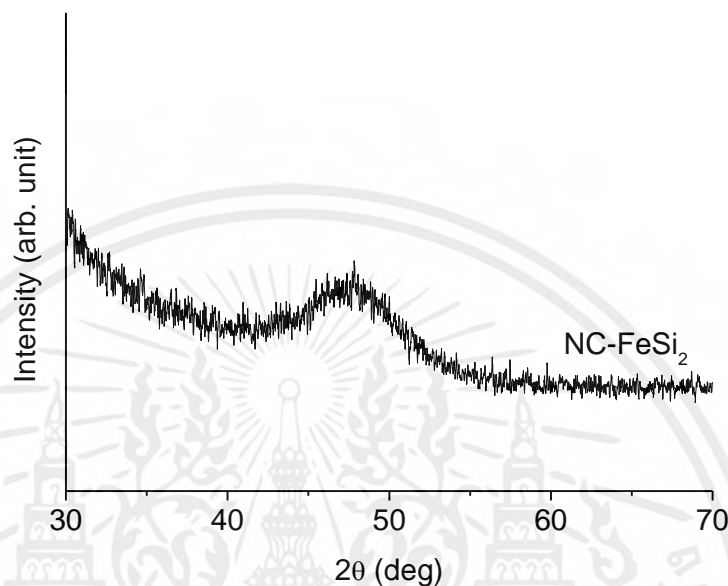


รูปที่ 4.1 (a) แสดงลักษณะของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ซึ่งเคลือบบนฐานรอง Si ที่เตรียมโดยวิธี RFMS และ (b) แสดงลักษณะรอยต่อวิวิธพันธ์ของ NC-FeSi₂/Si พร้อมทั้งอิเล็กโทรดที่เตรียมโดยวิธี RFMS

4.2 ผลการศึกษา XRD ของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่ปลูกบนฐานรองรับ Si ที่เตรียมโดยวิธี RFMS

รูปที่ 4.2 แสดงถึงรูปแบบ XRD ของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่ถูกสังเคราะห์ผ่านวิธีการเคลือบด้วยเทคนิค RFMS ณ อุณหภูมิห้องซึ่งถูกวัดที่มุม 4 องศา จากรูปที่ 4.2 พบว่าการจัดเรียงตัวของผลึกมีการจัดเรียงตัวที่มีความเข้มไม่มากนักที่บริเวณช่วงการตอบสนอง 40 ถึง 50 องศา โดยลักษณะการเกิดของพีค ณ บริเวณช่วงดังกล่าวเกิดจากการรวมตัวของระนาบผลึกหลากหลายระนาบของฟิล์มบาง FeSi₂ ใน

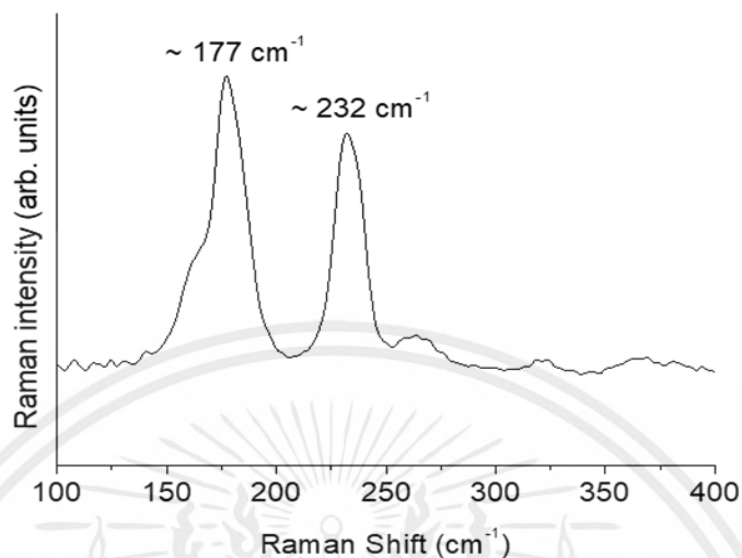
เฟสเบต้า (β -phase) ซึ่งระนาบดังกล่าวสามารถแยกออกได้เป็น $\beta(202)$, $\beta(421)$, $\beta(223)$, $\beta(004)$, $\beta(041)$, $\beta(033)$, $\beta(204)$, $\beta(024)$ และ $\beta(224)$



รูปที่ 4.2 แสดงจุดพิกของ XRD ในช่วงองศาที่ 40-50° ของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS

4.3 ผลการศึกษารามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS

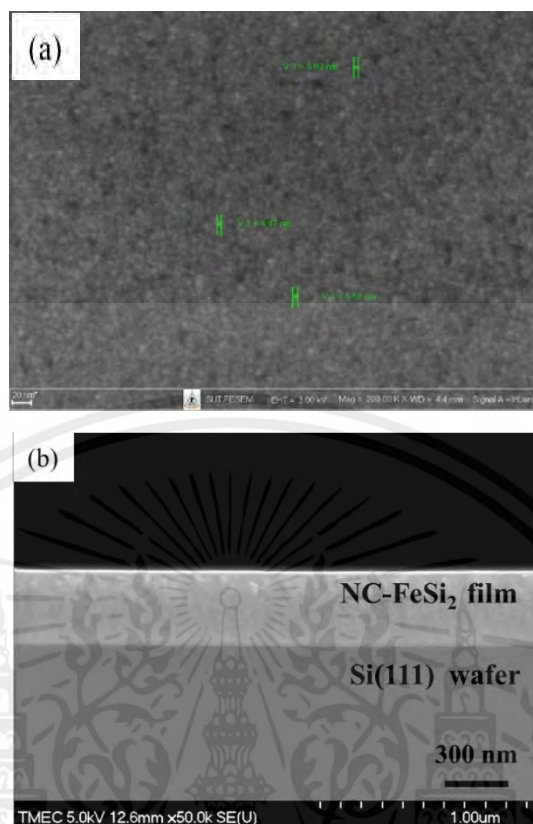
รูปที่ 4.3 แสดงภาพสเปกตรัมรามานของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่ถูกเตรียมด้วยวิธี RFMS ที่อุณหภูมิห้อง จากการวัดผลตรวจพบ 2 พีก ที่มีความเข้มของรามานสูงที่ตำแหน่ง 177 และ 232 cm⁻¹ ในช่วงการตรวจสอบที่ 100 ถึง 400 cm⁻¹ โดยทั่วไปลักษณะเฉพาะสเปกตรัมรามานของฟิล์มบาง FeSi₂ จะปรากฏพบได้ที่ตำแหน่ง 194 cm⁻¹ และ 247 cm⁻¹ ซึ่ง ณ ตำแหน่งดังกล่าวจะบ่งบอกถึงการเคลื่อนที่ของอะตอมเหล็กจากการเคลื่อนที่เชิงมุมและเชิงรัศมีของอะตอม FeSi โดยจากฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่ผู้วิจัยสังเคราะห์ขึ้นถูกพบว่าตำแหน่งการเกิดสเปกตรัมรามานเบี่ยงออกห่างจากสเปกตรัมทั่วไปของฟิล์มบาง FeSi₂ อยู่ในระยยะ 17 cm⁻¹ และ 15 cm⁻¹ จากสองพีกหลักที่เกิดขึ้นของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ โดยสาเหตุการเคลื่อนของตำแหน่งพีกดังกล่าวสามารถถูกเข้าใจได้ว่าคุณสมบัติของแลตทิซของฟิล์มบางที่อาจมีความบกพร่องของโครงผลึก สิ่งเจือปน และการผิดรูปของโครงผลึก



รูปที่ 4.3 แสดงจุดพีคจากรามานสเปกตรัมในช่วง $150\text{-}200\text{ cm}^{-1}$ และ $210\text{-}250\text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS

4.4 การศึกษาลักษณะผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบาง NC-FeSi₂

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวหน้าฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS ด้วยการใช้กล้อง FESEM รุ่น JEOL JSM 7800F ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากรูปที่ 4.4(a) ที่กำลังขยาย 200,000 เท่า จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของฟิล์มมีความราบเรียบและมีการกระจายตัวของเกรนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน โดยขนาดของเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ 5 nm ส่วนในรูป 4.4(b) แสดงภาคตัดขวางของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เคลือบอยู่บนฐานรองที่เป็น Si เวเฟอร์ จากรูปจะเห็นได้ว่าพื้นผิวของฟิล์มมีความราบเรียบ รอยร่องระหว่างชั้นของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ กับชั้นของฐานรอง Si เวเฟอร์ที่มีความคมชัดและไม่พบรอยแตกร้าวใดๆ นอกจากนี้ความหนาของฟิล์มที่ได้จากภาคตัดขวางที่ได้มีค่าประมาณ 350 nm

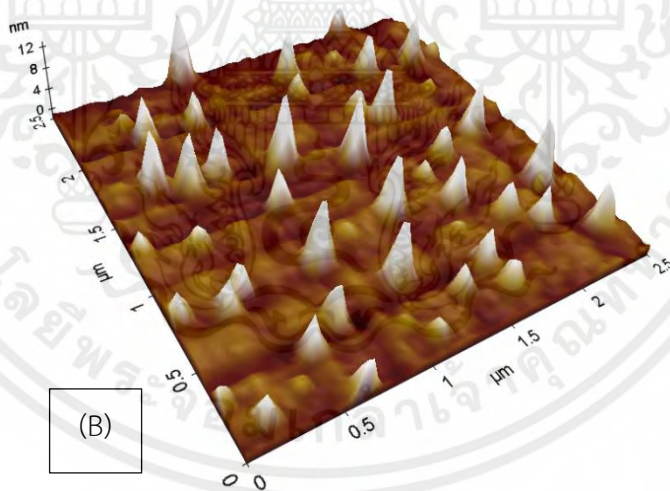
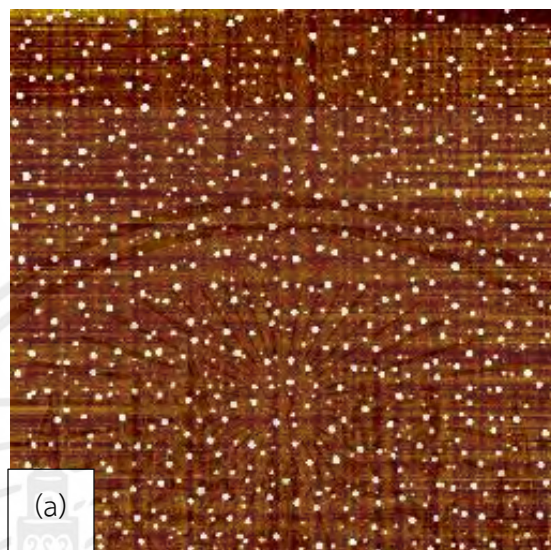


รูป 4.4 (a) แสดงผิวหน้าของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS
 (b) แสดงภาคตัดขวางของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS

4.5 การศึกษาผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่ปลูกบนฐานรองรับ Si ที่เตรียมโดยวิธี RFMS

จากการศึกษาความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม รุ่น Park systems AFM XE-120 ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รูป 4.5 (a) แสดงพื้นผิวใน 2 มิติ และ (b) ในมุมมอง 3 มิติ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้สามารถหาค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความขรุขระ (Root Mean Square (RMS) Roughness) อยู่ที่ประมาณ 4.5 nm ซึ่งค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าของพื้นผิวฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี FTDCS ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะว่าในการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิค FTDCS นั้น แทนวางฐานรองรับจะถูกจัดวางแยกออกจากบริเวณของพลาสมา ซึ่งจะส่งผลให้การทำลายพื้นผิวที่เกิดขึ้นจากอนุภาคของพลาสมามีค่าน้อย ในทางตรงกันข้ามในเทคนิค RFMS ฐานรองรับได้รับอิทธิพลจากพลาสมา

โดยตรง เพราะฐานรองรับถูกจัดวางอยู่ในบริเวณที่เกิดพลาสมาจากการสปัตเตอร์ นี่น่าจะเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่า RMS ของความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดย RFMS มีค่าสูงกว่าวิธี FTDCS



รูปที่ 4.5 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางของ NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS (a) ในมุมมอง 2 มิติ และ (b) ในมุมมอง 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การศึกษาความเปียกด้วยการวัดมุมสัมผัสของฟิล์มบาง NC-FeSi₂

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการวัดค่ามุมสัมผัสของพื้นผิวฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS กับหยดน้ำด้วยเครื่อง Contact angle measurement รุ่น OCA 20 ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากรูปที่ 4.6 แสดงหยดน้ำทำมุมสัมผัสกับผิวหน้าของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสด้านขวากับด้านซ้ายเท่ากับ 93.5 องศา ในกรณีที่มีมุมสัมผัสที่วัดได้มีค่ามากกว่า 90 องศา แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS มีลักษณะพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Surface)

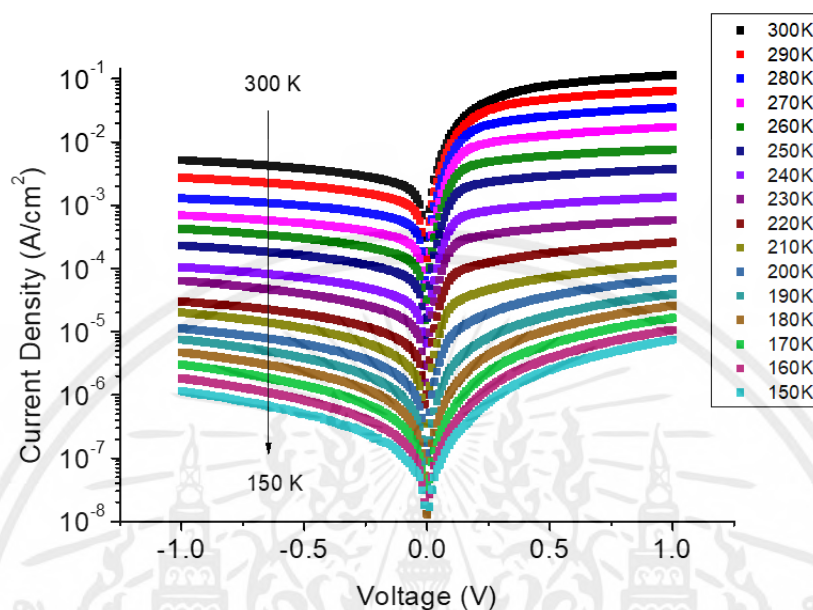


รูปที่ 4.6 แสดงมุมสัมผัสของหยดน้ำที่กระทำลงบนผิวฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS

4.7 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดความหนาแน่นกระแส-แรงดัน (J-A) ของรอยต่อเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi₂/Si

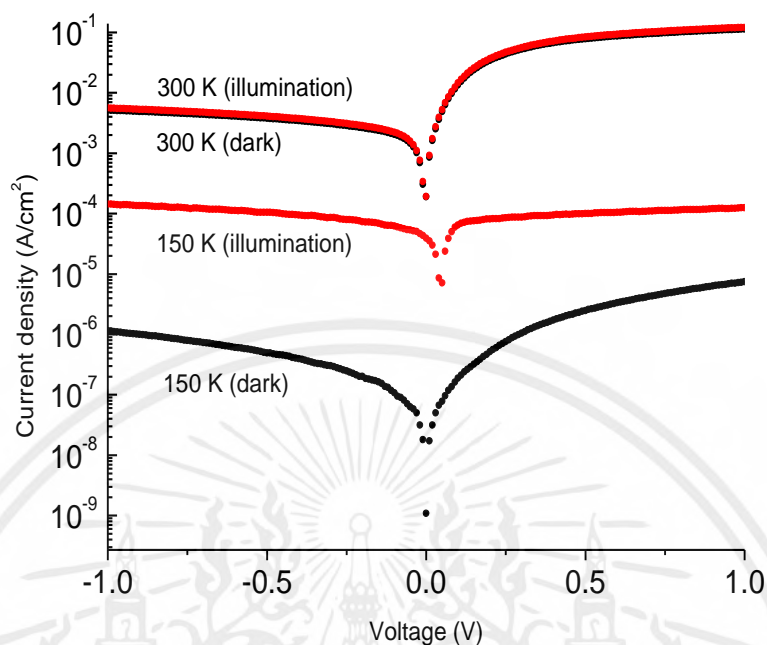
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดลักษณะเฉพาะระหว่างกระแสไฟฟ้าในขณะไม่มีการฉายแสงกับแรงดันไฟฟ้าของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น NC-FeSi₂/Si ที่เตรียมโดยวิธี RFMS ในช่วงอุณหภูมิ 150 ถึง 300 K ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 300 K เฮเทอโรโรจันซ์ชั้นที่สร้างขึ้นแสดงคุณสมบัติการเรียงกระแสคล้ายคลึงกับพี-เอ็นจันซ์ชั้นทั่วไป และมีกระแสไฟฟ้ารั่วในด้านการไบอัสลบที่สูง ทั้งนี้หน้าจะเป็นเพราะว่าความบกพร่องของสถานะพื้นผิว (Interface State) ที่บริเวณเฮเทอโรโรจันซ์ชั้น เมื่ออุณหภูมิลดลง

กระแสรั่วตัวกล่าวจะมีค่าลดลง ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะว่าความเข้มข้นของพาหะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมี่ค่า
ลง



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นของ NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS ภายใต้อุณหภูมิต่างกัน

รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะเฉพาะของ $J-V$ ของเฮเทอโรโรจันซ์ชั้นที่สร้างขึ้นที่อุณหภูมิต่างกัน 300 K และ 150 K ในสภาวะที่ไม่มีการฉายแสงและฉายแสงในย่านใกล้อินฟราเรด (Near-Infrared) พบว่าที่อุณหภูมิต่างกัน 300 K กระแสไฟฟ้าภายใต้การฉายแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่ไม่ได้ฉายแสง ในขณะที่อุณหภูมิต่างกัน 150 K กระแสไฟฟ้าจะมีความแตกต่างอย่างชัดเจน ผลการทดลองที่ได้นี้น่าจะเกิดมาจากการลดลงของกระแสรั่วเมื่อมีการลดอุณหภูมิต่างกัน



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง J - V ของเฮเทอเจอร์โรจังก์ชันที่สร้างขึ้น ภายใต้สภาวะที่ไม่ฉายแสงและฉายแสงที่อุณหภูมิที่ 150 K และ 300 K

จากผลการวัดลักษณะเฉพาะของ J - V ภายใต้สภาวะที่ไม่ฉายแสงจะสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรที่สำคัญของเฮเทอเจอร์โรจังก์ชันที่สร้างขึ้น อันได้แก่ ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (Ideality factor: n) และ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ (Barrier height: ϕ) จาก โดยเราใช้หลักการเทอร์มิโอนิคมิชัน (Thermionic Emission (TE) Theory) โดยค่า n นั้นหาได้จากค่าความชันของส่วนที่เป็นเส้นตรงของ $\ln J$ - V ในกรณีการไบอัสบวก และนำค่าความชันที่ได้มาแทนค่าในสมการที่ (4.8) ในการหาค่า ϕ นั้น จะใช้สมการที่ 4.9 โดยจะตรงหาค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัว (Saturation Current Density: J_0) มาก่อนและจะสามารถหาค่า ϕ ได้จากสมการที่ 4.9

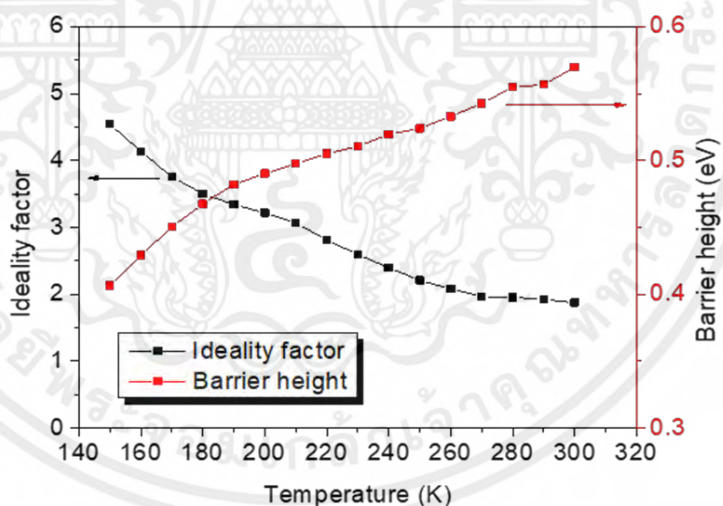
$$\frac{dV}{d(\ln(J))} \times \frac{q}{Tk} = \frac{1}{\text{slope}} \times \frac{q}{Tk} = n \quad (4.8)$$

$$J_0 = \exp\left(\frac{-q\phi_b}{Tk}\right) \times T^2 A^* \quad (4.9)$$

โดย k คือ ค่าคงที่โบลทซ์มันน์ (Boltzmann constant) ซึ่งมีค่า $1.3806505 \times 10^{-23}$ J/K

q คือ ประจุของอิเล็กตรอน (electron's charge) ซึ่งมีค่า 1.60×10^{-19} C

รูปที่ 4.9 แสดงค่าของ n และ ϕ ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 K ถึง 150 K จากสมการที่ 4.8 n ถูกพบว่ามีค่าเป็น 1.87 ที่อุณหภูมิ 300 K และค่า n แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิ 300 K ถึง 260 K สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการรวมตัวกันของพาหะเป็นกระบวนการขนส่งพาหะที่โดดเด่นสำหรับช่วงอุณหภูมิ 300 K ถึง 260 K ทว่าที่อุณหภูมิ 250 K ค่า n ที่คำนวณได้มีค่าเป็น 2.22 และเพิ่มขึ้นไปสู่ 4.54 เมื่ออุณหภูมิลดลงไปสู่ 150 K จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ากลไกการขนส่งพาหะของเฮเทอโรโรจันชั้นถูกควบคุมโดยกระบวนการทะลุผ่านของพาหะเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 250 K จากสมการที่ 4.9 ค่า ϕ ที่ถูกพบมีค่าว่ามีค่าเท่ากับ 0.57 eV โดย J_0 มีค่าเท่ากับ 1.41×10^{-3} A/cm² ที่อุณหภูมิ 300 K และค่า ϕ จะลดลงไปเป็น 0.42 eV โดย J_0 มีค่าเป็น 2.85×10^{-8} A/cm² เมื่ออุณหภูมิลดลงสู่ 150 K ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของค่า n และการลดลงของค่า ϕ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ รวมทั้งความไม่เป็นรูปแบบเดียวกันของการกระจายตัวของพาหะในบริเวณพื้นผิวรอยต่อ



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า n และ ϕ ของรอยต่อเฮเทอโรโรจันชั้นของ NC-FeSi₂/Si ที่เตรียมโดยวิธี RFMS

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษา n-type NC-FeSi₂/p-type Si เฮเทอโรโรจิงค์ชั้น ถูกเตรียมผ่านทาง การสปีดเตอร์ ด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่อุณหภูมิห้อง จากรูปแบบของ XRD แสดงจุดสูงสุดที่กว้างในช่วง 40-50 °เนื่องจากการซ้อนทับของยอดการเลี้ยวเบนหลายจุดใน β -FeSi₂ อาทิเช่น $\beta(202)$, $\beta(421)$, $\beta(223)$, $\beta(004)$, $\beta(041)$, $\beta(033)$, $\beta(204)$, $\beta(024)$ และ $\beta(224)$ จากรูปแบบรามานของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ ทำให้ทราบตำแหน่งศูนย์กลางตั้งอยู่ที่ 177 ซม.⁻¹ และ 232 ซม.⁻¹ ในช่วงการตรวจสอบที่ 100 ถึง 400 ซม.⁻¹ โดยทั่วไป ลักษณะเฉพาะสเปกตรัมรามานของฟิล์มบาง FeSi₂ จะปรากฏพบได้ที่ตำแหน่ง 194 ซม.⁻¹ และ 247 ซม.⁻¹ ซึ่ง ณ ตำแหน่งดังกล่าวจะบ่งบอกถึงการเคลื่อนที่ของอะตอมเหล็กจากการเคลื่อนที่เชิงมุมและเชิงรัศมีของอะตอม ในด้านการศึกษาลักษณะพื้นผิวหน้าพื้นผิวของฟิล์มมีความราบเรียบและมีการกระจายตัวของเกรนอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน โดยขนาดของเกรนเฉลี่ยอยู่ที่ 5 nm จากผลการทดลองที่ได้สามารถหาค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความขรุขระของฟิล์มบาง NC-FeSi₂ อยู่ที่ประมาณ 4.5 นาโนเมตร ในด้านการศึกษามุมสัมผัสเฉลี่ยระหว่างพื้นผิวฟิล์ม NC-FeSi₂ และหยดน้ำคือ 93.5 ° ซึ่งอยู่ในช่วงของพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าพื้นผิวฟิล์มบาง NC-FeSi₂ มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ เส้นโค้งความหนาแน่นแรงดันไฟฟ้าในภายใต้ความมืดและได้รับการฉายแสงใกล้เคียงอินฟราเรด (NIR) ได้ดำเนินการในอุณหภูมิตั้งแต่ 300 ถึง 150 K พบว่ามีการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วสูงที่ 300 K และที่ 150 K กระแสไฟฟ้ารั่วลดลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะการลดลงของความเข้มข้นพาหะที่อุณหภูมิต่ำ จากการประเมินค่า n ที่ 300 K โดยการใช้ทฤษฎี TE มีค่า 1.87 และมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่ออุณหภูมิลดลงไปที่ 260 K ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการรวมตัวกันเป็นกลไกการส่งผ่านที่โดดเด่น โดยที่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 260 K ค่า n มีค่าสูงกว่า 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกการขนส่งพาหะถูกควบคุมโดยกระบวนการลอดผ่านอุโมง นอกจากนี้การตอบสนองของแสง NIR ที่ 300 K นั้นน้อยมาก ที่ 150 K อัตราส่วนระหว่างกระแสที่เกิดจากการฉายแสงและกระแสรั่วมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก นอกจากนี้ยังพบว่า ϕ มีค่า 0.57 eV ที่อุณหภูมิ 300 K และมีค่าลดลงไปสู่ 0.42 eV ที่อุณหภูมิ 150 K

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) งานวิจัยนี้ควรมีการเปลี่ยนฐานรองการปลูกฟิล์ม เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง
- 2) งานวิจัยนี้ควรเพิ่มการวัดเฮทเทอร์โรจังค์ชั้นภายใต้อุณหภูมิต่างๆ ให้มากกว่านี้โดยวิธี cryostat แทนการใช้ไนโตรเจนเหลว ซึ่งจะสามารถลดอุณหภูมิให้ต่ำลงได้มากกว่า 150 K
- 3) งานวิจัยนี้ควรใช้สารอื่นนอกจาก NC-FeSi₂ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง
- 4) ควรจัดเตรียมตัวอย่างชิ้นงานอื่นด้วยนอกจาก RFMS



เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Promros, C. Li, and T. Yoshitake, Evaluation of n-Type Nanocrystalline FeSi₂/p-Type Si Heterojunctions Prepared by Pulsed Laser Deposition as Near-Infrared Photodetectors, J. Nanosci. Nanotechnol. (2013) 13, 3577-3581.
- [2] S. Funasaki, N. Promros, R. Iwasaki, M. Takahara, M. Shaban, and T. Yoshitake, Fabrication of mesa structural n-type nanocrystalline-FeSi₂/p-type Si heterojunction photodiodes by liftoff technique combined with photolithography, Phys. Status Solidi C (2013) 10, 1785-1788.
- [3] M. Shaban, K. Kawai, N. Promros, and T. Yoshitake, n-Type Nanocrystalline-FeSi₂/p-Type Si Heterojunction Photodiodes Prepared at Room Temperature, IEEE Electron Device Lett. (2010) 31, 1428-1430.
- [4] A. Nopparuchikun, N. Promros, P. Sittimart, P. Onsee, A. Duangrawa, S. Teakchaicum, T. Nogami and T. Yoshitake, Interface-state density estimation of n-type nanocrystalline FeSi₂/p-type Si heterojunctions fabricated by pulsed laser deposition, Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol. (2017) 8, 035016-1 - 035016-6.
- [5] T. Yoshitake, M. Yatabe, M. Itakura, M. Kuwano, and Y. Tomokiyo, Appl.Phys Lett. 83,3057 (2003)
- [6] https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/262_MT10_35.pdf
- [7] Sze S.M. and Kwok K. Ng. **Semiconductor Devices Physics and Technology**. 3rd ed. United States of America : John Wiley&Sons. 2007.
- [8] Kittel C. **Introduction to Solid State Physics**. 8th ed. United States of America : John Wiley&Sons. 2005.
- [9] รัฐินัย แก้วแดง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. 2531.
- [10] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. 2530.

- [11] เอกชัย วิลามาศ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อ
วิวิธพันธ์ Cds/CdTe” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิต
วิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552. [12] Schroder D.K.
Semiconductor Material and Device Characterization. New York : John Wiley & Sons,
Inc., Publication. 1990.
- [13] สิทธิชัย โภโคยอุดม. **อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับวงจรรวมยุคใหม่**. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2551
- [14] ไกรศักดิ์ ยืนยง “การศึกษาชั้นสัมผัสอินทรีย์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์” วิทยานิพนธ์
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [15] สุริยา มีเปี่ยมสมบูรณ์ “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อประยุกต์เป็นขอตักกิตไดโอด”
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553. [16] ดุสิต เครื่องงาม. “โซลิตสเตทฟิสิกส์.” พิมพ์ครั้งที่
ที่2. กรุงเทพมหานคร: บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น.2535.
- [17] photodiode, [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>
- [18] M. Shaban, H. Kondo, K. Nakashima, and T. Yoshitake, Electrical and photovoltaic
properties of n-type nanocrystalline-FeSi₂/p-type Si heterojunctions prepared by
facing-targets direct-current sputtering at room temperature, Jpn. J. Appl. Phys.
(2008) 47, 5420–5422.
- [19] ฐิติกร จรรยาธรรม. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่เตรียมโดย
เทคนิคที่ต่างกัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิต วิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [20] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CuAlO₂
เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [21] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ณัฐพร พรหมรส “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดย วิธี
อาบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์
แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง. 2551.

- [22] มนตรีแย้มวงษ์. **ฟิลิกส์ของสารกึ่งตัวนำ**. พิมพ์ครั้งที่3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2543.
- [23].www2.mtec.or.th/th/emagazine/admin/upload/279_60.pdf?fbclid=IwAR1Xvjn7O4DzdQs2vLCKaTnhd3RsQxVHzynVQeFvXIWSNcY9NwY_jo9ng
- [24].www2.mtec.or.th/th/emagazine/admin/upload/279_60.pdf?fbclid=IwAR1Xvjn7O4DzdQs3Z2vLCKaTnhd3RsQxVHzynVQeFvXIWSNcY9NwY_jo9ng
- [25].science.srru.ac.th/kochasarnfiles/files/1_161%E0%B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%9A%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%97%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%88%E0%B9%80%E0%B8%9B%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%81%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3.pdf?fbclid=IwAR1nhoJoBdNT4XopnUximqpvLQKNzyFvYg_N9TRKtMGFLpj9qCmWXZci1Ro



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 29 เดือน พฤษภาคม พ.ศ 2562

ข้าพเจ้า นายภัทรพล สิทธิศาสตร์

รหัสประจำตัว 58051115

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ขอรับรองว่าโครงการพิเศษเรื่อง

ชื่อภาษาไทย ศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ NC-FeSi₂ ที่เตรียมโดยวิธี RFMS เพื่อประยุกต์ใช้กับเฮเทอโรจังก์ชันโฟโตไดโอดและพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ

ชื่อภาษาอังกฤษ Study of Physical properties of NC-FeSi₂ prepared by RFMS to apply the heterojunctions photodiode and a hydrophobic surface

ปีการศึกษา 2561

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักษรวินิจฉัย.....% หรือโปรแกรม Turnitin.....%

ลงชื่อ.....

(นายภัทรพล สิทธิศาสตร์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาต(ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส) การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร อาจารย์ที่ปรึกษาฯ ไปใช้