

กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  
n-ZnSe/p-Si

DC ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM OF n-ZnSe/p-Si



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  
n-ZnSe/p-Si  
DC ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM OF n-ZnSe/p-Si



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DC ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM OF n-ZnSe/p-Si



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ  
n-ZnSe/p-Si  
DC ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM OF n-ZnSe/p-Si

ชื่อนักศึกษา นางสาวรัฐกาญจน์ ประชาเชษฐ์ รหัสนักศึกษา 54050581

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง	
อ.ภารุจ บัณฑิตาวิทย์	
ผศ.ดร.ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si
ชื่อนักศึกษา	นางสาว รัฐกาญจน์ ประชาเชษฐ์ รหัสนักศึกษา 54050581
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe เป็นผลึกพหุพันธ์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก โดยที่ระนาบการเลี้ยวเบน (111) มีความเข้มสูงที่สุด จากนั้นได้ทำการศึกษาผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาความสัมพันธ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางและได้ทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง จากนั้นทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน สามารถคำนวณหา ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงโดยการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งพบว่า ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมได้แตกต่างไป จากกรณีของไดโอดในอุดมคติ โดยที่ค่าของแฟกเตอร์ในอุดมคติมีค่าเกิน 1 ซึ่งบ่งชี้ว่ากลไกการนำกระแสไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) เป็นกลไกการชดเชยกระแสที่ทุกอุณหภูมิของการทดลอง ซึ่งค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการชดเชยกระแสที่ทุกอุณหภูมิเท่ากับ 102 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนค่าความหนาแน่นของพาหะในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe สามารถคำนวณได้ จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องโดยพบว่ามีค่าประมาณ  $1.36 \times 10^{13}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

**คำสำคัญ :** ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe, ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100), ลักษณะเฉพาะของค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า, เทอร์มิออนิกอิมิสชัน

Title DC ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM OF n-ZnSe/p-Si  
Students Miss. Rattagan Prachacheat Student ID 54050581  
Degree Bachelor of Science in Applied Physics  
Department Physics  
Academic Year 2014  
Advisor Assoc.Prof. Ngamnit Wongcharoen

## ABSTRACT

In this special project, ZnSe thin films have been deposited by thermal evaporation in vacuum on slide glass substrate. The XRD analysis reveals that ZnSe thin films are polycrystalline having a cubic zincblende structure with a preferential orientation (111) plane. The morphological optical and electrical properties of ZnSe thin film were investigated using SEM, optical transmission and electrical measurements. The n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction was fabricated by thermal-evaporation in vacuum of ZnSe thin film on p-Si (100) substrate. The dark current – voltage characteristics of n-ZnSe/p-Si (100) were investigated in temperature range 20 -300 K. The basic diode parameters such as the junction barrier height, ideality factor and series resistance values can be evaluated by using the Thermionic emission theory and Cheung's method. The diode shows a non-ideal structure I-V behavior with an ideality factor greater than unity. The results indicate that the current transport mechanism in the n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction is tunneling in the whole temperature range with  $E_{00} = 102$  meV. The carrier concentration of ZnSe thin films about  $1.36 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  was deduced from the C-V measurements at room temperature.

**Keywords :** I-V Characteristics, n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction, ZnSe thin films  
Thermionic emission

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ระบบประเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในสุญญากาศ อุปกรณ์ในการวัดลักษณะเฉพาะต่างๆ ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และให้ความรู้และคำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมารวมทั้งปลูกฝังคุณธรรมที่ดั่งงามให้กับลูกศิษย์

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นในย่าน  $Cu_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ขอขอบคุณ คุณทศพร ชันตยาภรณ์ คุณชนิภรณ์ จุไรสง และ คุณณพนธ์ เดชะคำภู นักศึกษาปริญญาโทในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพโตนิคส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คุณคงกฤษณ์ ไพรวลีย์ และคุณกุลวรางค์ นุตะมาน ศิษย์เก่าปริญญาตรี ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพโตนิคส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยติดตั้งซอฟต์แวร์ในการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า และคำแนะนำในการใช้เครื่อง E4980A Agilent Precision LCR Meter สำหรับวัดค่าความนำไฟฟ้า และ ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นางสาว รัฐกาญจน์ ประชาเชษฐ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	5
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ	5
2.2 โครงสร้างผลึก	6
2.2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และ กลุ่ม VI	6
2.2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	7
2.2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	7
2.2.1.3 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe	8
2.2.1.4 โครงสร้างผลึกของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si	9
2.2.2 หลักเกณฑ์ในการระบุชื่อระนาบของผลึก	12
2.2.2.1 การระบุตำแหน่ง	12
2.2.2.2 การระบุทิศทาง	12
2.2.2.3 การระบุชื่อระนาบ	12
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	13
2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	14
2.3.2 การหาขนาดของเกรน	14
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด	15
2.5 การส่งผ่านแสง	16
2.5.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	17
2.5.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน	19
2.6 รอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำ	20
2.6.1 รอยต่อในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 รอยต่อแบบชั้นบันได	22
2.6.3 รอยต่อพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ	24
2.7 ค่าความจุไฟฟ้า	25
2.8 ลักษณะเฉพาะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้าของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อพี-เอ็น	28
2.9 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย	28
2.10 การวิเคราะห์ไดโอดอุดมคติ	29
2.10.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว	30
2.10.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น	32
2.11 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง (space-charge-region currents)	34
2.12 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	36
2.12.1 อัตราการระเหยสาร	36
2.12.2 อุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า	37
2.12.2.1 อุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นชนิดทั้งสเดน	37
2.12.2.2 อุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นชนิดแผ่นโลหะคงรูป	37
2.13 สายละลายที่ใช้ในการกัดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน	38
2.13.1 โฟแทสซีเอ็มไฮดรอกไซด์	38
2.13.2 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์	38
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	47
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	47
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100)	47
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	48
3.2 ขั้นตอนในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 การเตรียมแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ	48
3.2.2 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ	49
3.2.3 การเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	49
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	51
3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	51
3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	51
3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	51
3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	52
3.3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน และอุณหภูมิสูงในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	52
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	55
4.1 ศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	55

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	55
4.1.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	56
4.1.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	57
4.1.4 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	58
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	59
4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	59
4.2.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	66
4.2.3 ผลการศึกษาการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 - 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	75

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

- 4.2.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

78

## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

- 5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

83

- 5.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

83

- 5.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

83

- 5.1.2.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

84

- 5.1.2.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า และ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

85

- 5.1.2.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

85

- 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

85

เอกสารอ้างอิง

86

ภาคผนวก

89

ประวัติผู้เขียน

93

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ ( $I_s$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ ( $\phi_{b0}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	66
4.2	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	70
4.3	แสดงผลการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ 60 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ ในช่วง 25 - 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	76

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงค่าสภาพนำไฟฟ้าและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ	5
2.2	แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	6
2.3	แสดงโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ	7
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวียร์ทไซท์ของสารกึ่งตัวนำ	8
2.5	แสดงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe	8
2.6	แสดงภาพจำลองพันธะโควาเลนต์ของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si	9
2.7	แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ก. แสดงพันธะเตตระฮีดรัลของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ข. แสดงภาพแบบสองมิติที่มีพันธะโควาเลนต์ของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si	9
2.8	แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ใน 2 มิติ ที่อุณหภูมิต่างๆ ก. แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si 2 มิติที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 เคลวิน ข. แสดงถึงการสลายของพันธะโควาเลนต์ที่อุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน ค. แสดงถึงการเคลื่อนที่ของโฮลในผลึกเดี่ยวของธาตุ Si	10
2.9	แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ที่มีการเจืออะตอมของสารเจือของธาตุต่างๆ ก. แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb ข. แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ B	11
2.10	แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก	12
2.11	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	13
2.12	แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	14
2.13	แสดงค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	15
2.14	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
2.15	แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	17
2.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ค่าความยาวคลื่นโดยเส้นที่บจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	18
2.17	แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	19
2.18	แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ก. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ข. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ค. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์และอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	21

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.19	แสดงไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ที่เป็นแบบชั้นบันไดที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง ก. ความเข้มข้นสารเจือ ข. ความหนาแน่นของพาหะอิสระ ค. ประจุค้าง ง. สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ จ. ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ	22
2.20	แสดงโปรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ ก. แสดงค่าความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่าไม่สม่ำเสมอภายในบริเวณเขตปลอดพาหะ ข. แสดงลักษณะโปรไฟล์ของค่าสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อย	26
2.21	แสดงโครงสร้างของไดโอดของสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็นขณะถูกไบอัสไปหน้าด้วยแรงดัน $V_a$	28
2.22	แสดงการลดลงของค่าความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดยาวภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบอัสไปหน้าค่าเท่ากับ $V_a$	30
2.23	แสดงค่ากระแสโฮล (เส้นทึบ) กับ ค่ากระแสอิเล็กตรอน (เส้นประ) ในเนื้อสารด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) เนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันไบอัสไปหน้า $V_a$	31
2.24	แสดงความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็น ของไดโอดสั้นภายใต้การไบอัสไปหน้า $V_a$	33
2.25	แสดงค่าอัตราส่วนระหว่าง $x_i / x_d$ เป็นฟังก์ชันกับ ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆของรอยต่อ $p^+ - n$	36
2.26	แสดงอุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นชนิดทั้งสแตนท์ที่มีขนาดต่างๆ	37
2.27	แสดงอุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นที่มีรูปทรงที่มีขนาดต่างๆทางเรขาคณิตแบบต่างๆ	38
2.28	แสดงสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	38
2.29	แสดงพีคความเข้มของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ ไดโอดที่มีของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	40
2.30	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ของไดโอดที่มีของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.31	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln\{I/[1 - \exp(-qV/kT)]\}$ กับแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ของการไบอัสตรงที่แรงดันต่ำ	41
2.32	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(I_s/T^2)$ กับ $1/T$	42
2.33	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $V$	43
2.34	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับกำลังสองของค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V^2$ )	43
2.35	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ $C^{-2}$ กับ แรงดัน ( $V$ )	44
2.36	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้า ( $C$ ) กับ ค่าความถี่ ( $f$ ) ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe	45
2.37	แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe	46
3.1	แสดงแผนภาพโครงสร้างของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	51
3.2	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	53
3.3	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง และ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) และ อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิสูง ในช่วง 25 - 300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	53
3.4	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	54
4.1	แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.2	แสดงภาพถ่ายไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	56
4.3	แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	56
4.4	แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	57
4.5	แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	57
4.6	แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	58
4.7	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่น 400 – 1000 นาโนเมตร	58
4.8	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha hv)^2$ กับ $hv$ เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	59
4.9	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	60
4.10	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	61

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	61
4.12	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	62
4.13	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	65
4.14	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า $I$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	65
4.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	67
4.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	67
4.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	68
4.18	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า $I$ ที่อธิบายวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	68
4.19	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า $I$ โดยวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	69

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.20	แสดงการหาค่า $E_{00}$ โดยการพิตรภาพความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแพกเตอร์อุตมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	72
4.21	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแพกเตอร์อุตมคติ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์กับ อุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	72
4.22	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	73
4.23	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่ได้จากวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	73
4.24	แสดงกราฟอาร์เรเนี่ยสของ $\ln J_s$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	74
4.25	แสดงวงจรถูกใช้ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 - 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	75
4.26	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln R_0 / R$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 - 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	77

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.27	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	78
4.28	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C^{-2}$ กับ แรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ ห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	79
4.29	แสดงแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	82



# บทที่ 1 บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานเป็นจำนวนมากซึ่งตัวอย่างของพลังงานที่รู้จักกันดีก็คือ พลังงานไฟฟ้าซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปอื่นได้ง่าย สามารถควบคุมและใช้งานได้สะดวก โดยทั่วไปแล้วการผลิตกระแสไฟฟ้าจะอาศัยทรัพยากรจากแหล่งกำเนิดพลังงานฟอสซิล ได้แก่ ปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นต้น แต่ปัจจุบันพบว่าแหล่งพลังงานต่างๆมีปริมาณที่จำกัด กำลังลดลงเรื่อยๆจนหมดไปในไม่ช้านี้ ดังนั้นมนุษย์จึงให้ความสนใจในการพัฒนาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล พลังงานความร้อนใต้พิภพ และ พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงและไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลกมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์และเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ อนุภาคของพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอมและเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นเมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุดในช่วงเวลากลางวันซึ่งสอดคล้องและเหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้าเพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันซึ่งในการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มมาจากการศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซึ่งในปัจจุบันนักวิจัยได้มีการสนใจถึงสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่จะนำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ยิ่งขึ้นโดยเฉพาะการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende) และมีช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) เท่ากับ 2.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงจึงได้นำมาทดลองสร้างเป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายเทคนิคทั้งเทคนิคทางเคมีและเทคนิคทางฟิสิกส์ ยกตัวอย่างเทคนิคการสังเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการวิจัย เช่น เทคนิคการทำให้ระเหยกลายเป็นไอ เทคนิคการสปัตเตอร์ เทคนิคออกซิเดชัน เทคนิคการระเหยด้วยแสงเลเซอร์และเทคนิคการใช้ปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้น

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) โดยการกัดผิวหน้าด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ผสมกับไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol) เพื่อนำมาใช้ประดิษฐ์เป็นโคโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาคและเชิงมหภาค ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ศึกษาคุณสมบัติทางแสงโดยวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 200 องศาเซลเซียส และจากนั้นศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของกระแสไฟตรง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยทำการจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -1 ถึง 0.5 โวลต์ และความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ของสิ่งประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยจากผลการทดลองที่ได้ สามารถนำมาเขียนแผนภาพแสดงลักษณะโครงสร้าง แถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ได้ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
2. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสิ่งประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100)
4. ศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
5. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของกระแสไฟตรงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยทำการจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -1 ถึง 0.5 โวลต์ และความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
2. ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐาน โดยการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาคุณสมบัติทางแสง โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และ แผ่นกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
4. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน และ ศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยทำการจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -1 ถึง 0.5 โวลต์ และใช้ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิรตซ์

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำงานโครงการพิเศษในครั้งนี้
2. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
3. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เตรียมได้ โดยการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
4. ศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
5. ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)
6. ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) และ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน และ ศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยทำการจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -1 ถึง 0.5 โวลต์ และใช้ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิรตซ์
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเคลือบเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
2. ทำให้ทราบถึงสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เตรียมได้
3. ทำให้ทราบถึงกระบวนการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
4. ทำให้ทราบสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

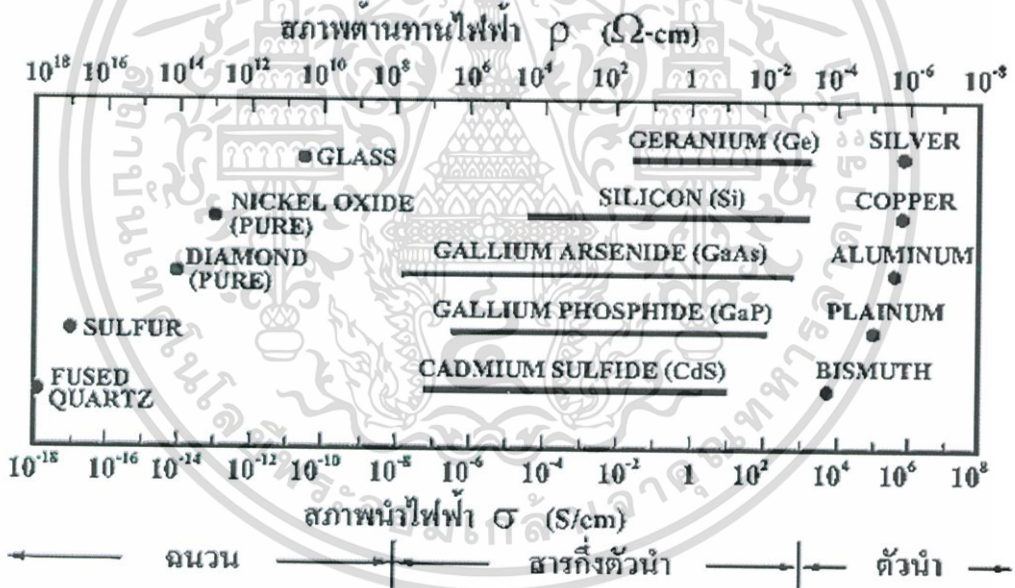
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานและการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกหรือฟิล์มบางนั้นจะขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆต่อไป

### 2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2530; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2530)

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และ ตัวนำดังรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และ แผ่นกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำในช่วง  $10^{-18}$ - $10^{-8}$  ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำ เช่น อะลูมิเนียม และ เงิน มีสภาพการนำไฟฟ้าสูงในช่วง  $10^4$ - $10^6$  ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสงและสนามแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.1 แสดงค่าสภาพนำไฟฟ้าและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ

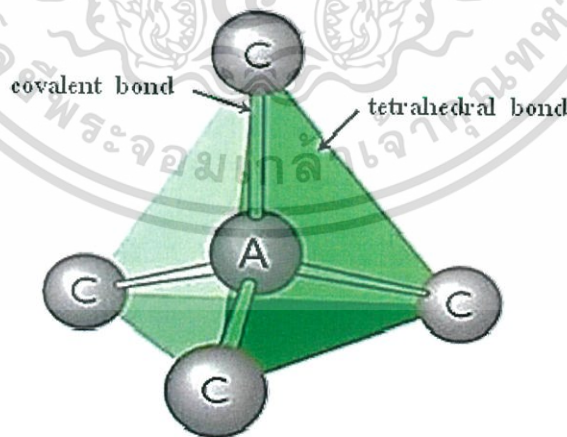
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างผลึก (งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2546; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; ฐิตินัย, 2556; Kittel, 2005; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542)

สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก การที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำมีสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างกันไปด้วย เช่น สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง เป็นต้น

### 2.2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และ กลุ่ม VI

โครงผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นที่อยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คือ อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก ส่วนโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอมของธาตุ A) และกลุ่มของธาตุ VI (อะตอมของธาตุ C) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงผลึกแต่ละอะตอมของธาตุ A หรืออะตอมของธาตุ C จะมีอะตอมของธาตุ C หรืออะตอมของธาตุ A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบ คือ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์ (wurtzite structure) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe จะมีลักษณะ 2 แบบคือเป็นคิวบิก (cubic structure) หรือ แบบซิงค์เบลนด์ และ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล หรือ แบบเวอร์ทไซต์ (hexagonal structure or wurtzite)

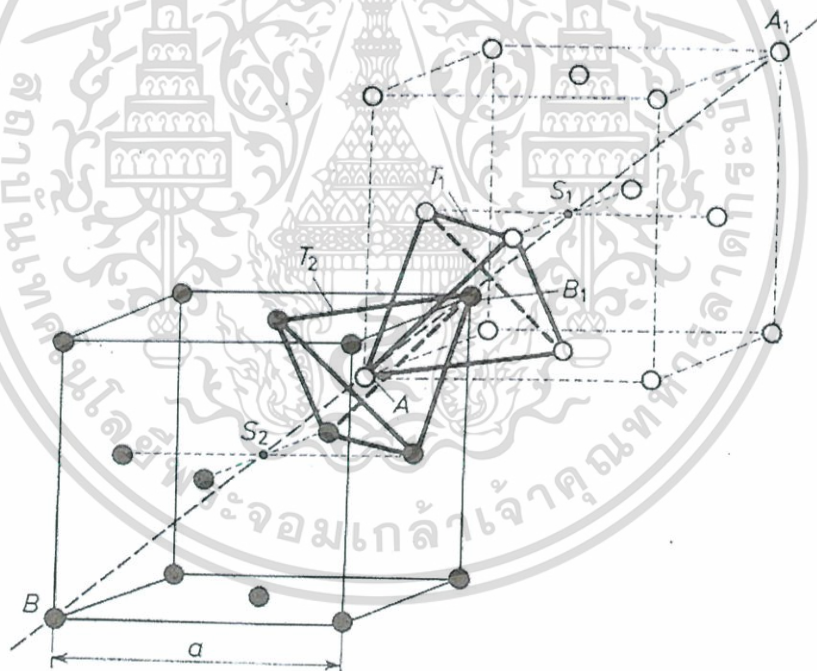


รูปที่ 2.2 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด หรือเรียกว่าเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเชิงคู่ (binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InSb และ สารประกอบของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น ZnSe และ ZnS เป็นต้น โครงสร้างผลึกแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิกสองโครงซ้อนกันอยู่แต่โครงหนึ่งเป็นอะตอมของธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงผลึกเป็นอะตอมของธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารประกอบของสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-VI (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมสองชนิด แต่ละชนิดมีสี่อะตอม เช่น ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe อะตอมของธาตุ Zn จะอยู่ที่ตำแหน่ง  $(0,0,0)$ ,  $(0,1/2,1/2)$ ,  $(1/2,0,1/2)$  และ  $(1/2,1/2,0)$  ส่วนตำแหน่งของอะตอมของธาตุ Se จะอยู่ที่  $(1/4,1/4,1/4)$ ,  $(1/4,3/4,3/4)$ ,  $(3/4,1/4,3/4)$  และ  $(3/4,3/4,1/4)$  สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ ZnS, CuCl, AgI, CuF, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



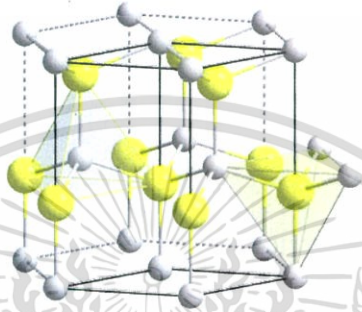
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ

### 2.2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์

โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ซึ่งเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆ สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

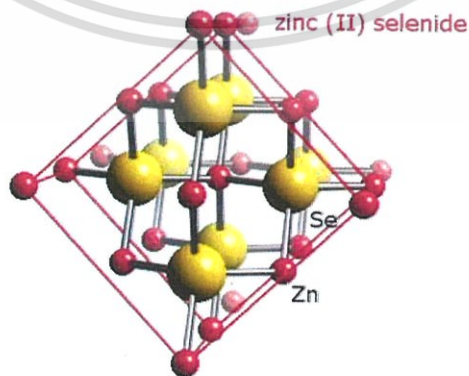
5/8 ตามแนวแกน c (c - axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรัล และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์ จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรัลเป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรัลแบบ ABCABC... หรือ 012012... สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ CdS, ZnSe และ ZnS เป็นต้น



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์ของสารกึ่งตัวนำ

### 2.2.1.3 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ และมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) เท่ากับ 2.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงจึงได้นำมาทดลองสร้างเป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งในการทดลองสามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายเทคนิคทั้งเทคนิคทางเคมีและเทคนิคทางฟิสิกส์ ยกตัวอย่างเทคนิคการสังเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการวิจัย เช่น เทคนิคการทำให้ระเหยกลายเป็นไอ เทคนิคการสปัตเตอร์ เทคนิคการออกซิเดชัน เทคนิคการระเหยด้วยแสงเลเซอร์ และเทคนิคการใช้ปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้น

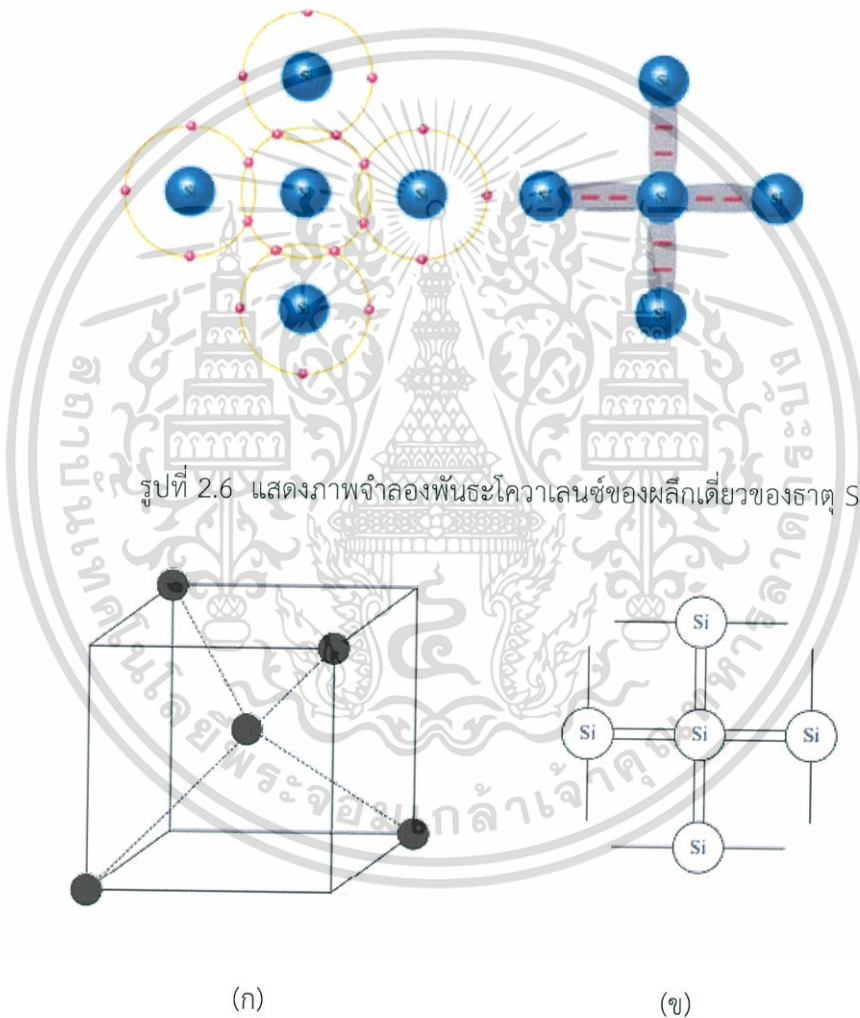


รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.4 โครงสร้างผลึกของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si

ผลึกเดี่ยวของธาตุ Si เป็นส่วนประกอบของทรายซึ่งเป็นที่รู้จักกันแพร่หลายมากที่สุด อะตอมของธาตุซิลิคอนจะมีจำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว สามารถเชื่อมต่อกับอิเล็กตรอนของอะตอมข้างเคียงเรียกว่า อิเล็กตรอนร่วม (share electrons) อะตอมของธาตุซิลิคอน และ เพชร มีโครงสร้างของผลึกและ สมบัติฟิสิกส์เหมือนกันแต่ผลึกซิลิคอนไม่โปร่งใสซึ่งในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอนบริสุทธิ์จะมีการนำไฟฟ้าไม่ค่อยดี ดังนั้นจึงต้องเติมอะตอมของสารเจือ เช่น อะตอมของธาตุฟอสฟอรัส อะตอมของธาตุโบรอน หรืออย่างอื่น กระบวนการอย่างนี้เรียกว่าโด๊ป (doping) ผลึกเดี่ยว ของธาตุซิลิคอน



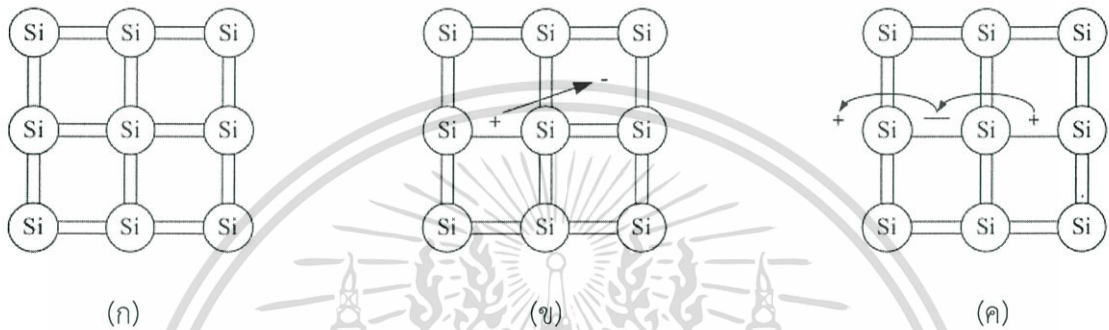
รูปที่ 2.7 แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si

ก. แสดงพันธะเตตระฮีดรัลของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si

ข. แสดงภาพแบบสองมิติที่มีพันธะโคเวเลนต์ของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7(ก.) แสดงถึงโครงสร้างของอะตอมจำนวน 5 ตัวที่หยุดนิ่งโดยมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว กระจายอยู่รอบๆซึ่งโครงสร้างแบบนี้เราเรียกว่า เตตระฮีดรัล แสดงดังรูปที่ 2.7(ข.) โดยที่อะตอมของธาตุซิลิคอนแต่ละอะตอมก็จะมีอะตอมของธาตุซิลิคอนข้างเคียงล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม โดยเวเลนซ์อิเล็กตรอนก็จะถูกใช้ร่วมกันระหว่างแต่ละอะตอมซึ่งเราเรียกว่า พันธะโคเวเลนต์ ส่วนในรูป 2.7(ข.) เป็นโครงสร้างของอะตอมซิลิคอนในแบบ 2 มิติ (เรียกว่า แลตทิซ) ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของโครงสร้างแบบนี้ก็คือ เวเลนซ์อิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณขอบนอกสุดของอะตอมสามารถที่จะต่อจับยึดกับอะตอมของธาตุซิลิคอนอื่นๆได้อีก ทำให้ได้ผลึกซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 2.8 แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ใน 2 มิติ ที่อุณหภูมิต่างๆ

- ก. แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si 2 มิติที่อุณหภูมิเท่ากับ 0 เคลวิน
- ข. แสดงถึงการสลายของพันธะโคเวเลนต์ที่อุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน
- ค. แสดงถึงการเคลื่อนที่ของโฮลในผลึกเดี่ยวของธาตุ Si

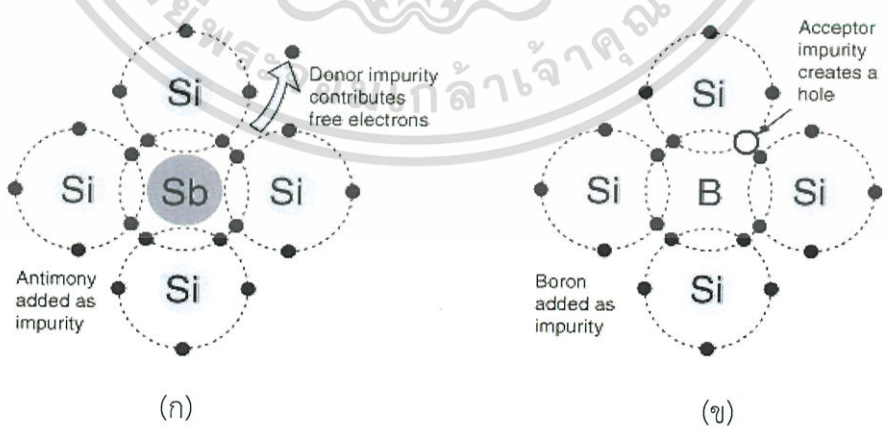
จากรูป 2.8(ก.) ถ้ากำหนดให้พิจารณาที่อุณหภูมิ  $T = 0$  เคลวิน ก็จะทำให้ อิเล็กตรอนที่เกาะอยู่ในแต่ละพันธะมีค่าพลังงานที่ต่ำที่สุด ถ้ามีพลังงานที่สนามไฟฟ้าภายนอกถูกปล่อยเข้าไปในผลึกเหล่านี้ อิเล็กตรอนก็จะไม่เคลื่อนที่ตังนั้นในสภาวะผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอนจึงมีลักษณะเป็นฉนวน (insulator) จึงไม่มีกระแสไหลผ่านได้เลย เมื่ออุณหภูมิในผลึกสูงขึ้นทำให้เวเลนซ์อิเล็กตรอนมีโอกาสหลุดออกจากพันธะได้ ทำให้ตำแหน่งเดิมของอิเล็กตรอนมีสภาพเป็นประจุบวก ดังรูป 2.8(ข.) เรียกว่า “เกิดสถานะพลังงานว่าง (empty state)” และถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นอีกก็จะทำให้พันธะโคเวเลนต์ถูกสลายออกมามากขึ้นทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากยิ่งขึ้น เพื่อที่จะสลายพันธะเวเลนซ์ เวเลนซ์อิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานอย่างน้อยที่สุดจำนวนหนึ่ง ที่เรียกว่า ช่องว่างแถบพลังงาน สำหรับสารทั่วไปค่าช่องว่างแถบพลังงานนี้จะมีค่าประมาณ 3-6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวน (insulator) เพราะที่อุณหภูมิห้องสารเหล่านี้จะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในสารเลย ในขณะที่สารบางอย่าง เช่น โลหะกลับมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่จำนวนมากที่อุณหภูมิห้อง จึงจัดสารเหล่านี้เป็นตัวนำ (conductor) และ สำหรับสารกึ่งตัวนำจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน อยู่ประมาณ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำนี้เองที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เมื่อดูจากรูป 2.8(ค.) พบว่าอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากพลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่ตลอดเวลาโดยอิเล็กตรอนอิสระนี้ถ้าเคลื่อนที่ออกมาจากตำแหน่งใดก็จะทำให้ตำแหน่งนั้นมีสภาพทางไฟฟ้าเป็น

ประจุบวก ซึ่งเรียกว่า โฮล (hole) โดยทั้งอิเล็กตรอนและโฮลก็สามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้เหมือนกันเพราะทั้งโฮลและ อิเล็กตรอนต่างก็เคลื่อนที่ได้เหมือนกัน

ในอะตอมของธาตุหมู่ V ที่นิยมนำมาทำเป็นอะตอมของสารเจือ ได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) และ อาร์เซนิก (As) ในรูปที่ 2.9(ก.) แสดงถึงการนำอะตอมของธาตุฟอสฟอรัสมาเจือในผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอน ดังรูป โดยเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ของอะตอมของธาตุฟอสฟอรัสก็จะจับตัวกับอะตอมของธาตุซิลิคอนกลายเป็นพันธะเคมี แต่อิเล็กตรอนตัวที่ 5 ของอะตอมของธาตุฟอสฟอรัสก็จะกลายเป็นส่วน เกินซึ่งอิเล็กตรอนตัวนี้ก็จะเคลื่อนที่ไปตามโครงสร้างผลึกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอนโดยไม่ต้องใช้พลังงานความร้อนมาสลายพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอนอีก อะตอมของธาตุฟอสฟอรัส เรียกว่า อะตอมของสารเจือผู้ให้เนื่องจากเป็นอะตอมที่ให้อิเล็กตรอนอิสระกับผลึกและเรานิยมเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุหมู่ V นี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor)

สำหรับอะตอมของธาตุในหมู่ III ที่นิยมนำมาทำเป็นอะตอมของสารเจือ ได้แก่ อะตอมของธาตุโบรอน (B) ดังรูปที่ 2.9(ข.) ถ้านำธาตุนี้ไปเจือในผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอนก็จะทำให้เวเลนซ์อิเล็กตรอนทั้ง 3 ตัว ของอะตอมของธาตุโบรอนจับยึดกับอะตอมของธาตุซิลิคอนทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์ 3 ใน 4 ของอะตอมของธาตุซิลิคอน ทำให้อะตอมของธาตุซิลิคอนขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว บริเวณที่ขาดอิเล็กตรอนนั้นเรียกว่า โฮล ซึ่งโฮลนี้ก็จะดึงอิเล็กตรอนจากพันธะข้างเคียงมาทำให้เกิดโฮลที่จุดอื่นๆแทนและโฮลก็จะเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ เพราะเกิดการดึงอิเล็กตรอนต่อกันไปเรื่อยๆ ซึ่งก็ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอนได้เช่นกัน อะตอมของธาตุโบรอนเราเรียกว่า อะตอมของสารเจือผู้รับ เนื่องจากเป็นอะตอมที่ต้องรับอิเล็กตรอนจากผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอนและเราเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุหมู่III นี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor)

ดังนั้นสารกึ่งตัวนำใดๆ ที่มีการเติมอะตอมของสารเจือชนิด (n หรือ p) ลงไปเราจะเรียกว่า สารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินสิค (extrinsic semiconductor) ซึ่งในการเจืออะตอมของสารเป็นการควบคุมปริมาณความเข้มข้นของอิเล็กตรอนอิสระ และ โฮล



รูปที่ 2.9 แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ที่มีการเจืออะตอมของสารเจือของธาตุต่างๆ  
ก. แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb  
ข. แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 หลักเกณฑ์ในการระบุชื่อระนาบของผลึก (ฐิตินัย, 2531; งามนิത്യ, 2530; Kittel, 2005; Runyan, 1975; ดุสิต, 2535; Schroder D.K.,1990; สิทธิชัย, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้นมีเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

### 2.2.2.1 การระบุตำแหน่ง

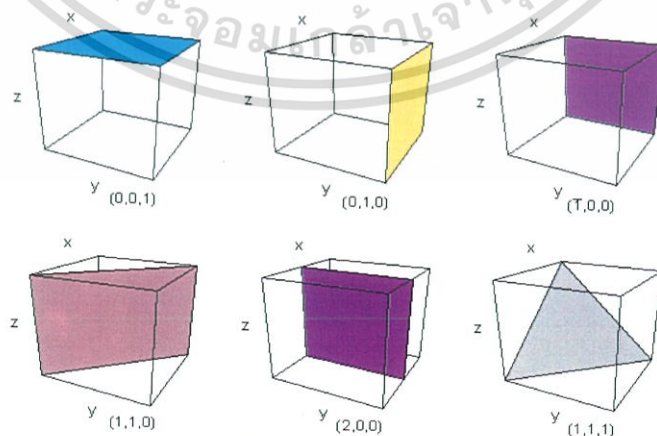
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  โดยสังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่น จุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x = 1, y = 2, z = 3$

### 2.2.2.2 การระบุทิศทาง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[u \ v \ w]$  โดยสังเกตว่าใช้วงเล็บสี่เหลี่ยมและไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นวงเล็บก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง  $[\bar{1}2\bar{1}]$  แสดงว่าในแนวแกน  $z$  มีค่าเป็นลบ

### 2.2.2.3 การระบุชื่อระนาบ

การระบุชื่อระนาบ จะใช้อักษร  $(hkl)$  โดยให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่า  $(hkl)$  เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอมไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้อาจมาจากค่าส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ เช่น ระนาบ  $(010)$  นั้นจะตัดแกน  $(x,y,z)$  ที่จุด  $(1/0, 1/1, 1/0)$  หรือที่จุด  $(\infty, 1, \infty)$  นั่นเอง (ระยะอนันต์ หมายถึงระนาบนั้นขนานกับแกนนั้นและไปตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.10 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (ฐิตินัย, 2531; งามนิิตย์, 2530; Kittel, 2005; Runyan, 1975; ดุสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; ฐิตินัย, 2551; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, งามนิิตย์, ฌฐพร, 2550; ฐิติกร, 2550; เอกชัย, 2552)

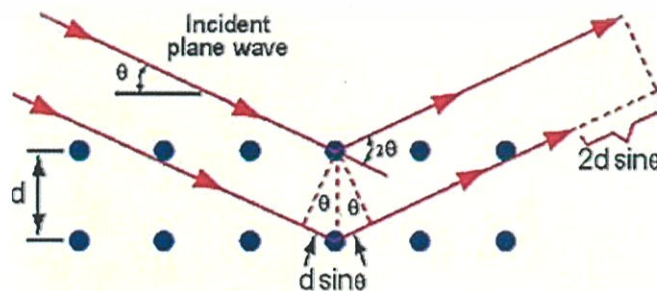
การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังกล่าว

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
	$d_{hkl}$	คือ	ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
	$\theta$	คือ	มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ
	$n$	คือ	ลำดับที่ของการเลี้ยวเบน มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม คือ 1, 2, 3,...
	$2\theta$	คือ	มุมเลี้ยวเบนที่เป็นมุมระหว่างรังสีตกกระทบทำกับรังสีสะท้อน

ระนาบต่างๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และ มุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ ( $2\theta$ ) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังในรูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ และ มุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีค (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงผลึกแบบซิงค์เบลนด์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

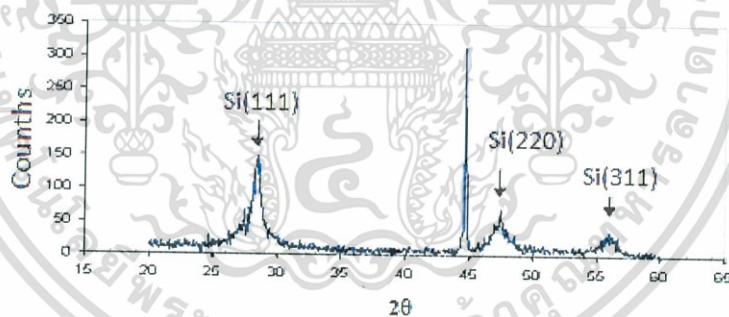
และสำหรับโครงผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[ \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$a, c$  คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก

$h, k, l$  คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก



รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

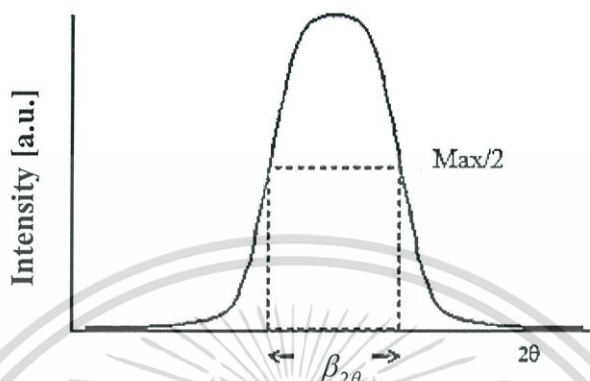
### 2.3.2 การหาขนาดของเกรน

การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ ใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherer) คำนวณหาค่าขนาดของเกรน ดังนี้

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $D$  คือ ขนาดของเกรน  
 $k$  คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน  
 $\beta_{2\theta}$  คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด  
 (full width at half-maximum of the diffraction peak)

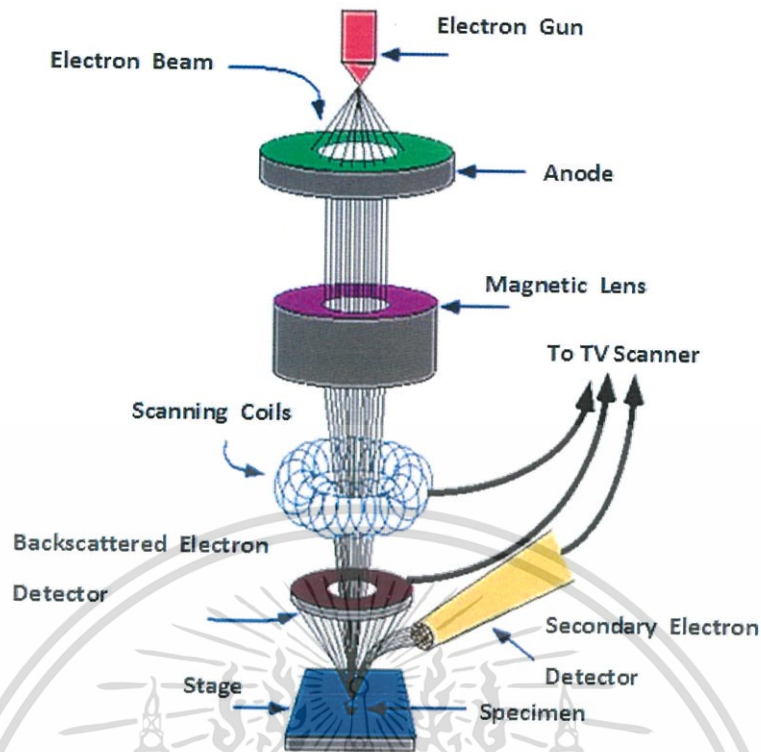


รูปที่ 2.13 แสดงค่า  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาค่าขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

#### 2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Sze S.M., 1981; Kittel, 2005; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2530; ดุสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2553)

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการและวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมา แมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ.2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์ วิลเลียม แอ็ทเลย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

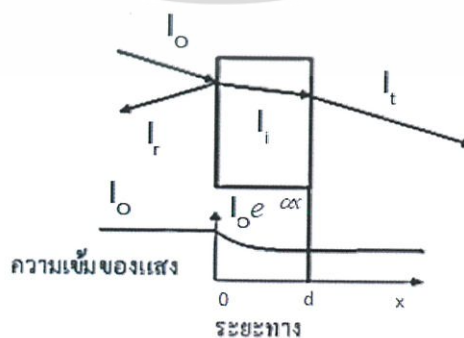
การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์ - วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะถูกตรวจจับโดยอุปกรณ์รับรู้ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.5 การส่งผ่านแสง (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏี, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; ดุสิต, 2535)

การศึกษาชีวิตค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านนี้จะกล่าวถึงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$I_0$	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง
	$I_R$	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
	$I_r$	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
	$I_l$	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
	$R$	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)
	$T$	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance)
	$\alpha$	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
	$d$	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเท่ากับ

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.5)$$

หรือ

$$I_r = RI_0 \quad (2.6)$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_l = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.7)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

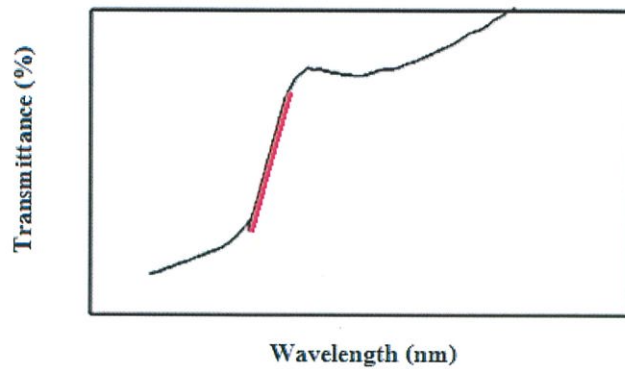
$$I_r = I_l e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.8)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_r}{I_0} = (1 - R) e^{-\alpha d} \quad (2.9)$$

### 2.5.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกระทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอนจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



รูปที่ 2.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ค่าความยาวคลื่นโดยเส้นที่บ่งจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงานสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $T$ ) ได้จากรูปที่ 2.15 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไป ( $R$ ) มีค่าน้อยมากจะได้

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.10)$$

ดังนั้น

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T \quad (2.11)$$

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้ โดยการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.12)$$

เมื่อ  $A$  คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.12) ใช้กับสารที่มีลักษณะของโครงสร้างพลังงานเป็นแบบตรง

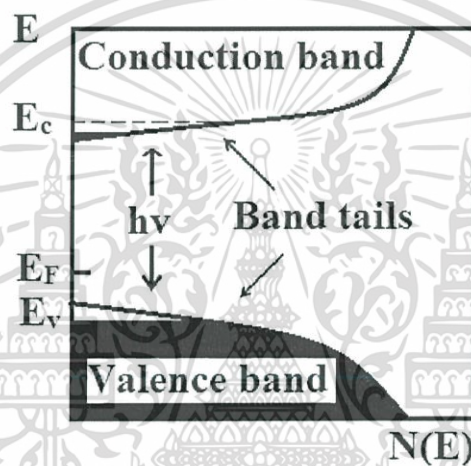
$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.13)$$

เมื่อ  $B$  คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.13) ใช้กับสารที่มีลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบเฉียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในแถบช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงานหรือส่วนหางของแถบพลังงานของเออร์บัค (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลถึงความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp \left[ \frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T} \right] \quad (2.14)$$

เมื่อ	$\alpha_0$ และ $E_0$	คือ พารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด
	$k_B$	คือ ค่าของที่ของโบลต์ซมันน์ $= 1.38 \times 10^{-23}$ จูลต่อเคลวิน
	$T$	คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)
	$\sigma$	คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

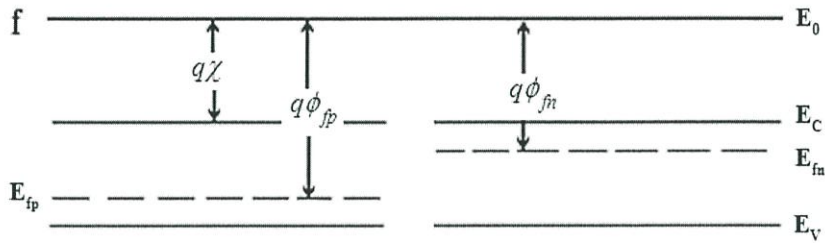
## 2.6 รอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำ (p-n junction) (งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2546; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Kittel, 2005; Runyan, 1975; วีรชัย, 2547; สุกฤษฎ์, 2547; ดุสิต, 2535)

รอยต่อพี – เอ็น ของสารกึ่งตัวนำ คือ บริเวณที่ชนิดการนำไฟฟ้าของสารเปลี่ยนจากชนิดพี เป็นชนิดเอ็นหรือเปลี่ยนจากชนิดเอ็นเป็นชนิดพี โดยที่โครงสร้างของผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด รอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำเป็นส่วนที่สำคัญมากในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแทบทุกชนิด และ คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้จะขึ้นกับกระบวนการผลิตซึ่งมีมากมายหลายแบบ วิธีการประดิษฐ์รอยต่อที่สำคัญ ในปัจจุบันมีดังนี้ คือ วิธีการแพร่ซึม วิธีอีพิแทกซ์ (epitaxy) วิธีฝังไอออน (ion implantation) และแบบหลอมผสม (alloying) เป็นต้น

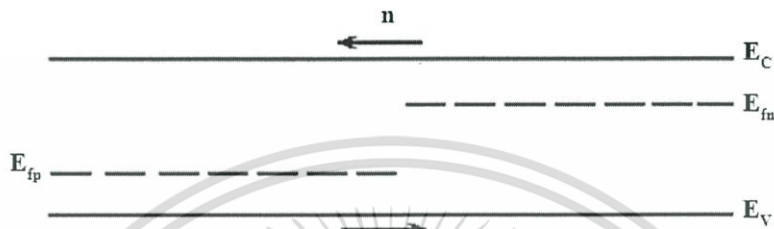
### 2.6.1 รอยต่อในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

แบบจำลองของรอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำในเชิงอุณหพลศาสตร์จะเริ่มพิจารณาที่รอยต่อแบบโฮโม (homo junction) ซึ่งทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นวัสดุชนิดเดียวกันจึงมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากัน โดยเริ่มจากอิเล็กตรอนที่มีอยู่จำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่ซึมไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่น้อยมาก ในทำนองเดียวกันโฮลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะแพร่ซึมไปยังด้านเอ็นซึ่งมีโฮลอยู่น้อยมาก การแพร่ซึมของพาหะเหล่านี้จะทำให้เนื้อสารขาดความเป็นกลางทางไฟฟ้านั้นคือทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอนอิสระไป ทำให้บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ใกล้รอยต่อแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวก เนื่องจากมีประจุบวกของไอออนของอะตอมผู้ให้ถูกทิ้งไว้ สำหรับทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็จะมีลักษณะคล้ายๆกัน คือ มีไอออนของอะตอมผู้รับซึ่งมีประจุเป็นลบปรากฏอยู่ยังผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อโดยที่สนามไฟฟ้ามืดจากทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นการแพร่ซึมของโฮลและอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ต้านการแพร่ซึมบริเวณรอยต่อนี้จึงปลอดจากพาหะอิสระและเรียกบริเวณนี้ว่าเขตปลอดพาหะ (depletion region) หรือบางครั้งเรียกว่า บริเวณประจุค้าง (space charge region) เนื่องจากมีประจุของไอออนสารเจืออยู่ ซึ่งเป็นประจุที่ถูกตรึงอยู่กับที่ (fixed charge) ไม่ใช่ประจุอิสระ

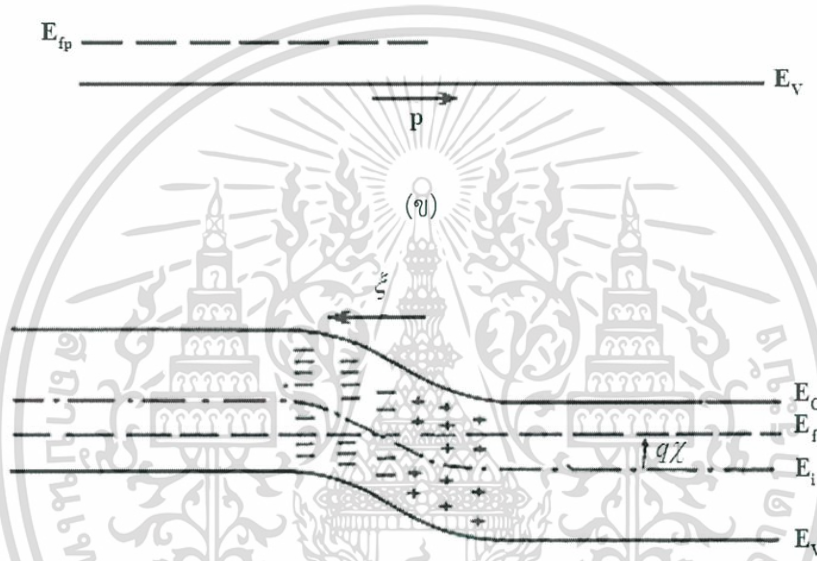
ลักษณะการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนและโฮลที่รอยต่ออาจแสดงได้โดยแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานดังรูปที่ 2.26 โดยที่รูป 2.26(ก.) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ รูปที่ 2.26(ข.) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.26(ค.) โดยที่  $\phi$  คือ ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อ และ  $\xi$  คือสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ



(ก)



(ข)



(ค)

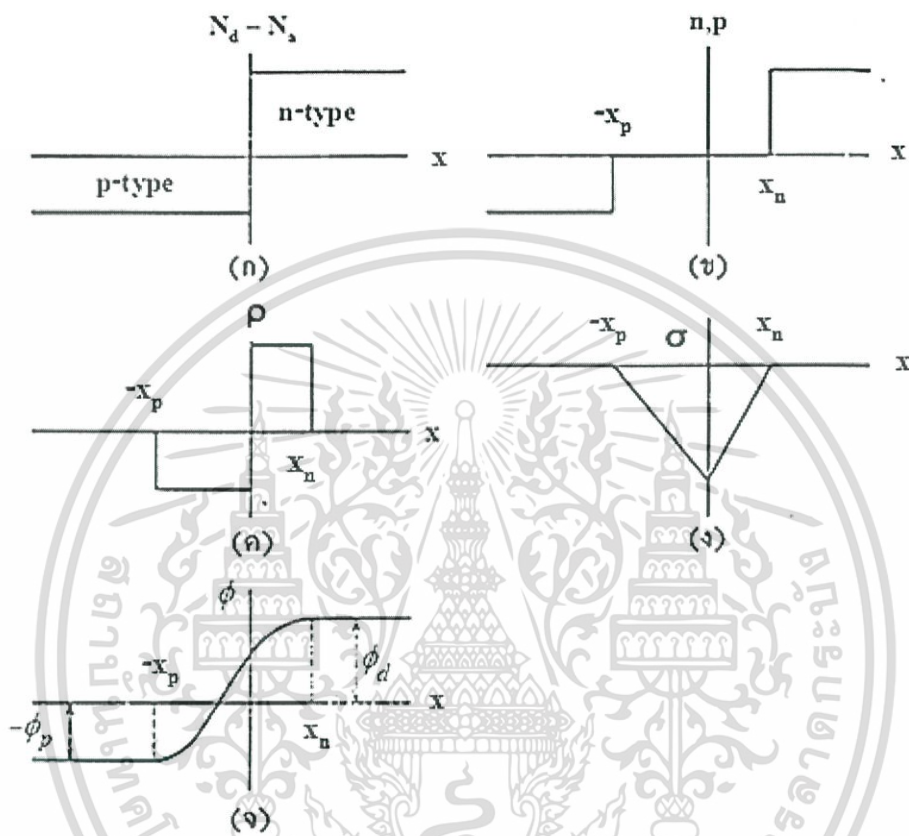
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น

- ก. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่ออวิวิธพันธุ์
- ข. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่ออวิวิธพันธุ์
- ค. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่ออวิวิธพันธุ์และอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 รอยต่อแบบขั้นบันได (step junction)

รอยต่อแบบขั้นบันไดเป็นรอยต่อในเชิงอุดมคติ ที่พิจารณาว่าปริมาณความเข้มข้นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีต่างมีค่าคงที่ (แต่ค่าไม่เท่ากัน) จนกระทั่งถึงจุดเชื่อมต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.19 แสดงไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบพี-เอ็น ที่เป็นแบบขั้นบันไดที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง

- ก. ความเข้มข้นสารเจือ
- ข. ความหนาแน่นของพาหะอิสระ
- ค. ประจุค้าง
- ง. สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ
- จ. ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ

ประจุไฟฟ้าจะมีค่าไม่เป็นศูนย์เฉพาะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จะหาค่าสนามไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้โดยใช้สมการของปัวซอง (Poisson's equation) นั่นคือ

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{-d^2\xi}{dx} = \frac{-qN_d}{\epsilon_s} \quad (2.15)$$

$$\xi(x) = \frac{-qN_d}{\epsilon_s}(x_n - x); 0 < x < x_n \quad (2.16)$$

ค่าสนามไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่ามีทิศไปทางซ้ายมือและสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นและสิ้นสุดที่ระยะทาง  $x_n$  ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าจะต้านการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนที่จะแพร่ซึมจากขวาไปซ้าย ในทำนองเดียวกันค่าสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีความสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้น ดังนี้

$$\xi(x) = \frac{-qN_a}{\epsilon_s}(x - x_p); -x_p < x < 0 \quad (2.17)$$

ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีทิศต้านการแพร่ซึมของโฮลด้วยเหมือนกันที่ระยะ  $x=0$  สนามไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่อง นั่นคือ

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (2.18)$$

ซึ่งแสดงว่าค่าความกว้างของเขตปลอดพาหะทั้งทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารเจือ กล่าวคือถ้าด้านใดมีค่าความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือสูง เขตปลอดพาหะจะย่นเข้าในเนื้อสารด้านนั้นน้อย ในทางตรงกันข้าม ถ้าด้านใดมีค่าความเข้มข้นของสารเจือต่ำ เขตปลอดพาหะส่วนใหญ่จะตกอยู่ในเนื้อสารของด้านนั้น แต่ถ้าให้ค่าความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่ามากกว่าค่าความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้รับทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากๆ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกเจืออย่างหนัก (heavily doped n-type) จะถือได้ว่า เขตปลอดพาหะที่รอยต่อเข้าไปอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพี และจะเรียกรอยต่อชนิดนี้ว่า รอยต่อแบบขั้นบันไดด้านเดียว (one-sided step junction)

ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตสมการ (2.16) เทียบกับ  $x$  นั่นคือ

$$\phi(x) = \phi_n - \frac{qN_d}{2\epsilon_s}(x_n - x)^2; 0 < x < x_n \quad (2.19)$$

โดยที่

$$\phi_n = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (2.20)$$

ในทำนองเดียวกัน ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ

$$\phi(x) = \phi_p + \frac{qN_a}{2\epsilon_s}(x + x_p)^2; -x_p < x < 0 \quad (2.21)$$

โดยที่

$$\phi_p = \frac{-kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\phi_p$  คือ ศักย์ไฟฟ้าในเนื้อของสารกึ่งตัวนำชนิดพีนอกเขตปลอดพาหะอิสระและมีค่าเป็นลบ ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่าง  $\phi_n - \phi_p$  จะมีค่าดังนี้ คือ

$$\phi_i = \phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) \quad (2.23)$$

และเรียก  $\phi_i$  ว่าแรงดันไฟฟ้าในตัว (built-in potential) หรือค่าความสูงของกำแพงศักย์ซึ่งจะมีเครื่องหมายเป็นบวก

ในกรณีที่มีการเจือสารด้วยความเข้มข้นสูงมาก  $\approx 10^{19}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมการที่ (2.23) จะไม่เป็นจริงอีกต่อไป เพราะว่ากรณีที่มีการเจือสารอย่างสูง เราจะประมาณฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มิ-ดิแรก ด้วยฟังก์ชันการแจกแจงของแม็กเวลล์-โบลต์ซมานน์ไม่ได้ เนื่องจากระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำจะเลื่อนเข้าหาขอบของแถบพลังงาน (ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีระดับเฟอร์มิจะเลื่อนเข้าหาขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ เป็นต้น) นั่นคือระดับพลังงานเฟอร์มิของสารที่ถูกเจืออย่างหนักจะเลื่อนไปจากระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิคเท่ากับ  $E_g/2q$  หรือราว 0.56 อิเล็กตรอนโวลต์ ในอะตอมของธาตุ Si ดังนั้นในรอยต่อของสารกึ่งตัวนำแบบ  $p^+ - n$  ศักย์ในตัวจะมีค่าดังนั้นคือ

$$|\phi_i| = 0.56 + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (2.24)$$

และที่บริเวณเขตปลอดพาหะเกือบทั้งหมดจะปรากฏในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของหัวต่อแต่ถ้าเป็นกรณีของสารกึ่งตัวนำที่มีหัวต่อพี-เอ็นปกติ จะพบว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะคือ

$$x_p + x_n = \left[ \frac{2\epsilon_s}{q} \phi_i \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (2.25)$$

ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะขึ้นกับส่วนกลับของรากที่สองของความเข้มข้นของสารเจือโดยประมาณ

2.6.3 รอยต่อพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542)

ถ้าให้แรงดันไฟฟ้า  $V_a$  แก่รอยต่อในลักษณะที่ขั้วลบต่อเข้ากับสารสารกึ่งตัวนำชนิดพีและขั้วบวกต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และประมาณว่าแรงดันไฟฟ้า  $V_a$  ทั้งหมดไปตกคร่อมอยู่ที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าในตัว  $\phi_i$  ของสมการที่ (2.25) จะถูกแทนที่ด้วย  $(\phi_i - V_a)$

$$x_d = x_n + x_p = \left[ \frac{2\varepsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.26)$$

ถ้าค่า  $V_a$  มีค่ามากกว่า  $\phi_i$  แล้วความกว้างของเขตบริเวณเขตปลอดพาหะจะแปรผันตรงกับรากที่สองของ  $V_a$  ค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดเมื่อ

$$\frac{1}{2} \zeta_{\max} x_d = (\phi_i - V_a)$$

ดังนั้น

$$\zeta_{\max} = \frac{2(\phi_i - V_a)}{x_d} \quad (2.27)$$

**2.7 ค่าความจุไฟฟ้า** (Kittel, 2005; งามนิตย, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏี, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; ดุสิต, 2535)

ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของบริเวณรอยต่อจะแสดงอยู่ในรูปของประจุ  $Q_s$  (ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) ในบริเวณเขตปลอดพาหะดังความสัมพันธ์

$$Q_s = qN_a x_n = qN_a x_p \quad (2.28)$$

จากนิยามของค่าความจุไฟฟ้าคือ

$$C = \frac{dQ}{dV_a} = qN_d \frac{dx_n}{dV_a} = qN_a \frac{dx_p}{dV_a} \quad (2.29)$$

แต่เนื่องจาก  $x_p = (N_d/N_a)x_n$  และ  $x_d = x_n + x_p$  รวมทั้งพิจารณาสมการที่ (2.26)

จะได้ว่า

$$\frac{dx_n}{dV_a} = \frac{1}{N_d} \left[ \frac{\varepsilon_s}{2q \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.30)$$

$$C = \left[ \frac{q\varepsilon_s}{2q \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.31)$$

ในกรณีที่  $|V_a|$  มีค่ามากกว่า  $\phi_i$  แล้วค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อแบบขั้นจะลดลงโดยแปรผกผันกับรากที่สองของ  $V_a$  ถ้าแทนสมการที่ (2.26) ลงในสมการที่ (2.31) ดังนั้นจะได้ว่า  $C = \varepsilon_s/x_d$  เป็นความสัมพันธ์ที่รู้จักกันแพร่หลายสำหรับไฟฟ้าสลับสัญญาณขนาดเล็ก

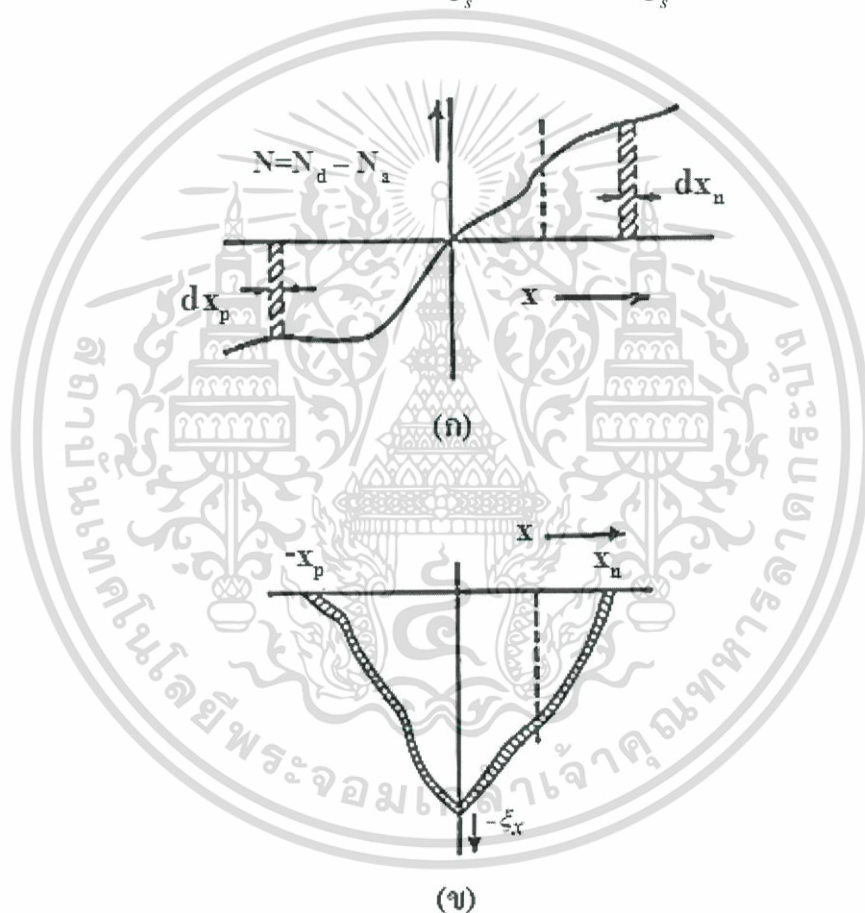
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามถ้าเป็นกรณีที่ค่าความหนาแน่นของสารเจือในบริเวณรอยต่อมีค่าไม่สม่ำเสมอ ในช่วง  $-x_p$  ถึง  $x_n$  ดังรูปที่ 2.28(ก.) ประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่  $Q$  ที่ปรากฏอยู่ระหว่าง  $x$  และขอบเขตบริเวณปลอดพาหะ  $x_n$  จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q = q \int_{x_n}^x N dx \quad (2.32)$$

เมื่อ  $N$  คือ ค่าความหนาแน่นของประจุสุทธิ และมีค่าเท่ากับ  $N_d - N_a$  แต่เนื่องจาก  $\zeta_x(x_n) = 0$  โดยการใช้กฎของเกาส์ (Gauss's law) จะได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ มีค่าดังนี้คือ

$$-\zeta(x) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_{x_n}^x q N dx = \frac{Q}{\epsilon_s} \quad (2.33)$$



- รูปที่ 2.20 แสดงโปรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ
- ก. แสดงค่าความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่าไม่สม่ำเสมอภายในบริเวณเขตปลอดพาหะ
  - ข. แสดงลักษณะโปรไฟล์ของค่าสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.28(ข.) เมื่อแรงดันไฟย้อนกลับ  $V_a$  มีค่าเปลี่ยนไป  $dV_a$  ขอบเขตของบริเวณปลอดพาหะทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเปลี่ยนไป  $dx_n$  และประจุไฟฟ้าที่ปรากฏอยู่ในบริเวณตั้งแต่  $x$  จนถึง  $x_n$  จะมีค่าดังนี้คือ

$$dQ = qN(x_n)dx_n \quad (2.34)$$

แล้วสนามไฟฟ้าที่จุด  $x$  จะเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์

$$-d\xi_x = \frac{dQ}{\epsilon_s} = \frac{q}{\epsilon_s} N(x_n)dx_n \quad (2.35)$$

แต่เนื่องจากพื้นที่กราฟ  $\xi_x$  กับ  $x$  จะสัมพันธ์กับ  $\phi_i - V_a$  ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะสอดคล้องกับพื้นที่แรเงาของรูปที่ 2.28 (ข) ดังนั้นจะได้ว่า

$$dV_a \approx -x_d d\xi_x = \frac{x_d}{\epsilon_s} dQ \quad (2.36)$$

และจากนิยาม ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็ก คือ

$$C = \frac{dQ}{dV_a} = \frac{\epsilon_s}{x_d} \quad (2.37)$$

ภายใต้สภาวะไบอัสย้อนกลับ บริเวณขอบเขตปลอดพาหะทั้งด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเลื่อนออกไปจากแนวเดิม สำหรับอนุพันธ์ของสมการที่ (2.29) เทียบกับ  $x_n$  คือ

$$\frac{dC}{dx_n} = \frac{\epsilon_s}{(x_n + x_p)^2} \left( 1 + \frac{dx_p}{dx_n} \right) \quad (2.38)$$

แต่เนื่องจากขนาดของประจุไฟฟ้าทั้งสองข้างของบริเวณรอยต่อที่เปลี่ยนไปต่างต้องมีปริมาณที่เท่ากัน นั่นคือ

$$|dQ| = |qN(-x_p)dx_p| = qN(x_n)dx_n \quad (2.39)$$

และ

$$\frac{dC}{dx_n} = \frac{-C^2}{\epsilon_s} \left( 1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|} \right) \quad (2.40)$$

แทนค่า  $dx_n$  ของสมการที่ (2.40) ลงในสมการที่ (2.34) จะได้ว่า

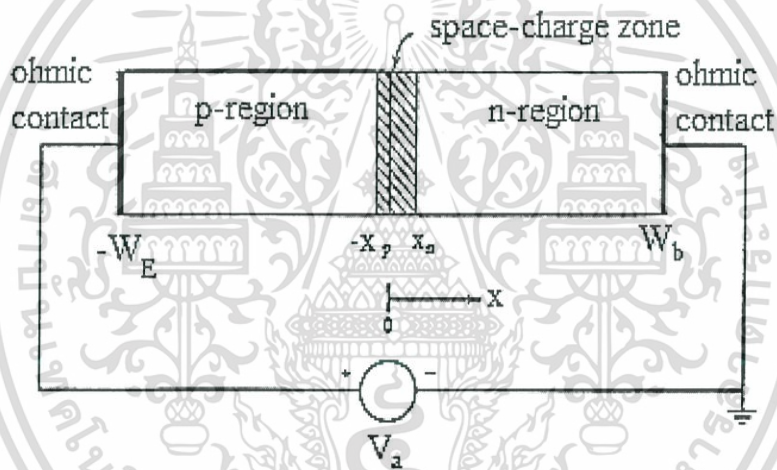
$$N(x_n) = \frac{-C^2}{\epsilon_s(dC/dV_a)} \left( 1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|} \right) \quad (2.41)$$

ถ้าด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีถูกเจืออย่างหนักแล้วพจน์ขวามือในวงเล็บของสมการที่ (2.40) จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะกลายเป็นการหาค่าความเข้มข้นสารเจือของรอยต่อแบบข้างเดียว (one sided step junction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 ลักษณะเฉพาะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ( Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan,1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ , 2542)

จากรูปที่ 2.29 แสดงการป้อนแรงดันไฟตรง  $V_a$  ให้กับไดโอดของสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ไดโอดมีพื้นที่หน้าตัด  $A$  ถ้าไม่มีการฉายแสงไปยังไดโอด กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดของแรงดันไฟฟ้า  $V_a$  แรงดันไฟฟ้าส่วนใหญ่จะตกคร่อมที่รอยต่อมากกว่าในเนื้อสารซึ่งถือว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) และที่ขั้วไฟฟ้า (ohmic contact) แรงดันไฟฟ้าสุทธิที่รอยต่อจะเท่ากับ  $(\phi, -V_a)$  ถ้าแรงดันไฟฟ้า  $V_a$  มีค่าเป็นบวก จะเรียกว่า การไบอัสไปหน้า แต่ถ้า  $V_a$  มีเครื่องหมายเป็นลบเรียกว่าการไบอัสย้อนกลับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะมีค่าน้อยมาก และกระแสไฟฟ้าจะคงที่ไม่ขึ้นกับค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_a$  ในช่วงของแรงดันไฟฟ้า  $V_a$  ขนาดหนึ่ง



รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างของไดโอดของสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็นขณะถูกไบอัสไปหน้าด้วยแรงดัน  $V_a$

## 2.9 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; ดุสิต, 2535)

ภายใต้เงื่อนไขการฉีดกระแสระดับต่ำความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ขอบของเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ติดกับรอยต่อพี-เอ็น คือ ที่ระยะ  $x_n$  จะเท่ากับความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือไม่ว่าจะอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนหรือภายใต้การไบอัสก็ตามนั่นคือ  $n_{n0}(x_n) = N_d(x_n)$  ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของโฮลที่ขอบของเนื้อสารชนิดกึ่งตัวนำชนิดพีที่ระยะ  $-x_p$  จะมีค่า  $n_{p0}(-x_p) = N_a(-x_p)$  ดังนั้นจะสรุปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 n_{po}(-x_p) &= n_{no}(x_n) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \\
 &= N_d(x_n) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right)
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

$$\begin{aligned}
 p_{no}(x_n) &= p_{po}(-x_p) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \\
 &= N_a(-x_p) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right)
 \end{aligned} \tag{2.43}$$

ภายใต้การไบอัสด้วยแรงดันตามเงื่อนไขการฉีดพาหะระดับต่ำจะได้

$$n_p(-x_p) = N_d(x_n) \exp\left[\frac{-q(\phi_i - V_a)}{kT}\right] \tag{2.44}$$

และ

$$p_n(x_n) = N_a(-x_p) \exp\left[\frac{-q(\phi_i - V_a)}{kT}\right] \tag{2.45}$$

นิยามค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกิน  $n'$  และความหนาแน่นของโฮลส่วนเกิน  $p'$  ที่เกิดขึ้นคือ

$$n' \equiv n - n_0 \tag{2.46}$$

$$p' \equiv p - p_0 \tag{2.47}$$

แล้ว

$$n'_p(-x_p) = n_{po}(-x_p) \left[ \exp\left(\frac{-qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \tag{2.48}$$

$$p'_n(x_n) = p_{no}(x_n) \left[ \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \tag{2.49}$$

**2.10 การวิเคราะห์ไดโอดอุดมคติ** (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏี, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; ดุสิต, 2535)

ในเบื้องต้นจะพิจารณาการฉีดโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีข้ามรอยต่อเข้าไปในเนื้อสารชนิดสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านศูนย์กลางการรวมตัว ดังนั้นสมการความต่อเนื่องในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนอกบริเวณรอยต่อคือ

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p_n}{\partial t} &= D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - (G - R) \\
 &= D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - U
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จากสมการ

$$U = p'_n / \tau_p = (p_n - p_{no}) / \tau_p$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{(p_n - p_{no})}{\tau_p} \quad (2.50)$$

ในสภาวะคงตัว  $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$  แล้ว จะได้สมการเป็น

$$0 = D_p \frac{d^2 p'_n}{dx^2} - \frac{p'_n}{\tau_p} \quad (2.51)$$

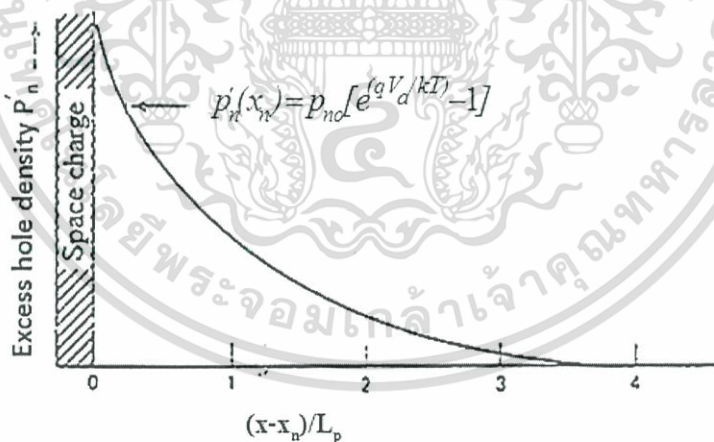
ผลเฉลยของสมการที่ (2.51) คือ

$$p'_n(x) = A \exp\left(-\frac{(x-x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) + B \exp\left(\frac{(x-x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) \quad (2.52)$$

### 2.10.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว

จากรูปที่ 2.22 ถ้า  $W_B$  มีความยาวมากกว่าความยาวแพร่ซึมของโฮล  $L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p}$  ในกรณีที่โฮลที่ถูกฉีดเข้ามาในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนจนหมดก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า จะเรียกรณีนี้อาไดโอดยาว เนื่องจาก  $p'_n$  ควรจะต้องมีค่าน้อยลงตามระยะทาง  $x$  ที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลนี้ค่าคงตัว  $B$  ในสมการที่ (2.52) จะต้องเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$p'_n(x) = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1] e^{-(x-x_n)/L_p} \quad (2.53)$$



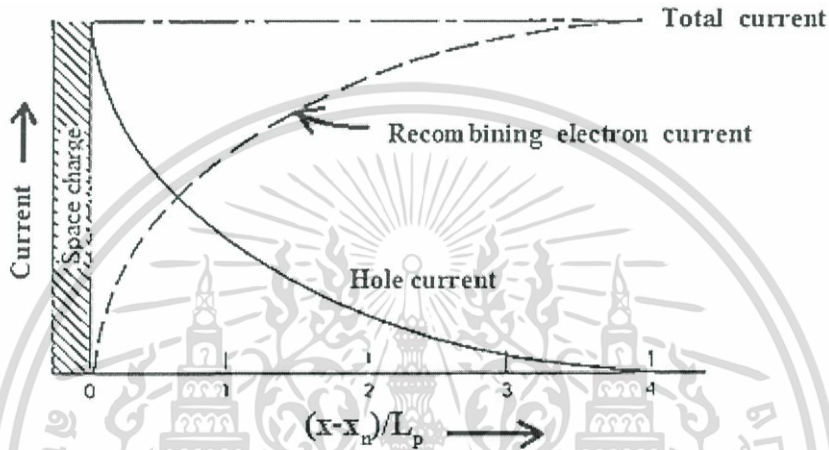
รูปที่ 2.22 แสดงการลดลงของค่าความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดยาวภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบอัสไปหน้าค่าเท่ากับ  $V_a$

ค่าความหนาแน่นของกระแสโฮลที่ไหลในเนื้อสารจะคิดเฉพาะกระแสที่มาจากกลไกการแพร่ซึมเท่านั้น เนื่องจากถือว่าแรงดันตกคร่อมในเนื้อสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยมาก ค่าสนามไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นศูนย์จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 J_p(x) &= -qD_p \frac{dp_n}{dx} = qD_p \frac{p_{no}}{L_p} \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] e^{-(x-x_n)/L_p} \\
 &= qD_p \frac{n_i^2}{N_d L_p} \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] e^{-(x-x_n)/L_p} \quad (2.54)
 \end{aligned}$$

กระแสโฮลจะมีค่าสูงสุดที่ระยะ  $x=x_n$  เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นแล้วความหนาแน่นของโฮลจะลดลง เนื่องจากรวมตัวกับอิเล็กตรอน แต่กระแสสุทธิจะต้องคงที่เสมอ ดังนั้นกระแสอิเล็กตรอนจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทาง  $x$  เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงค่ากระแสโฮล (เส้นทึบ) กับ ค่ากระแสอิเล็กตรอน (เส้นประ) ในเนื้อสารด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) เนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันไบอัสไปหน้า  $V_a$

ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพีของรอยต่อพี-เอ็น อิเล็กตรอนจะกลายเป็นพาหะข้างน้อยจึงเรียกว่าการฉีดพาหะข้างน้อย (minority-carrier injection) ถ้า  $W_E \gg L_n$  กระแสของอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $-W_E$  คือ

$$J_n = qD_n \frac{n_i^2}{N_a L_n} \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] e^{(x+x_p)/L_n} \quad (2.55)$$

โดยที่  $x$  ในสมการที่ (2.55) จะมีเครื่องหมายเป็นลบ นั่นคือกระแสอิเล็กตรอนจะลดลงเมื่อ  $x$  ออกห่างจากรอยต่อพี-เอ็น ไปสู่เนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากขึ้น กระแสไฟฟ้าสุทธิจะหาได้จากการนำเอาสมการที่ (2.54) รวมกับสมการที่ (2.55) นั่นคือ

$$\begin{aligned}
 J_i &= J_p(x_n) + J_n(-x_p) = qn_i^2 \left( \frac{D_p}{N_d L_p} + \frac{D_n}{N_a L_n} \right) \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\
 &= J_0 [e^{(qV_a/kT)} - 1] \quad (2.56)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ 
$$J_0 = qn_i^2 \left( \frac{D_p}{N_d L_p} + \frac{D_n}{N_a L_n} \right)$$

และเรียก  $J_0$  ว่าค่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว

### 2.10.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น

ถ้าทั้ง  $W_B$  และ  $W_E$  สั้นกว่า ความยาวแพร่ซึมของโฮล  $L_p$  และของอิเล็กตรอน  $L_n$  จะมีเพียงบางส่วนของพาหะข้างน้อยที่สูญหายไปเนื้อสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากการรวมตัวกับพาหะข้างมากในเนื้อสารเหล่านั้น แล้วพาหะข้างน้อยนี้จะเกิดการรวมตัวกันหมดที่ขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $W_B$  และ  $W_E$  สำหรับไดโอดสั้นจากการกระจายพจน์ในสมการที่ (2.52) ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์จะได้ว่า

$$p'_n(x) = A' + B' \frac{(x - x_n)}{L_p} \quad (2.57)$$

ที่ขั้วไฟฟ้า ณ ที่ตำแหน่ง

$$x = W_B, p'_n(W_B) = 0$$

หรือ

$$A' + B' \frac{(W_B - x_n)}{L_p} = 0$$

$$B' = \frac{-A' L_p}{(W_B - L_n)}$$

(2.58)

ที่ตำแหน่ง  $x = x_n$  จะได้ว่า

$$p'_n(x_n) = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1]$$

(2.59)

และที่ตำแหน่ง  $x = x_n$  นี้ สมการที่ (2.57) และ สมการที่ (2.59) ต้องมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$A' + B' \frac{(x_n - x_n)}{L_p} = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1]$$

แล้ว

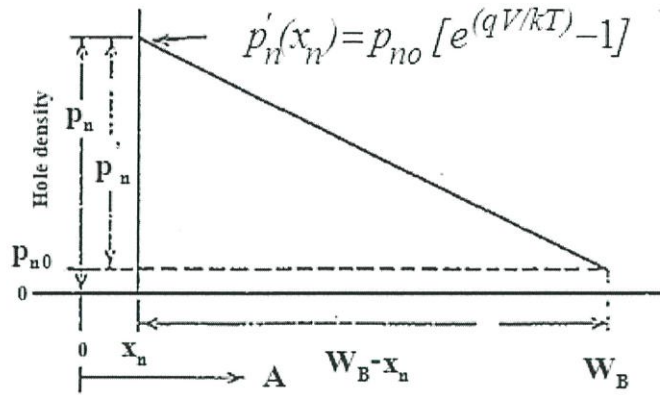
$$A' = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1]$$

(2.60)

แทนสมการที่ (2.58) และสมการที่ (2.60) ลงในสมการที่ (2.57) จะได้

$$p'_n(x) = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1] \left( 1 - \frac{x - x_n}{W_B} \right) \quad (2.61)$$

เมื่อ  $W'_B = W_B - x_0$  ค่าความเข้มข้นของโฮลส่วนเกินจะลดลงแบบเชิงเส้นกับระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็น ของ ไดโอดสั้นภายใต้การไบอัสไปหน้า  $V_a$

จะหาค่าความหนาแน่นของกระแสโฮล จะได้ว่า

$$\begin{aligned} J_p &= -qD_p \frac{dp}{dx} = qD_p \frac{P_{n0}}{W_B'} \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\ &= qD_p \frac{n_i^2}{N_d W_B'} \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.62)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถที่จะหาค่าความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังสมการ

$$J_n = qD_n \frac{n_i^2}{N_a W_E'} \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \quad (2.63)$$

ค่าความหนาแน่นกระแสสุทธิในไดโอดสั้นคือ

$$\begin{aligned} J_t &= qn_i^2 \left( \frac{D_p}{N_d W_B'} + \frac{D_n}{N_a W_E'} \right) \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\ &= J_0 \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.64)$$

เมื่อ

$$J_0 = qn_i^2 \left( \frac{D_p}{N_d W_B'} + \frac{D_n}{N_a W_E'} \right)$$

ในทางปฏิบัติไดโอดที่ใช้งานจริงอาจจะเป็นรูปแบบการผสมของไดโอดสั้นกับไดโอดยาวก็ได้ ซึ่งการหาค่ากระแสอิเล็กตรอนและโฮลสามารถนำเอาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไดโอดยาวและไดโอดสั้นมาประยุกต์ใช้ได้ทันที จากสมการที่ (2.56) และสมการที่ (2.64) ภายใต้การไบอัสไปหน้ากระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตามค่าของ  $V_a$  เนื่องจากการฉีดพาหะข้างมากข้ามรอยต่อ แต่ภายใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสอิมิตัวปริมาณเล็กน้อยไหลผ่านไดโอด เนื่องจากการฉีดพาหะข้างน้อยข้ามรอยต่อ โดยที่กระแสอิมิตัวนี้ไม่ขึ้นกับแรงดันย้อนกลับ

2.11 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง (space-charge-region currents) (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุขฤกษ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

ในกรณีไดโอดอุดมคติซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.56) และ สมการที่ (2.62) นั้น ยังไม่ได้คิดถึงผลของกระแสไฟฟ้าที่อาจจะลดลงภายใต้การไบอัสไปหน้าเนื่องจากพาหะอิสระสูญหายไปบางส่วน ซึ่งเกิดจากกลไกการรวมตัวผ่านศูนย์กลางการรวมตัวในบริเวณประจุค้างในทางกลับกันพาหะอาจถูกสร้างขึ้นได้ ภายใต้การไบอัสย้อนกลับยังผลให้กระแสไฟฟ้าอิมิตัวมีค่ามากกว่าค่าที่ได้ในสมการของไดโอดอุดมคติ

จากทฤษฎีของช็อกเลย์-ฮอลล์-รีด สามารถหาอัตราการเกิดหรือการรวมตัวสุทธิของพาหะได้จากสมการ

$$U = n_i^2 \frac{\left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right]}{\left[ p + n + 2n_i \cosh\left(\frac{E_i - E_i}{kT}\right) \tau_0 \right]} \quad (2.65)$$

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากพาหะที่เกิดหรือรวมตัวในบริเวณประจุค้างคือ

$$J_r = q \int_{-x_p}^{x_n} U dx \quad (2.66)$$

ถ้าประมาณว่า  $E_i \approx E_i$ ,  $p=n=n_i \exp(qV_a/2kT)$  แล้วแก้สมการ (2.65) จะกลายเป็น

$$U = \frac{n_i^2 \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right]}{2n_i \left[ e^{(qV_a/kT)} + 1 \right] \tau_0} \quad (2.67)$$

แทนสมการที่ (2.67) ลงในสมการที่ (2.66) จะได้

$$J_r = \frac{qx'n_i^2 \left[ e^{(qV_a/kT)} - 1 \right]}{2n_i \left[ e^{(qV_a/kT)} + 1 \right] \tau_0} \approx \frac{qx'n_i}{2\tau_0} \exp(qV_a/2kT) \quad (2.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\tau_0 = 1/N_i \sigma V_{th}$  ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากกลไกการรวมตัวของพาหะในบริเวณประจุค้ำภายใต้การไบอัสไปหน้าจะเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันไฟฟ้าในแบบ  $\exp(qV_a/2kT)$  ซึ่งจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าในกรณีของไดโอดอุดมคติอัตราส่วนระหว่าง  $J_i / J_r$  ภายใต้การไบอัสไปหน้าคือ

$$\frac{J_i}{J_r} = \frac{2n_i}{x_d} \left[ \frac{L_n}{N_a} + \frac{L_p}{N_d} \right] \exp(qV_a/2kT) \quad (2.69)$$

ในสารกึ่งตัวนำที่มีข้อบกพร่องผลึกน้อย ค่าความยาวแพร่ซึมจะยิ่งมากขึ้น ยังผลให้ค่า  $J_i$  ยิ่งเด่นกว่าค่า  $J_r$  ในกรณีไดโอดหัวต่อด้านเดียวที่มีค่า  $L_n = 60$  ไมโครเมตร,  $x_d = 0.25$  ไมโครเมตร,  $N_a = 10^{16}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร และ  $J_i$  จะมีค่ามากกว่า  $J_r$  เมื่อ  $V_a$  มากกว่า 0.375 โวลต์

ภายใต้การไบอัสกลับทาง ตัวเศษของสมการที่ (2.63) จะมีค่าเป็น  $-n_i^2$  ยังผลให้  $U$  มีค่าเป็นลบแสดงว่ามีการเกิดพาหะสุทธิ (net generation) ขึ้นในบริเวณประจุค้ำ บริเวณความกว้าง  $x_i$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายในบริเวณประจุค้ำ  $x_d$  เท่านั้นที่จะมีการเกิดพาหะสุทธิอย่างมีประสิทธิภาพและต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข  $p = n \ll n_i$  ซึ่งจะทำให้  $U$  ของสมการที่ (2.63) กลายเป็น

$$U = -n_i / 2\tau_0$$

แทนค่า  $U$  ลงในสมการที่ (2.65) จะได้ว่า

$$J_g = \frac{qn_i x_i}{2\tau_0} \quad (2.70)$$

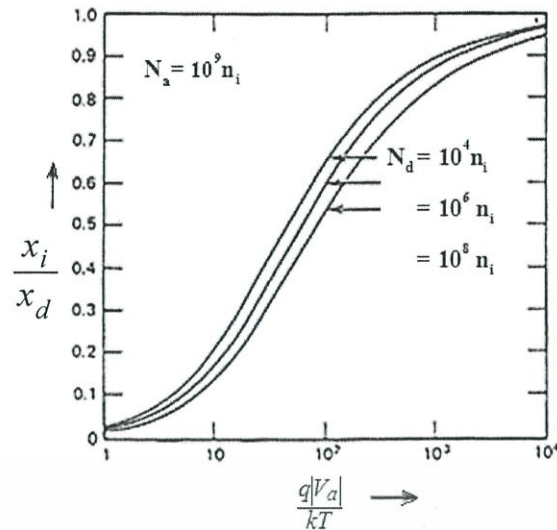
โดยประมาณว่าศูนย์กลางการเกิดหรือการรวมตัวของพาหะจะอยู่ที่บริเวณ  $E_i$  ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับรอยต่อ  $p^+ - n$  บริเวณประจุค้ำจะอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ความกว้างของบริเวณประจุค้ำ  $x_d$  และบริเวณ  $x_i$  ซึ่งจะมีอัตราการเกิดพาหะสูงสุดจะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} x_d &= \left[ \frac{2\varepsilon_s}{qN_d} (\phi_i - V_a) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[ \frac{2\varepsilon_s kT}{q^2 N_d} \left( \ln \left( \frac{N_d N_a}{n_i^2} \right) - \frac{qV_a}{kT} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.71)$$

และ

$$x_i = \left( \frac{2\varepsilon_s kT}{q^2 N_a} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ \left( \ln \left( \frac{N_d}{n_i} \right) - \frac{qV_a}{kT} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \ln \frac{N_d}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.72)$$

ซึ่ง  $V_a$  คือ แรงดันไบอัส  $V_a < 0$  ในกรณีไบอัสย้อนกลับ) ทั้ง  $x_d$  และ  $x_i$  จะขึ้นกับรากที่สองของแรงดันไบอัสย้อนกลับ ความแตกต่างระหว่าง  $x_d$  และ  $x_i$  จะมีค่าน้อยลง เมื่อแรงดันย้อนกลับมีค่ามาก รูปที่ 2.33 แสดงอัตราส่วนของ  $x_i / x_d$  ที่เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆของรอยต่อแบบชั้นบันไดด้านเดียว  $p^+ - n$



รูปที่ 2.25 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่าง  $x_i/x_d$  เป็นฟังก์ชันกับ ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆของรอยต่อ  $p^+ - n$

## 2.12 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย, 2556)

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ  $10^{-5} - 10^{-7}$  ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือการควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากอุปกรณ์ใส่สารตั้งต้น เมื่อให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นให้ระเหยหรือระเหิดขึ้นไปยังแผ่นฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้วเกิดเป็นฟิล์มบาง

### 2.12.1 อัตราการระเหยสาร

จากการทดลองของเฮิร์ตซ์ (Hertz) และ Knudsen พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุลในสุญญากาศจากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.73)$$

เมื่อ  $\phi_e$  คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา

$P_e$  คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์

$M$  คือ มวลโมเลกุล

$T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate:  $\Gamma_e$ ) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 \times 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.74)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

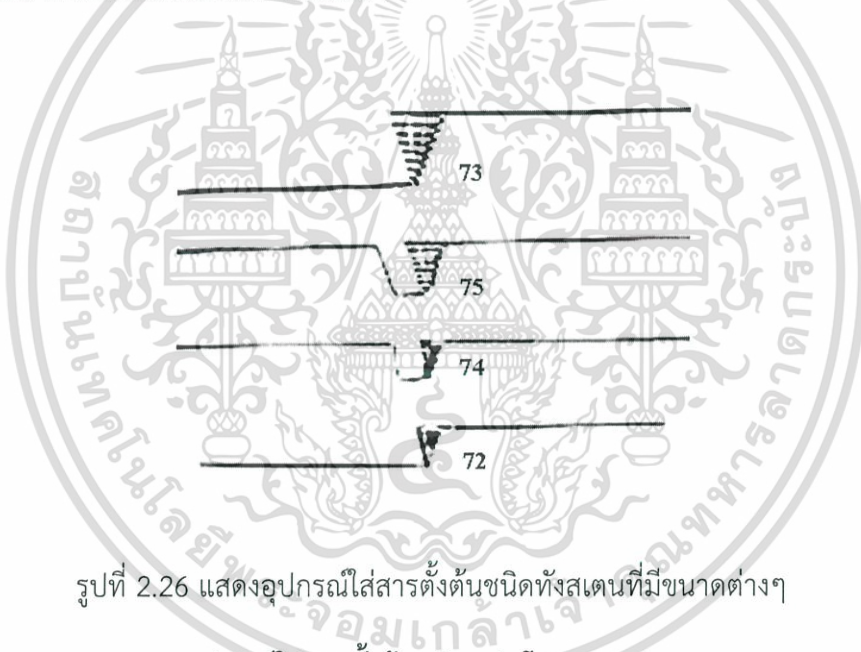
ที่ความดัน  $10^{-2}$  ทอร์ ค่าของ  $\Gamma_e$  ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ  $10^{-4}$  กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสารคือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

### 2.12.2 อุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนจะต้องให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำที่ต้องการนำมาเคลือบบนผิวหน้าแผ่นฐานรองโดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นอุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นและให้ความร้อนโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ อุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

#### 2.12.2.1 อุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นชนิดทั้งสแตน

อุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นนี้จะอยู่ในรูปพันรอบเดียวหรือหลายรอบเป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน โดยขดลวดทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทั้งสแตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2,200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง

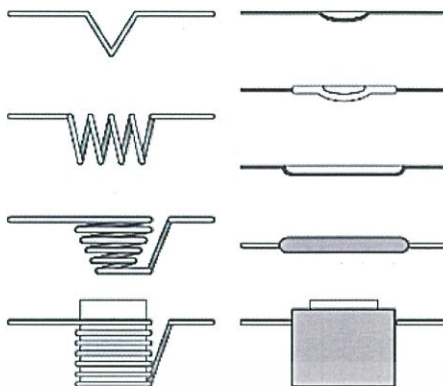


รูปที่ 2.26 แสดงอุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นชนิดทั้งสแตนที่มีขนาดต่างๆ

#### 2.12.2.2 อุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นชนิดแผ่นโลหะคงรูป

อุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นชนิดแผ่นโลหะคงรูป เช่น ทั้งสแตน แทนทาลัม และโมลิบดีนัมจะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวดคือ มีความต้านทานในตัวเองและให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำแต่กระแสสูง อุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปแบบต่างๆ

### Resistance Heated Evaporation Sources



รูปที่ 2.27 แสดงอุปกรณ์ใส่สารตั้งต้นที่มีรูปทรงที่มีขนาดต่างๆทางเรขาคณิตแบบต่างๆ

## 2.13 สายละลายที่ใช้ในการกัดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน (ฐิตินัย, 2556; ฐิตินัย,2557)

### 2.13.1 โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์

โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์เป็นของแข็งไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ระเหย ไม่ติดไฟ น้ำหนักโมเลกุล 56.10 จุดหลอมเหลว 360 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 2.04 สามารถทำปฏิกิริยารุนแรงกับโลหะหลายชนิด เช่น ดีบุก ทองแดง แมกนีเซียม สังกะสี เกิดก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งติดไฟได้ การสลายตัวของสารจากความร้อนเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์บางชนิดด้วย



รูปที่ 2.28 แสดงสารโพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์

### 1.13.2 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ชื่ออื่น Isopropanol, IPA, 2-Propanol, Propan-2-ol, Dimethyl carbinol, Rubbing alcohol สูตรโมเลกุล  $C_3H_8O$  น้ำหนักโมเลกุล 60.1 CAS Number 67-63-0 UN Number 1219 ลักษณะทางกายภาพ ของเหลว สี ไม่มีสี มีกลิ่นแอลกอฮอล์ ติดไฟได้ เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการทำมาสะอาดบางครั้งอาจเรียกว่า แอลกอฮอล์เช็ดทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2558; Gowrish K. Rao, 2013)

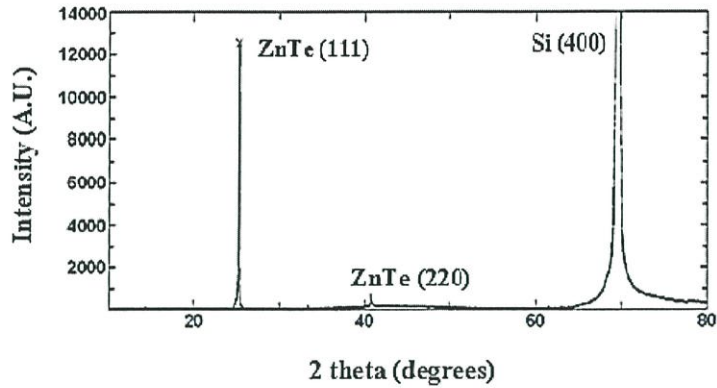
### 2.14.1 การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (fabrication and characterization of thermal evaporated n-Si/p-ZnTe thin film heterojunction diodes)

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe เป็นสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุหมู่ II และ VI มีลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง (direct bandgap) โดยมีขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน เท่ากับ 2.26 อิเล็กตรอนโวลต์ และเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงสูงถึงซึ่งคุณสมบัติทั้งสองอย่างนี้เหมาะแก่การศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (optoelectronic) เป็นอย่างมาก ในปัจจุบันได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับงานวิจัยของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe มาแล้วมากกว่า 2 ทศวรรษ โดยการนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe มาศึกษาไดโอดเปล่งแสงย่านแสงสีเขียว โฟโตดีเทคเตอร์ อิมิตเตอร์ความถี่เทระเฮิรตซ์ และ ตัวตรวจรู้อนุภาคพลังงานสูง เป็นต้น อีกทั้งยังมีการนำเอาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe มาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และเนื่องจาก ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe เป็นวัสดุที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างจึงเหมาะแก่การนำมาทำเป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์แทนเต็ม (tandem solar cell)

ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวที่สามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้แทบทุกชนิดและที่สำคัญที่สุดก็คือ เป็นวัสดุพื้นฐานที่ใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์ที่เรียกว่า “อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จุลภาค” หรือ “ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ดีไวซ์” (micro-electronic devices) เช่น “วงจรรวม” (Integrated Circuits: ICs) หรือที่เรียกว่า “ไอซี” ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทและสำคัญที่สุดสำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่

ปัจจุบันได้มีการนำเอาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe มาสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ร่วมกับแผ่นผลึกเดี่ยวของซิลิคอน เพื่อที่จะนำมาทำเป็นไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe ซึ่งไดโอดถือเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง ที่จำกัดทิศทางการไหลของประจุไฟฟ้าซึ่งจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียว และกั้นการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามซึ่งนับเป็นประโยชน์อย่างมากในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้เป็นเรียงกระแสไฟฟ้าในวงจรภาคจ่ายไฟ เป็นต้น

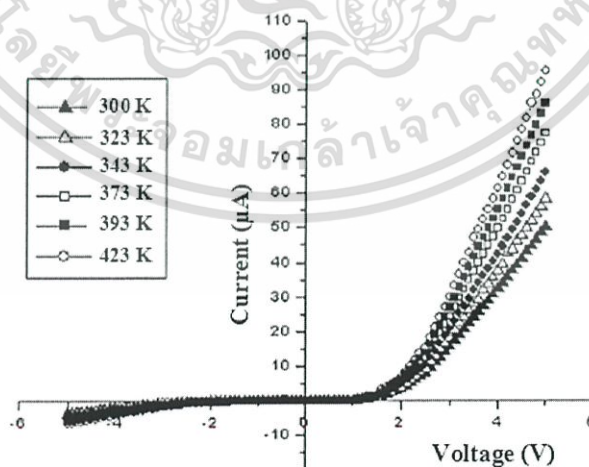
ในการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงพิกัดความเข้มของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ ไดโอดที่มีขอรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากภาพแสดงถึงพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่มีระนาบ (111) ที่เคลือบลงบนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งจากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) สามารถศึกษาได้จากชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ จากพิกัดความเข้มแสงของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe แสดงให้เห็นว่าแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ดังนั้นจึงใช้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe มาสร้างเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของไดโอดที่มีขอรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ ของไดโอดที่มีขอรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe

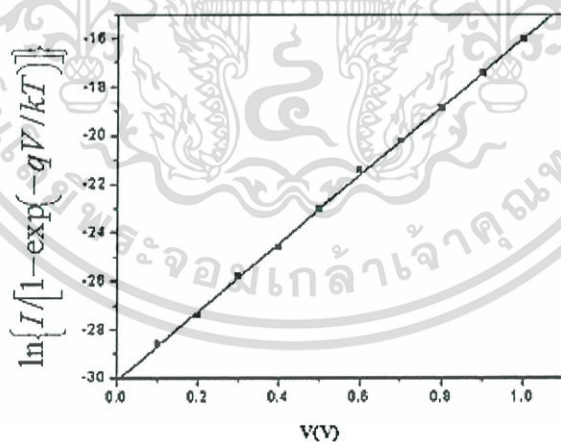
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพแสดงให้เห็นว่ากราฟมีลักษณะคล้ายกับกราฟของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ซึ่งโดยทั่วไปกลไกการทำงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ส่วนใหญ่จะอาศัยทฤษฎีของ เซส (Sze) และ โครเวล (Crowell) ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับการปลดปล่อยพาหะด้วยกระบวนการเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และสมการที่แสดงการแปรผันตรงของ ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า สามารถอธิบายได้จากสมการ

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) [1 - \exp\left(\frac{-qV}{kT}\right)] \quad (2.75)$$

- เมื่อ  $I_s$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์  
 $n$  คือ แฟกเตอร์อุดมคติ  
 $T$  คือ อุณหภูมิ  
 $q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน

จากสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln\{I/[1 - \exp(-qV/kT)]\}$  กับแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ของการไบอัสตรงที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำ ดังรูปที่ 2.31 ซึ่งกราฟที่ได้จะเป็นกราฟเส้นตรงแสดงให้เห็นถึงกลไกการนำกระแส คือ กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันซึ่งแฟกเตอร์ในอุดมคติ ( $n$ ) สามารถหาได้ จากค่าความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ 2.63 แสดงว่ารอยต่อนี้ไม่เป็นไดโอดในอุดมคติซึ่งจะมีค่าแฟกเตอร์อุดมคติเท่ากับ 1 เพราะมีอัตราการรวมตัวของพาหะที่บริเวณพร่องพาหะ (depletion region) สูง



รูปที่ 2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln\{I/[1 - \exp(-qV/kT)]\}$  กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ของการไบอัสตรงที่แรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของกลไกเทอร์มิออนิกส์อิมิสชัน ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-\phi_B}{kT}\right) \quad (2.76)$$

เมื่อ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด

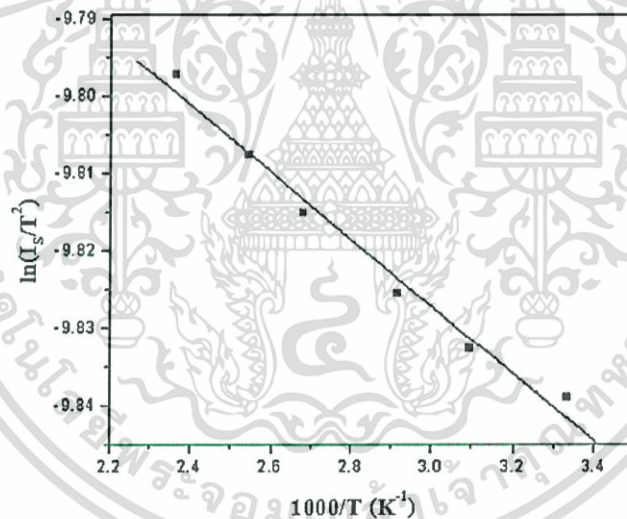
$A^*$  คือ ค่าคงที่ของริชาร์ดสัน

$\phi_B$  คือ ความสูงของกำแพงศักย์

ค่าความสูงของกำแพงศักย์สามารถคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I_s / T^2$  กับ  $1/T$  ดังรูปที่ 2.32 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.68 อิเล็กตรอนโวลต์

การไบอัสตรงที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่า  $\frac{3kT}{2}$  สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

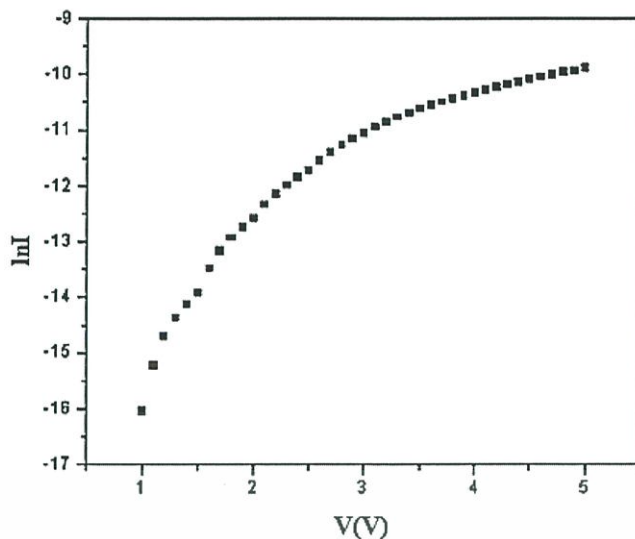
$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.77)$$



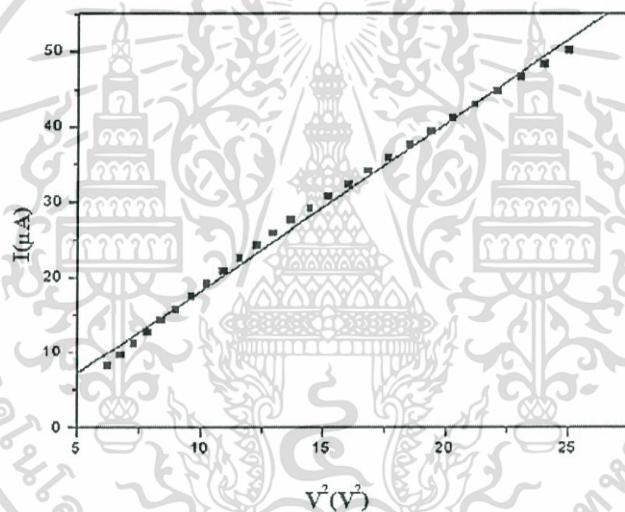
รูปที่ 2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(I_s/T^2)$  กับ  $1/T$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I$  กับ  $V$  ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe ดังรูปที่ 2.33 พบว่ากราฟที่ได้จะไม่เป็นกราฟเส้นตรง แสดงให้เห็นว่ากลไกการนำไฟฟ้าที่แรงดันสูงมีหลายชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I$  กับ  $V$



รูปที่ 2.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับกำลังสองของค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V^2$ )

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับ กำลังสองของแรงดันไฟฟ้า ( $V^2$ ) ที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูง ดังรูปที่ 2.34 แสดงให้เห็นว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการจำกัดการไหลของพาหะโดยประจุค้าง ซึ่งขนาดของค่ากระแสไฟฟ้าสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$I = \left( \frac{AV^2 N_c \epsilon_0 \epsilon_r}{8L^3 N_t} \right) \exp\left( \frac{-E_t}{kT} \right) \quad (2.78)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มบาง

$\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ

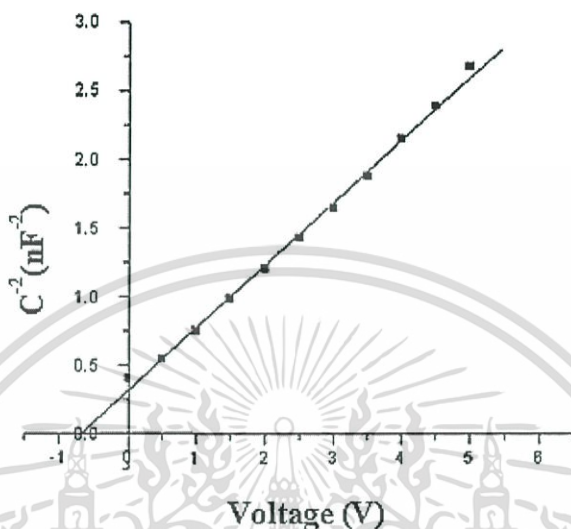
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$N_C$  คือ ค่าความหนาแน่นของสถานะยังผลของแถบนำ

$N_V$  คือ ค่าความเข้มข้นของกักตักประจุ

$L$  คือ ค่าความหนาของฟิล์มบาง

$\mu$  คือ ค่าสภาพคล่องของโฮล



รูปที่ 2.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่า  $C^{-2}$  กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ )

จากรูปที่ 2.35 แสดงการแปรผันตรงของค่า  $C^{-2}$  กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe ในสภาวะไบอัสย้อนกลับที่ความถี่เท่ากับ 300 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยอาศัยหลักการของชอตต์กี ซึ่งอธิบายได้จากสมการ

$$C^{-2} = 2 \left[ \frac{V - V_b + \frac{kT}{q}}{q\epsilon_0\epsilon_r N A^2} \right] \quad (2.79)$$

เมื่อ  $V$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า

$V_b$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ

$N$  คือ ค่าความหนาแน่นของพาหะ

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของไดโอด

จากสมการจะได้กราฟเส้นตรงแสดงว่าพาหะที่รอยต่อมีความเข้มข้นสม่ำเสมอและเป็นรอยต่อแบบชันบันได (abrupt junction) โดยจะหาค่า  $N$  ได้จากค่าความชันของกราฟดังสมการ

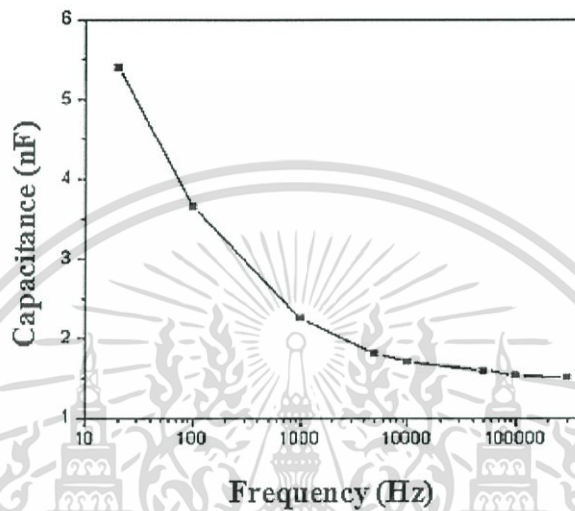
$$\frac{dC^{-2}}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_0\epsilon_r N A^2} \quad (2.80)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะมีค่าประมาณ  $1.13 \times 10^{18}$  ต่อลูกบาศก์เมตร โดยที่ค่าความหนา  $d_s$  ของบริเวณพร่องพาหะจะเป็นดังสมการ

$$d_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{C_0} \quad (2.81)$$

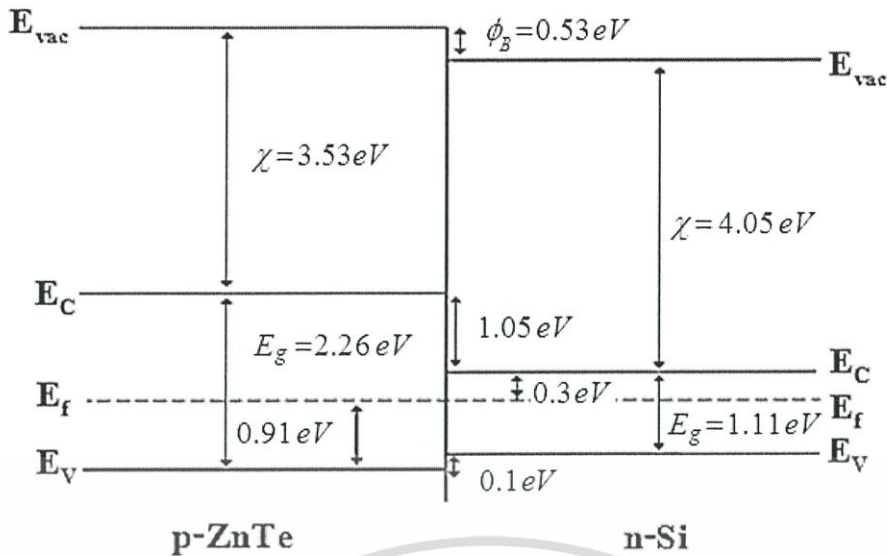
เมื่อ  $C_0$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีการไบแอส  
ดังนั้น  $d_s$  คือ จึงมีค่าประมาณ 173 นาโนเมตร



รูปที่ 2.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้า ( $C$ ) กับ ค่าความถี่ ( $f$ ) ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้า ( $C$ ) กับค่าความถี่ ( $f$ ) ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe ดังรูปที่ 2.36 เนื่องจากกับดักประจุที่บริเวณผิวหน้าสามารถกักเก็บประจุได้มากจึงส่งผลให้ที่ความถี่ต่ำจะมีค่าความจุไฟฟ้าสูง แลพบพลังงานและพลังงานการกระตุ้นของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si และ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe มีอิทธิพลต่อการศึกษากการแปรผันของค่าความต้านทานไฟฟ้า กับ ค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมซึ่งจะทำให้หลักการแบบจำลองของแอนเดอร์สัน (Anderson's model) ในการหาค่าแผนภาพแสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe ดังรูปที่ 2.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe

จากแผนภาพของลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ชนิดที่ 1 พบว่า ค่าความสูงของกำแพงศักย์จากทฤษฎีมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งมีความคลาดเคลื่อนที่ผิดเพี้ยนไปจากแบบจำลองของแอนเดอร์สันอาจเป็นผลมาจากพาหะที่อยู่ในบริเวณผิวหน้าของรอยต่อค่าอุปเซตของแถบนำ มีค่าเท่ากับ 1.05 อิเล็กตรอนโวลต์ และ ค่าอุปเซตของแถบวาเลนซ์มีค่าเท่ากับ 0.1 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งการทำให้แถบพลังงานลดลงทำได้โดยการฉีดประจุพาหะเข้าไปเพื่อช่วยเพิ่มการรวมตัวของพาหะที่บริเวณพร่องพาหะ (depletion region) ซึ่งมีประโยชน์ต่อการศึกษาลิงประดิษฐ์โฟโตอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก

การประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยว n-Si การนำไฟฟ้าของไดโอดจะเกิดจากกลไกเทอร์มิออนิกส์อิมิสชันที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำ และ กลไกการจำกัดการไหลของพาหะโดยประจุค้างที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูง ซึ่งในการศึกษาไดโอดในอุดมคติ สามารถศึกษาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีค่าแพคเตอร์อุดมคติ ประมาณ 2.63 ในการศึกษาการแปรผันของประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อกับแรงดันไฟฟ้าที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสย้อนกลับ ซึ่งค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าความหนาแน่นของประจุในบริเวณพร่องพาหะ (space charge density) และ ค่าความหนาของบริเวณพร่องพาหะ (depletion region) สามารถศึกษาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ( $C^{-2}$ ) กับ ค่าแรงดัน ไฟฟ้า ( $V$ ) และ แผนภาพของลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-Si/p-ZnTe สามารถศึกษาได้จากทฤษฎีของ แอนเดอร์สัน ที่อธิบายได้จากไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ชนิดที่ 1

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศแล้วทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆต่อไป

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2551)

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100)

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร
2. แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร
3. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
4. เครื่องสูบล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
5. เครื่องเป่าลมร้อน
6. แก๊สไนโตรเจน
7. นาฬิกาจับเวลา
8. ปากคีบ
9. เตอบ
10. สารเคมี
  - 10.1. น้ำยาล้างจาน
  - 10.2. น้ำปลอดประจุ
  - 10.3. อะซิโตน
  - 10.4. เอทานอล
  - 10.5. เมทานอล
  - 10.6. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
  - 10.7. โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์
11. เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
2. แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ที่ทำการกัดผิวหน้าด้วยสารละลายเคมีแล้ว และแผ่นกระจกสไลด์เพื่อนำไปใช้ทำเป็นแผ่นฐานรองรับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe
3. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ ZnSe ปริมาณ 0.3 กรัม
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ sartorius
5. เต้าเผาสาร

3.2 ขั้นตอนในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si(100) และแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2551)

3.2.1 การเตรียมแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

1. ตัดแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร
2. เตรียมสารละลายที่ใช้ในการกัดผิวหน้าของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ใส่บีกเกอร์
  - 2.1 โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 9 กรัม
  - 2.2 น้ำปอดประจุ 90 มิลลิลิตร
  - 2.3 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 20 มิลลิลิตร
3. นำสารละลายที่ใช้ในการกัดผิวหน้าแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ที่ใช้เป็นแผ่นฐานรองรับไปต้มจากนั้นใส่แท่งแม่เหล็กเพื่อคนสารละลายให้เข้ากัน
4. รออุณหภูมิ 80 องศา
5. จุ่มแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร ลงไปในสารละลายเป็นเวลา 30 วินาที
6. ล้างแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ด้วยน้ำปอดประจุ 5 ครั้ง
7. ทำการเป่าแห้งแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

1. ตัดแผ่นกระจกสไลด์ให้มีขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร ไปแช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปลอดประจุ
4. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
6. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปลอดประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
7. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
8. ทำการล้างด้วยน้ำปลอดประจุเป็นเวลา 10 นาที ตามขั้นตอนในข้อ 2-7 และจะนำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
9. ทำการเป่าแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อนและนำแผ่นสไลด์ไปอบแห้งเป็นเวลา 30 นาที

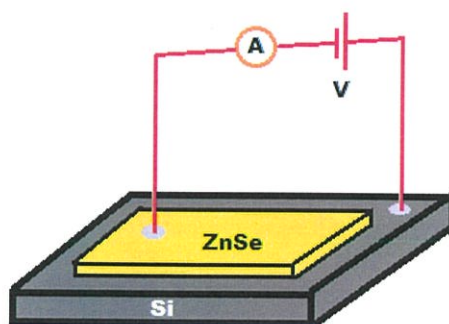
### 3.2.3 การเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

1. ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยทำการขจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่นด้วยอะซิโตนและเมทานอล
2. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศให้ครบถ้วน
3. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และ แผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้น ZnSe ปริมาณ 0.3 กรัม นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกให้หมดมาเป็นสารตั้งต้นที่บรรจุใส่ลงในภาชนะระเหยสาร (boat) ที่ทำจากโลหะโมลิบดีนัมเคลือบด้วยอลูมินา
4. นำแผ่นฐานรองรับกรณีทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้เตรียมไว้แล้ว มาวางลงบนหน้ากาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบ และ ขนาดที่ต้องการหลังจากนั้น ปิดห้องสุญญากาศ (ภาชนะสุญญากาศ) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสูบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ  $9 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบจนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ใช้ความดันช่วง  $5 \times 10^{-5}$  ถึง  $2 \times 10^{-6}$  มิลลิบาร์
7. ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย (shutter) แล้วเริ่มทำการระเหยสารเคมีโดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับโดยการเปิดสวิตช์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆจนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์ แล้วรอสักประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆจนถึง 100-130 แอมแปร์ จนได้ความหนาของฟิล์มบางประมาณ 500 ถึง 800 นาโนเมตร ซึ่งรวมแล้วทั้งหมดจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที
8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้วให้ปิดแผ่นกั้นการระเหยและทำการปิดวารีแอกซ์โดยค่อยๆลดกระแสลงอย่างช้าๆจนกระทั่งเป็นศูนย์
9. ต่อจากนั้นรอให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วจึงปิดปั๊มเทอร์โบจากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วเปิดวาล์วสูบอากาศและปั๊มกลโรตารี
10. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
11. นำแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe เป็นที่เรียบร้อยแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศนำไปตรวจสอบสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์
12. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance โดยใช้ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน 1.5406 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และ ความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์, ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของ LEO รุ่น LEO1450VP ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 20 - 300 เคลวิน โดยการทำให้ขั้วอิเล็กโทรดด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2 เซนติเมตรทางด้านที่เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) แล้วจาก นั้นจึงนำไปศึกษาด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิต่ำ แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพโครงสร้างของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2551)

#### 3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และที่เป็นไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน  $Cu_{K\alpha}$  1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์

#### 3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO1450VP

#### 3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ Thermo

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electron corporation ( $\text{He } \lambda \text{ ions } \alpha$ ) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 190 ถึง 1100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ )

### 3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาศักยภาพไฟฟ้า ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ ต่ำ 20 - 300 เคลวิน ได้แก่ นำไปศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ อุณหภูมิห้อง

3.3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน และอุณหภูมิสูง ในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2551; งามนิตย์, 2553)

- เครื่อง precision LCR meter ของ Agilent รุ่น E4980A ใช้สัญญาณไฟสลับ (ac signal) เท่ากับ 0.5 โวลต์
- มัลติมิเตอร์ รุ่น METEC 8007
- เครื่องทำความเย็นไครโอเจนิกและไครโอสแตต ยี่ห้อ Leybold รุ่น RW2
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ PL รุ่น MODEL 9700
- กาวเงินนำไฟฟ้าใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์โดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- สายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียม ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง และ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) และ อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษา ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25 - 300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบ สุญญากาศ



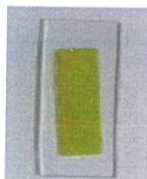
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) โดยใช้วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและได้ศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ทั้งที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ และ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน และศึกษา ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -1 ถึง 0.5 โวลต์ โดยใช้ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ แล้วทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และต่อจากนั้นจึงเขียนแผนภาพแสดงโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100)

### 4.1 ศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

#### 4.1.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

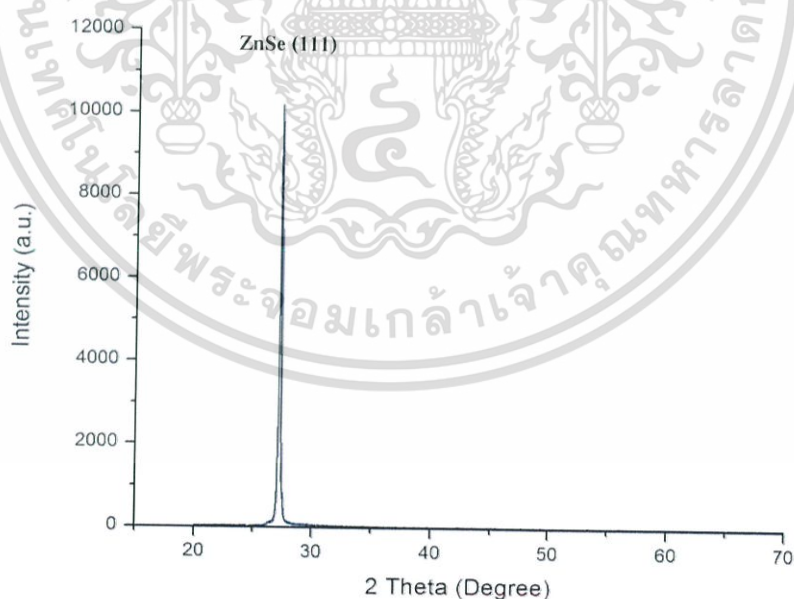
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

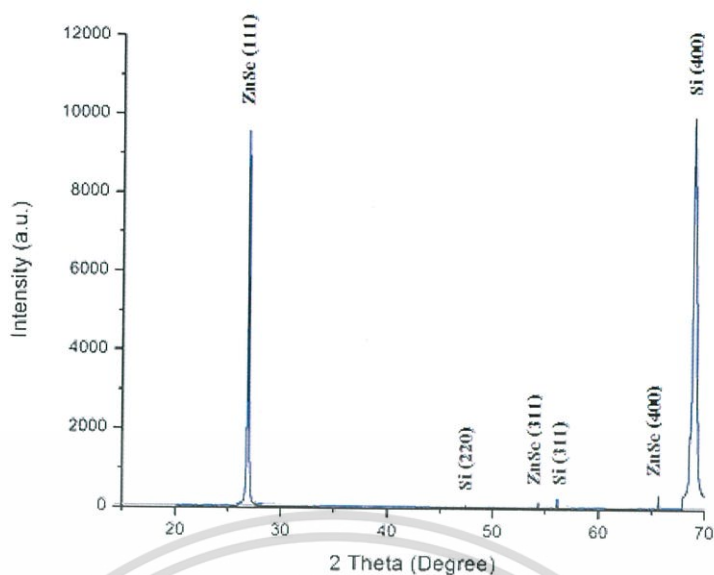
4.1.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

การศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



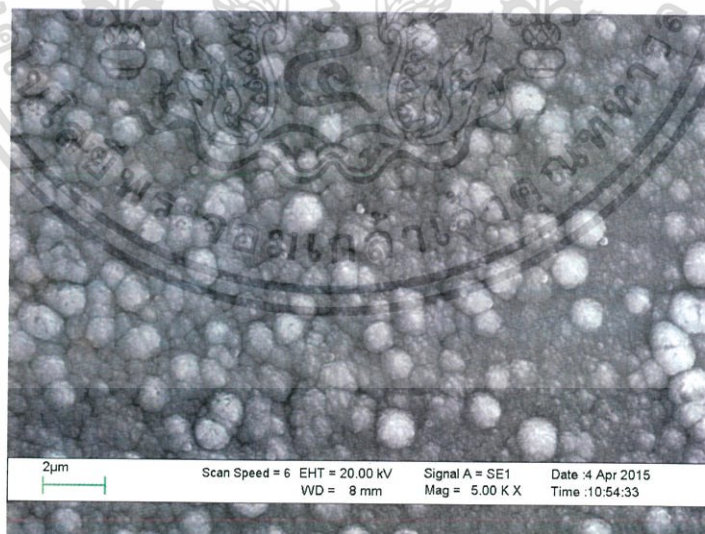
รูปที่ 4.3 แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



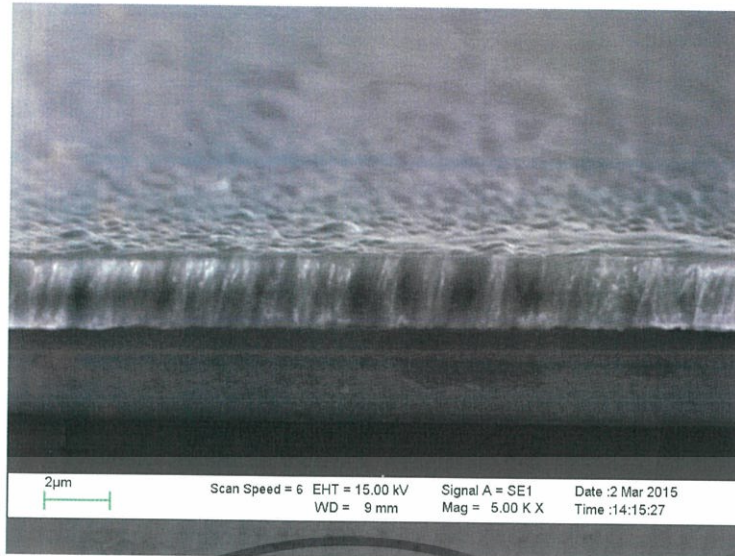
รูปที่ 4.4 แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

4.1.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



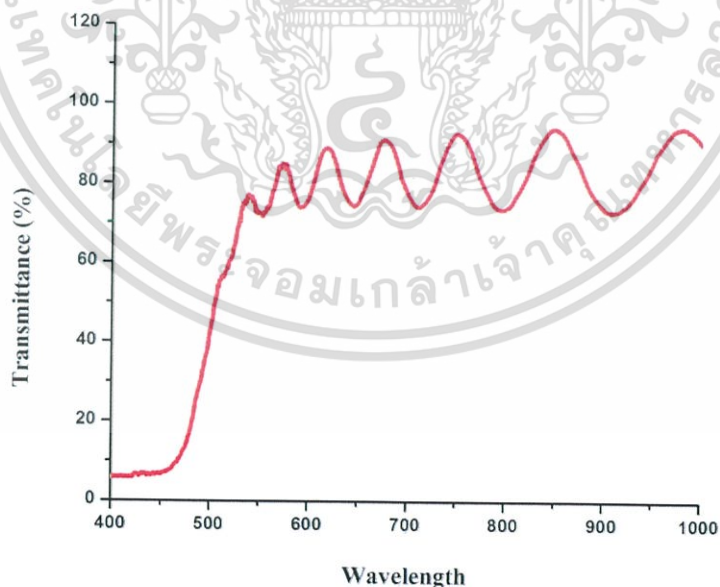
รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



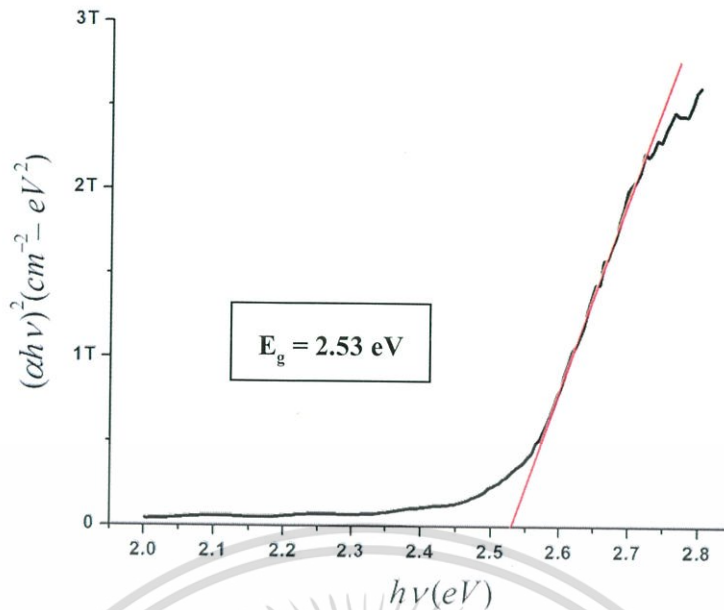
รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

4.1.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์การส่งผ่านแสงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่น 400 – 1000 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

#### 4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 – 300 เคลวิน ตลอดจนการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อ เป็นต้น

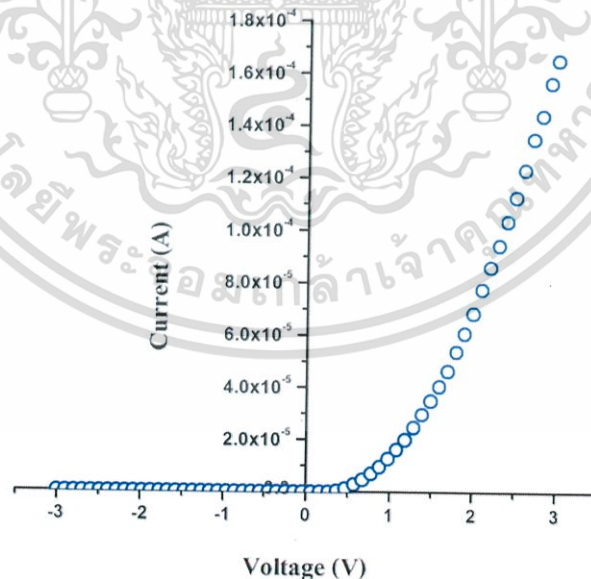
##### 4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอดทั่วไป โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

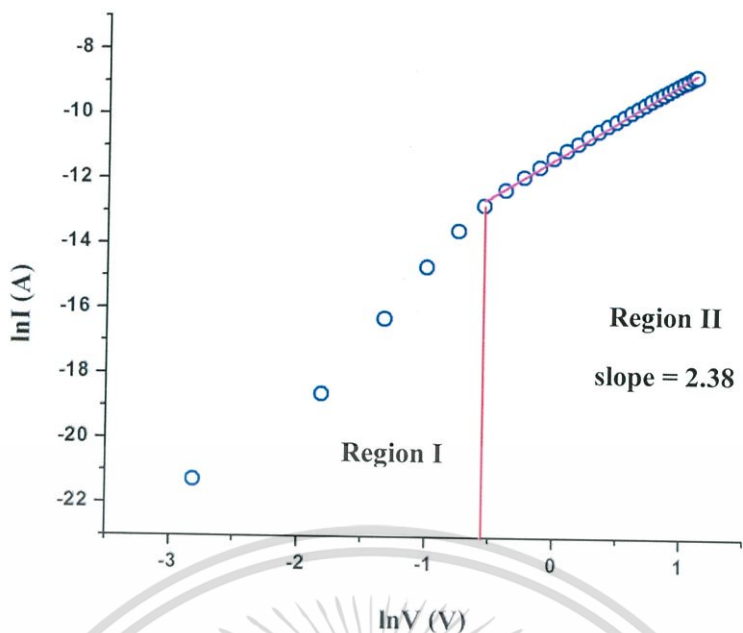
กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ในช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $\ln V$  ดังรูปที่ 4.10 ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องพบว่าที่แรงดันไฟฟ้า 0.06 ถึง 0.57 โวลต์ กลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และ ช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.57 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล จากนั้นเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $V$  ดังรูปที่ 4.11 เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อพี-เอ็น ที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.10 เพื่อใช้ช่วยหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติให้ถูกต้องยิ่งขึ้นและจากรูปที่ 4.12 แสดงกราฟเปรียบเทียบ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไบแอสกลับทางและไบแอสไปข้างหน้า ในการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $dV/d\ln I$  กับ ค่า  $I$

ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งจากกราฟนี้จะได้ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $H(I)$  กับ ค่า  $I$  ดังรูปที่ 4.14 จะได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงจะแสดงในตารางที่ 4.1

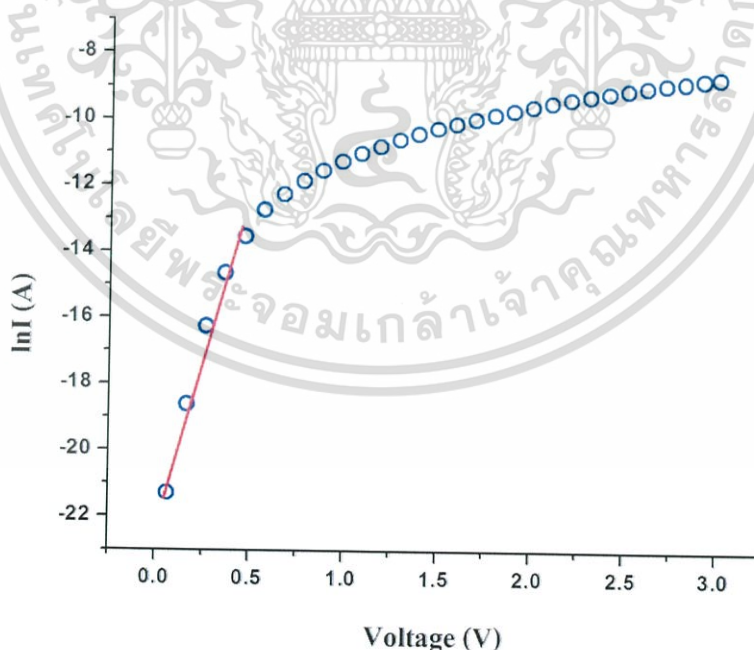


รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

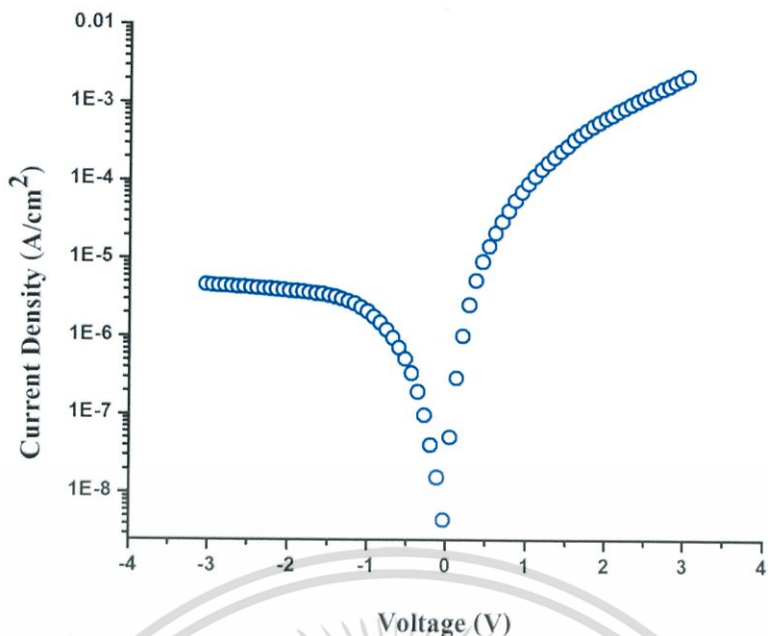


รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $\ln V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-ZnSe/p-Si (100)}$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $n\text{-ZnSe/p-Si (100)}$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากรูป 4.11 คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของกระแส ( $\ln I$ ) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) เพื่อใช้ในการคำนวณหา ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_s$ ) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ( $n$ ) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงช่วงที่มีการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชันที่พิจารณาจากช่วงของแรงดันไฟฟ้า จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของกระแส ( $\ln I$ ) กับ ค่าลอการิทึมของแรงดัน ( $\ln V$ ) ดังรูปที่ 4.10 ดังสมการ

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

เมื่อ  $I_s$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) - 1 \quad (4.2)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $V$  เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันตัดแกน ค่า  $\ln I$  โดยจุด ตัดมีค่าเท่ากับ  $\ln I_s$  และ มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ  $\frac{q}{nkT}$  ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหา ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ได้จากสมการที่ (4.2) จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{AA^* T^2}{I_s} \right) \quad (4.3)$$

ค่าความสูงกำแพงศักย์ ( $\phi_B$ ) ของสมการที่ (4.3) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิใดๆ และ  $A^*$  เท่ากับ 12 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรต่อเคลวินยกกำลังสอง

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหา ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.4)$$

ในความเป็นจริงแล้วไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ( $R_s$ ) เกิดขึ้นเสมอซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสารและที่บริเวณขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงๆ (region III) เพื่อให้ความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

$$I = I_s \left\{ \exp \left( \frac{q}{nkT} (V - IR_s) \right) - 1 \right\} \quad (4.5)$$

เมื่อ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ คือ

$$I_s = AA^* T^2 \exp \left( -\frac{q\phi_{B0}}{kT} \right) \quad (4.6)$$

อาจเขียนสมการที่ (4.5) อีกรูปหนึ่งได้เป็น

$$I = I_s \left\{ \exp \frac{q}{nkT} (V - IR_s) [1 - \exp(-qV/kT)] \right\} \quad (4.7)$$

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของช่วง (Cheung's Method) พิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสไปข้างหน้า โดยการแทนสมการที่ (4.6) ลงในสมการที่ (4.5) แล้วจะได้ว่า

$$V = IR_s + n\phi_B + \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (4.8)$$

หาอนุพันธ์ของค่า  $V$  เทียบกับ ค่า  $\ln I$  เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม จากสมการที่ (4.8) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $dV/d\ln I$  กับ ค่า  $I$  ดังรูปที่ 4.13 โดยค่าความชันของกราฟนั้นคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวงจร ( $R_S$ ) และจุดตัดแกนของค่า  $dV/d\ln I$  มีค่าเท่ากับ  $nkT/q$

ส่วนการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ (4.8) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของค่า  $H(I)$  ดังนี้

$$H(I) = V - n \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.10)$$

แล้วสมการที่ (4.10) จะกลายเป็น

$$H(I) = n\phi_B + IR_S \quad (4.11)$$

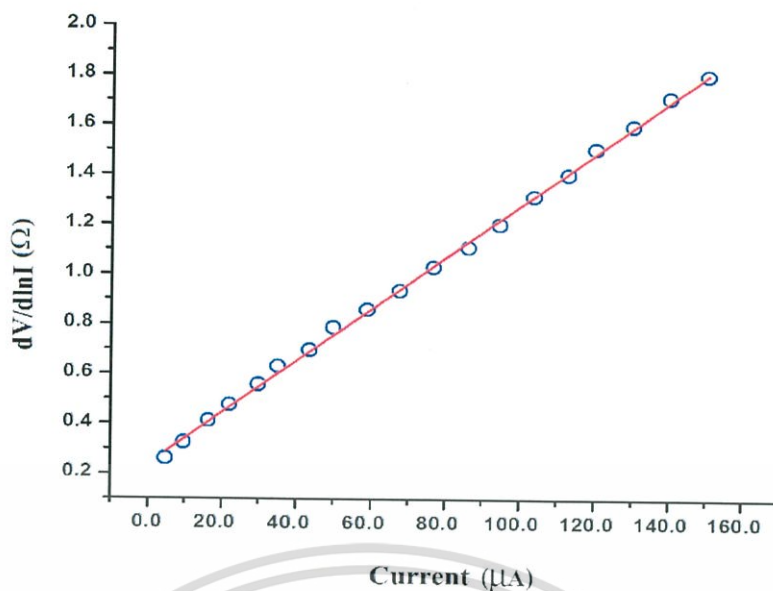
เมื่อทำการคำนวณค่า  $H(I)$  จากข้อมูลของ ค่ากระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $H(I)$  กับ ค่า  $I$  ก็จะได้ดังรูปที่ 4.8 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้งของค่า  $(n\phi_B)$  ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้ว นอกจากนี้ความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชันของค่า  $H(I)$  นั้นก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.9) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

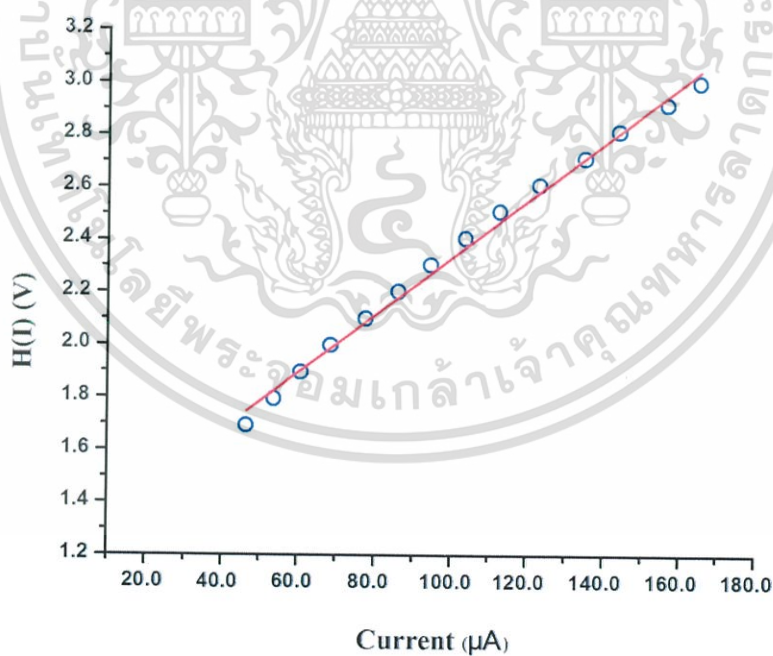
$$I = kV^m \quad (4.12)$$

$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.13)$$

เมื่อ  $m$  คือ ค่าความชันของกราฟ ถ้า  $m$  มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไชด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า  $m$  เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า  $m > 2$  จะหมายถึงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งจากผลการทดลองได้ค่า  $m$  เท่ากับ 2.38 แสดงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $dV/d\ln I$  กับ ค่า  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $H(I)$  กับ ค่า  $I$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

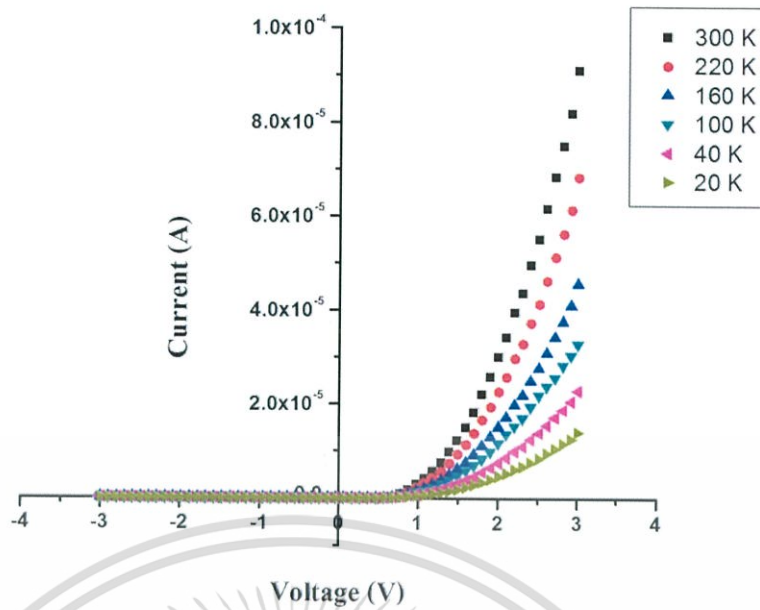
ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_S$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ ( $\phi_{B0}$ ) และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ( $R_S$ ) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Sample	Saturation Current $I_S$ ( $10^{-10}$ A)	Ideality Factor $n$		Barrier Height $\phi_{B0}$ (eV)		Series Resistance ( $R_S$ ) ( $10^4 \Omega$ )	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	[dV/d(lnI)]-I	I-V	H(I)-I	H(I)-I	[dV/d(lnI)]-I
Si/ZnSe	4.93	2.32	2.72	0.82	0.91	1.15	1.12

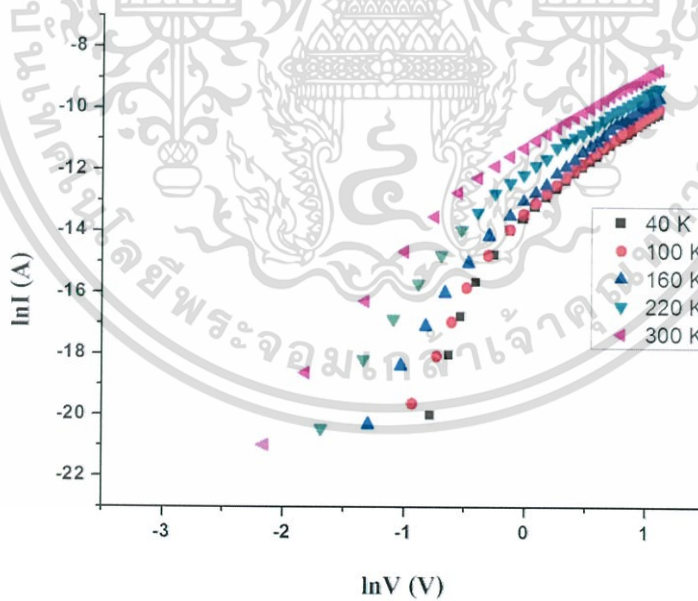
4.2.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลง ตามอุณหภูมิลดลงแสดงดังรูปที่ 4.15 และ ค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) สามารถศึกษาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $\ln V$  โดยสามารถแบ่งกลไกการนำไฟฟ้าได้เป็นสองช่วง คือ กลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและสามารถหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $V$  เพื่อนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล และในการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมจะใช้วิธีของชวงโดยค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 ถึง 300 เคลวิน ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงแสดงในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

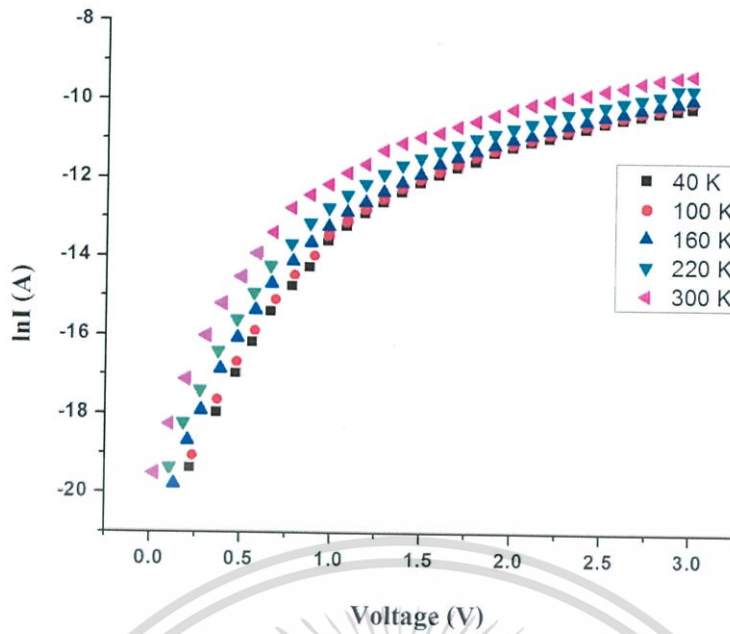


รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

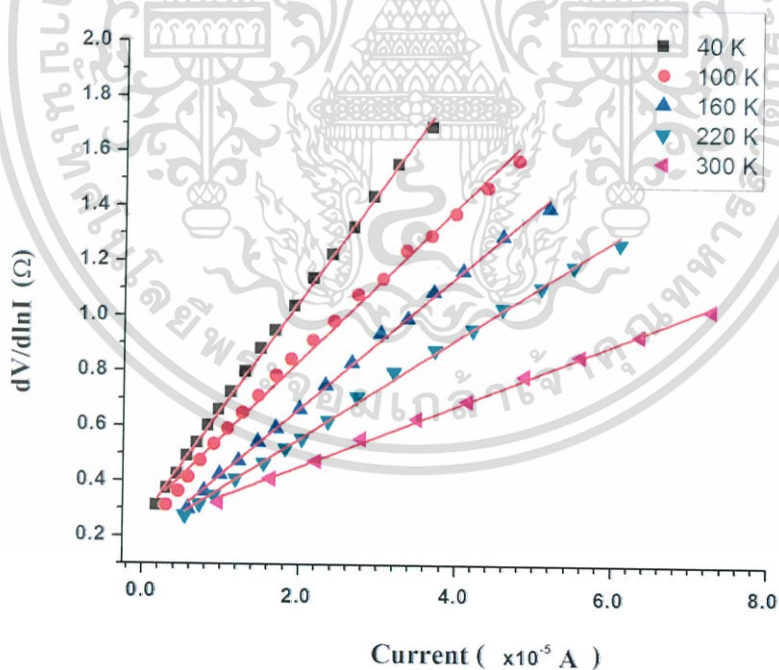


รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I$  กับ  $\ln V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

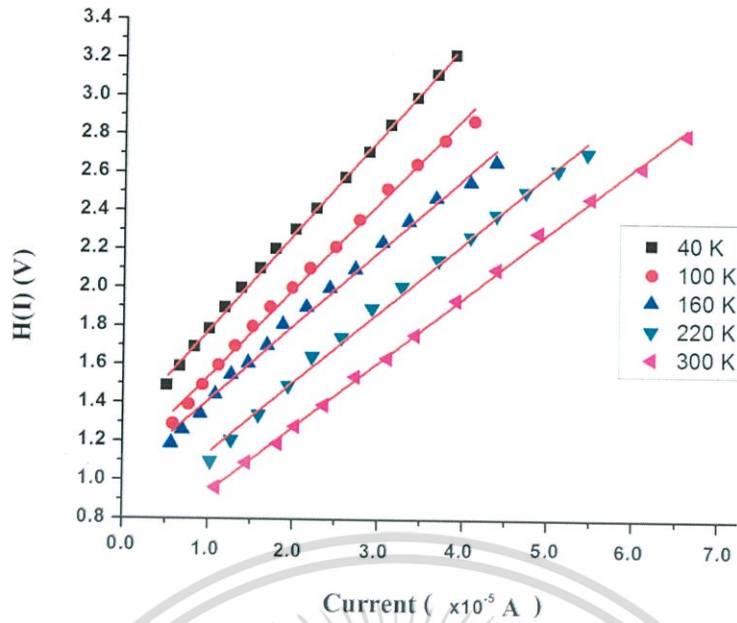


รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln I$  กับ  $V$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $dV/d\ln I$  กับ ค่า  $I$  ที่อธิบายวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $H(I)$  กับ ค่า  $I$  โดยวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความ ร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Temperature (K)	Saturation Current ( $I_s$ ) ( $10^{-10}$ A)	Ideality Factor ( $n$ )		Barrier Height (eV)		Series Resistance ( $10^4 \Omega$ )	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	dV/d(lnI)-I	I-V	H(I)-I	H(I)-I	dV/d(lnI)-I
20	68.79	55.76	60.51	0.05	0.09	4.89	4.57
40	70.88	28.85	31.54	0.10	0.17	4.31	3.99
60	73.04	18.51	22.12	0.16	0.21	3.95	3.53
80	76.79	13.85	16.17	0.21	0.26	3.56	3.14
100	79.12	11.06	14.03	0.27	0.32	3.10	2.81
120	84.86	9.18	12.08	0.33	0.38	2.93	2.65
140	1.01	7.81	9.96	0.39	0.45	2.80	2.57
160	1.09	6.77	8.12	0.44	0.51	2.71	2.42
180	1.22	5.90	7.52	0.50	0.57	2.62	2.39
200	1.27	5.27	7.14	0.56	0.62	2.51	2.18
220	1.46	4.61	6.37	0.62	0.69	2.20	1.82
240	1.81	3.92	5.31	0.67	0.74	2.10	1.69
260	2.11	3.30	4.02	0.73	0.78	1.85	1.53
270	2.50	2.84	3.87	0.75	0.80	1.70	1.45
280	3.24	2.69	3.52	0.77	0.83	1.65	1.38
290	4.12	2.51	3.15	0.79	0.87	1.42	1.27
300	4.93	2.32	2.74	0.82	0.91	1.35	1.12

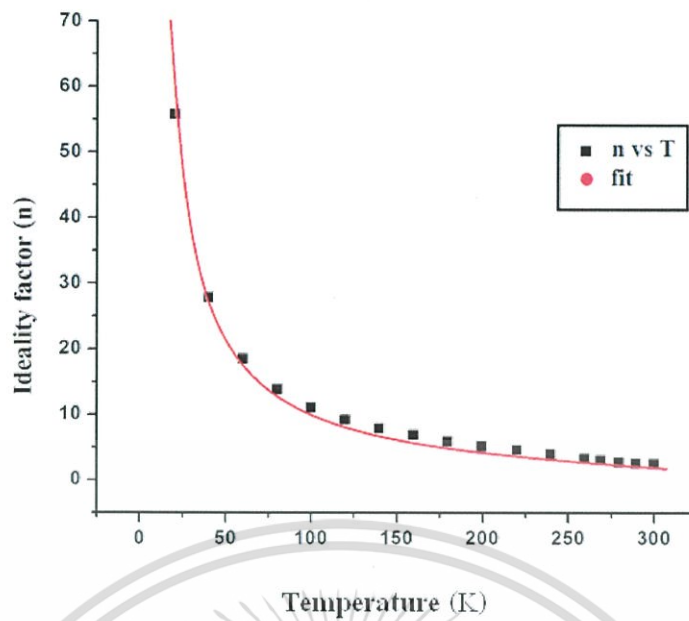
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองตารางที่ 4.2 จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอ้อมตัวย้อนกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิที่ได้จากกลไกเทอร์มิโออิมมิสชันและวิธีของชวงมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงและมีลักษณะไม่เป็นกราฟเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.21

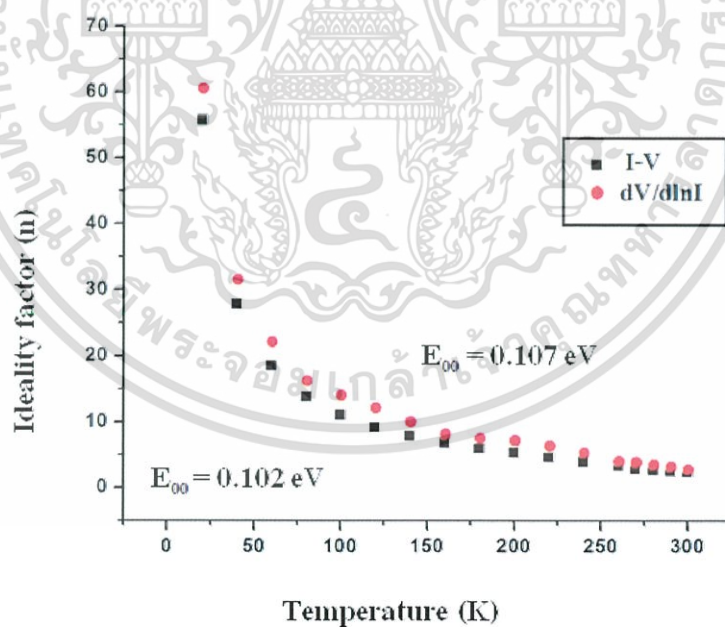
ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิโออิมมิสชันและวิธีของชวงมีค่าลดลงตามค่าอุณหภูมิลดลง แสดงดังรูปที่ 4.22 ส่วนค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกับกลไกเทอร์มิโออิมมิสชัน

การที่ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ และ ค่าความสูงกำแพงศักย์ ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ขอต่ก็มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิมีค่าสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้พาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบอัสไปหน้าหรือพลังงานกระตุ้นจากภายนอกเพียงเล็กน้อย พาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์มีค่ามาก และ ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต่ที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังงานของพาหะอิสระมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อที่พาหะจะไหลข้ามกำแพงศักย์ ซึ่งกำแพงศักย์ที่สามารถข้ามได้นั้นก็เป็นกำแพงศักย์ที่มีค่าน้อยเนื่องจากไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำพบว่า ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าน้อยและค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต่จะมีค่ามาก ที่อุณหภูมิต่ำพาหะอิสระที่สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าต่ำก็ยังมีอยู่ แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานที่สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้

ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากวิธีของชวง พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.23 การที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงนั้นมีสาเหตุมาจากการที่ค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระลดลง ซึ่งเกิดจากการที่กับดักพาหะได้จับพาหะอิสระเอาไว้ที่บริเวณผิวรอยต่อและการที่พาหะอิสระมีพลังงานน้อยลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลงจึงทำให้พาหะอิสระอยู่กับที่ (freeze - out - carrier) การที่จะให้พาหะอิสระเคลื่อนที่ข้ามบริเวณรอยต่อ p+ - n ได้นั้นจำเป็นต้องให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

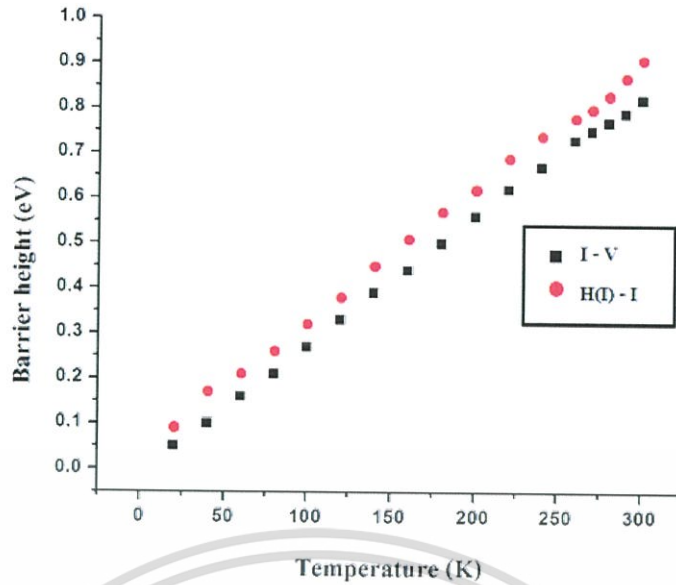


รูปที่ 4.20 แสดงการหาค่า  $E_{00}$  โดยการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

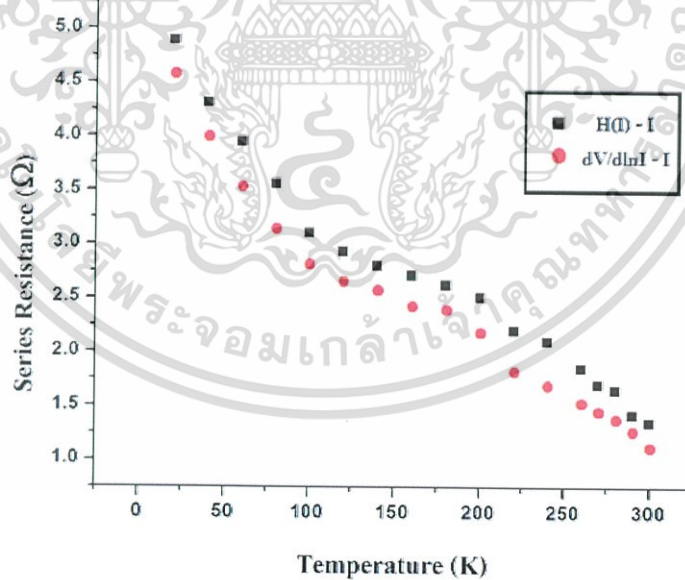


รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

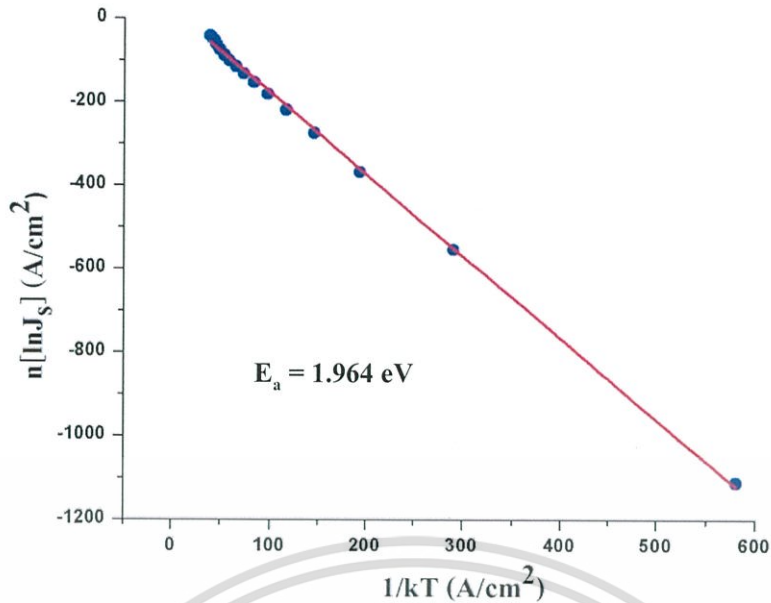


รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่ได้จากวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ  $n[\ln J_s]$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิตพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ สามารถนำไปหาค่า  $E_{00}$  ได้จากความสัมพันธ์

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (4.14)$$

โดย  $E_{00}$  คือ ค่าลักษณะเฉพาะของค่าพลังงานการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ที่ได้จากรูปที่ 4.21 จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกและวิธีของชวงมีค่าเท่ากับ 0.102 และ 0.107 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.24 สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อได้จากสมการที่ (4.14)

$$n \ln(J_s) = -E_a \left( \frac{1}{kT} \right) + n \ln(J_0) \quad (4.15)$$

พลังงานกระตุ้น  $E_a$  หาได้จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.23

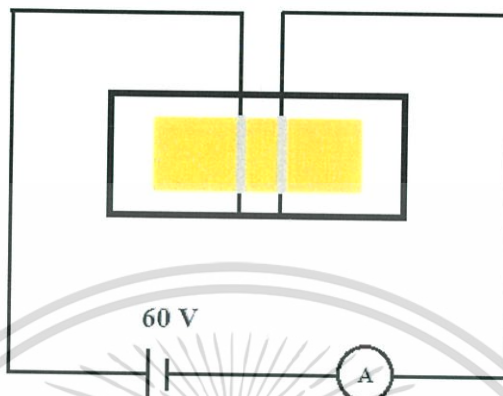
ดังนั้น ความชัน =  $E_a$

จะได้  $E_a = 1.964$  อิเล็กตรอนโวลต์

จากค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1.964 อิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4.2.3 ผลการศึกษาการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.25 แสดงวงจรที่ใช้ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

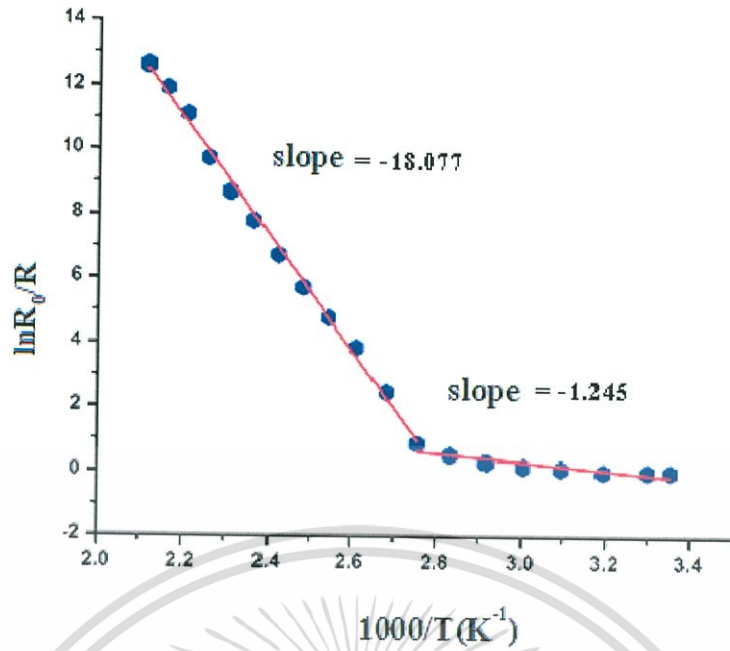
จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าโดยให้ค่าแรงดันไฟฟ้า คงที่ 60 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศแสดงผลการทดลองได้ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ 60 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

T (°C)	V (V)	I (A)	R ( $\Omega$ )	$\ln R_0/R$	1000/T(K <sup>-1</sup> )
25	60	$3.00 \times 10^{-8}$	$2.00 \times 10^9$	3.35	0
30	60	$3.00 \times 10^{-8}$	$2.00 \times 10^9$	3.30	0
40	60	$3.00 \times 10^{-8}$	$2.00 \times 10^9$	3.19	0
50	60	$3.30 \times 10^{-8}$	$1.82 \times 10^9$	3.09	0.09
60	60	$3.50 \times 10^{-8}$	$1.71 \times 10^9$	3.00	0.15
70	60	$4.00 \times 10^{-8}$	$1.50 \times 10^9$	2.91	0.28
80	60	$5.00 \times 10^{-8}$	$1.20 \times 10^9$	2.83	0.51
90	60	$7.00 \times 10^{-8}$	$8.57 \times 10^8$	2.75	0.84
100	60	$3.50 \times 10^{-7}$	$1.71 \times 10^8$	2.68	2.45
110	60	$1.40 \times 10^{-6}$	$4.29 \times 10^7$	2.61	3.84
120	60	$3.50 \times 10^{-6}$	$1.71 \times 10^7$	2.54	4.75
130	60	$9.00 \times 10^{-6}$	$6.67 \times 10^6$	2.48	5.70
140	60	$2.50 \times 10^{-5}$	$2.40 \times 10^6$	2.42	6.72
150	60	$4.00 \times 10^{-5}$	$1.50 \times 10^6$	2.36	7.79
160	60	$6.50 \times 10^{-5}$	$9.23 \times 10^5$	2.30	8.68
170	60	$5.00 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^5$	2.25	9.72
180	60	$2.00 \times 10^{-3}$	$3.00 \times 10^4$	2.20	11.10
190	60	$4.50 \times 10^{-3}$	$1.33 \times 10^4$	2.15	11.91
200	60	$9.00 \times 10^{-3}$	$6.67 \times 10^3$	2.11	12.61

จากผลการทดลองการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ดังตารางที่ 4.3 สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln R_0/R$  กับ 1000/T ดังรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln R_0/R$  กับ  $1000/T$  เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ ในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบน แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln R_0/R$  กับ  $1000/T$  สามารถนำมา คำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ได้จากสมการ

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = -\frac{E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) \quad (4.16)$$

$$\text{ความชัน} = \frac{-E_a}{1000k}$$

$$-18.077 = -\frac{E_a}{(1000)(1.38 \times 10^{-23})}$$

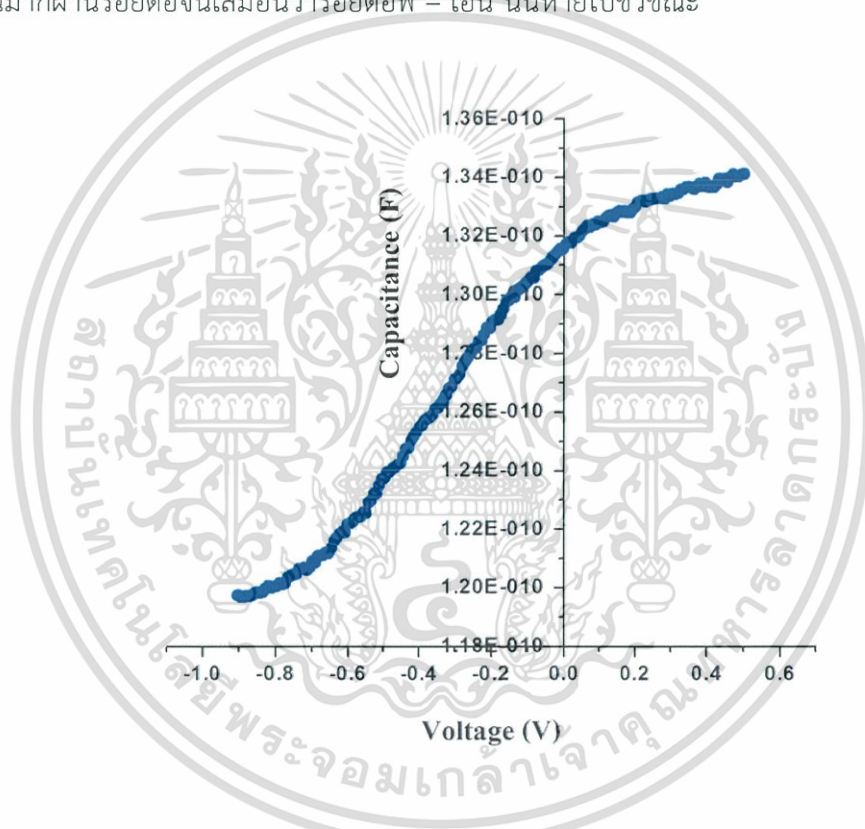
$$E_a = 1.557 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

ดังนั้น ค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe มีค่าเท่ากับ 1.557 อิเล็กตรอน -โวลต์ และ 0.107 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

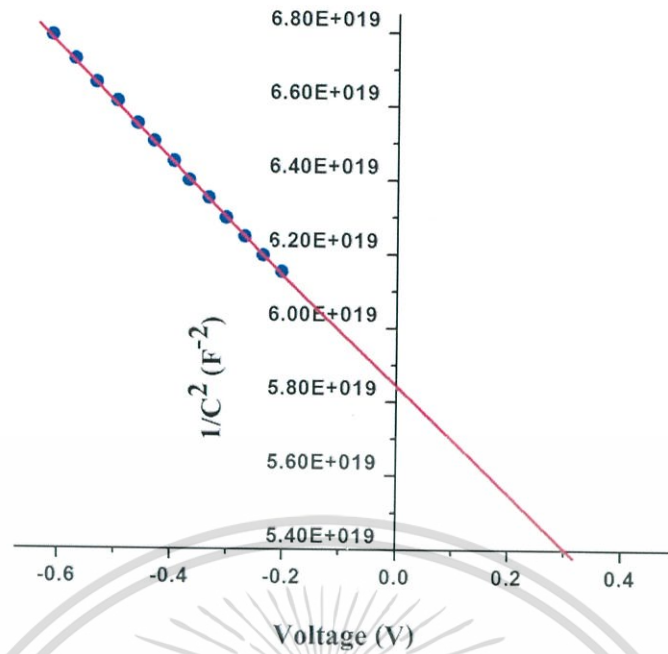
#### 4.2.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) แสดงได้ดังรูปที่ 4.27 พบว่าที่ แรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสย้อนกลับที่มากขึ้น และสำหรับกรณีไบแอสไปข้างหน้า ค่าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะลดลงซึ่งจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเนื่องจากการฉีดพาหะอิสระจำนวนมากผ่านรอยต่อจนเสมือนว่ารอยต่อพี – เอ็น นั้นหายไปชั่วขณะ



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.27 นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสอง กับ แรงดันไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 4.28 ดังนี้



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C^{-2}$  กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริทพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.28 เลือกช่วงที่มีความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้นแล้วลากเส้นตรงลงมาตัดแกนของ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยจุดตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า คือ  $V_i$  ซึ่งก็คือค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมของรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) มีค่าเท่ากับ 0.3 โวลต์ และค่าความชันสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.16 ดังนี้

$$\frac{1}{C^2} = \left( \frac{2}{\epsilon_s q N_d A^2} \right) \left( V_{bi} - \frac{kT}{q} - V \right) \quad (4.17)$$

เมื่อ  $C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้า  $\epsilon_s$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำโดย  $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0 = 7.611 \times 10^{-13}$  โดยที่  $\epsilon_r$  คือ ค่าไดอิเล็กตริกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe มีค่าเท่ากับ 8.6 และ  $\epsilon_0$  คือค่าเพอิมิตติวิตีของสภาวะสุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $8.8540 \times 10^{-14}$  ฟารัดต่อเซนติเมตร โดยจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.16 จะเลือกเอาส่วนที่เป็นกราฟเส้นตรงในช่วงไบแอส ย้อนกลับในช่วง -0.6 ถึง -0.2 โวลต์ จากนั้นทำการลากเส้นตรงลงมาตัดกับแกนนอนหรือแกนของค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะได้ค่า  $V_i$  ที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) ดังนี้คือ

$$V_i = V_{bi} - \frac{kT}{q} \quad (4.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) คือ

$$V_{bi} = V_i + \frac{kT}{q} \quad (4.19)$$

ส่วนค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้สามารถคำนวณหาได้จากค่าความชันจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าของสมการที่ (4.17) คือ

$$\text{ความชัน} = \frac{2}{q\epsilon_s N_d A^2} \quad (4.20)$$

$$N_d = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 (\text{ความชัน})} \quad (4.21)$$

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.21 จะได้ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้มีค่าเท่ากับ  $3.16 \times 10^{13}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

ค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ ( $N_V$ ) ของซิลิคอน สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_V = 2 \left[ \frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (4.22)$$

$$= (4.83 \times 10^{15}) (T)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{m_h^*}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}}$$

เมื่อมวลยังผลของค่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์  $\frac{m_h^*}{m_0} = 0.81$  ดังนั้น ค่า  $N_V$  ที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าดังนี้

$$N_V = (4.83 \times 10^{15}) (300)^{\frac{3}{2}} (0.16)^{\frac{3}{2}}$$

$$N_V = 1.829 \times 10^{19} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

เนื่องจากแผ่นซิลิคอนมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพีมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าประมาณ 1-30 โอห์มต่อเซนติเมตร ดังนั้น ค่าความหนาแน่นของโฮล เท่ากับ  $1.5 \times 10^{16}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากสมการ

$$p = N_V \exp \left[ \frac{-(E_f - E_V)}{kT} \right] \quad (4.23)$$

$$E_f - E_V = kT \ln \left( \frac{N_V}{p} \right)$$

$$= (0.0285) \ln \left( \frac{1.829 \times 10^{19}}{1.5 \times 10^{16}} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_f - E_V = 0.183 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

ค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบนำ ( $N_C$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$N_C = 2 \left[ \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{3/2}$$

เมื่อมวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ  $\frac{m_e^*}{m_0} = 0.14$  ดังนั้นค่า  $N_C$  ที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าดังนี้

$$N_C = (4.83 \times 10^{15}) (300)^{3/2} (0.14)^{3/2}$$

$$N_C = 1.31 \times 10^{18} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

จากสมการ 
$$n = N_C \exp \left[ \frac{-(E_C - E_f)}{kT} \right]$$

$$E_C - E_f = kT \ln \left( \frac{N_C}{n} \right)$$

จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า พบว่าค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe มีค่าเท่ากับ  $3.16 \times 10^{13}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นระดับเฟอร์มิที่อุณหภูมิห้องสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_C - E_f = (0.0258) \ln \left( \frac{1.31 \times 10^{18}}{3.16 \times 10^{13}} \right)$$

$$E_C - E_f = 0.28 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

จากค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe มีค่าเท่ากับ 4.30 และ 4.09 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ส่วนค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe มีค่าเท่ากับ 1.11 และ 2.53 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ดังนั้นค่าออฟเซต (offset) ของแถบนำ ( $\Delta E_C$ ) และค่าออฟเซต (offset) ของแถบวาเลนซ์ ( $\Delta E_V$ ) ของโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \Delta E_C &= \chi(\text{Si}) - \chi(\text{ZnSe}) \\ &= 4.30 - 4.09 \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\Delta E_C = 0.21 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

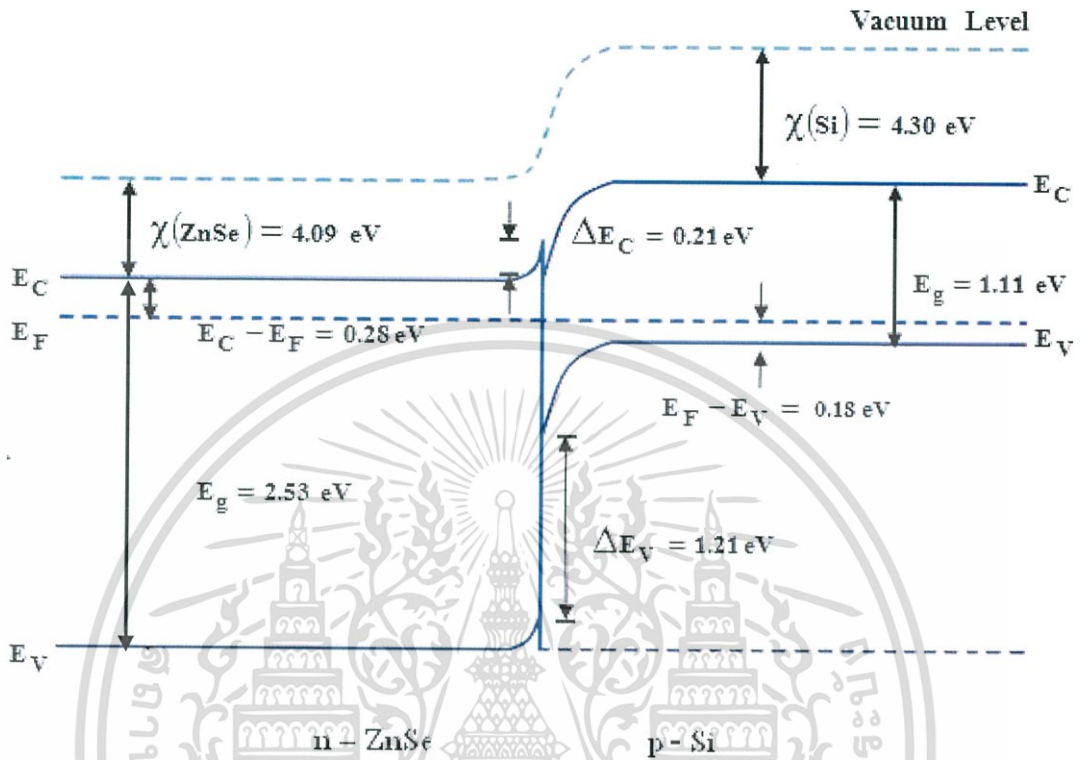
และ

$$\begin{aligned} \Delta E_V &= E_g(\text{ZnSe}) - E_g(\text{Si}) - \Delta E_C \\ &= 2.53 - 1.11 - 0.21 \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\Delta E_V = 1.21 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลผลการทดลองทั้งหมดสามารถนำมาเขียนแผนภาพแสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) แสดงได้ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 แสดงแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะสรุปผลการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ทำการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางและทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

### 5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

#### 5.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ เป็นเวลา 30 นาที พบว่าลักษณะฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่อยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ มีสีเหลืองโปร่งแสง ผิวหน้าเรียบ มีความมันเงายึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดี การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าระนาบเลี้ยวเบนเป็นระนาบ (111) ของโครง สร้างผลึกแบบคิวบิกและจากการศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  พบว่า ช่องว่างแถบพลังงาน มีค่าเท่ากับ 2.53 อิเล็กตรอนโวลต์

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ที่มีผิวหน้าเป็นระนาบ (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เป็นเวลา 30 นาที พบว่าฟิล์มบางมีลักษณะยึดติดกับแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ได้ดี การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า ระนาบการเลี้ยวเบนของสารกึ่งตัวนำ ZnSe เป็นระนาบ (111) และระนาบการเลี้ยวเบนของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si เป็นระนาบ (400) การศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าฟิล์มบางมีเกรนขนาดเล็กมากในระดับ 100 นาโนเมตร และ ผิวหน้าประกอบด้วยกลุ่มของคลัสเตอร์ (cluster) จำนวนมากซึ่งมีขนาดแตกต่างกันมากตั้งแต่ 600 นาโนเมตร ถึง 1.55 ไมโครเมตร

### 5.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

#### 5.1.2.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนสมบัติเฉพาะของไดโอดทั่วไป โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.5 โวลต์ มีค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับเท่ากับ  $4.93 \times 10^{-10}$  แอมแปร์ จากการคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงในการหาค่าของแฟกเตอร์ในอุดมคติ และค่าความสูงของกำแพงศักย์ พบว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกัน คือ ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติมีค่าเท่ากับ 2.32 และ 2.72 ตามลำดับ และ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ มีค่าเท่ากับ 0.82 และ 0.91 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณโดยวิธีของชวงที่คำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $H(I)$  กับ  $I$  และ  $dV/d \ln I$  กับ  $I$  มีค่าใกล้เคียงกันคือ มีค่าเท่ากับ  $1.15 \times 10^4$  และ  $1.12 \times 10^4$  โอห์ม ตามลำดับ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้าช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 300 เคลวิน พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลงและจากการคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และ วิธีของชวง ในการหาค่าของแฟกเตอร์อุดมคติ และ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ พบว่า มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และ ค่าของแฟกเตอร์อุดมคติทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่าของแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่าลดลง ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากวิธีของชวงก็มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากการหาค่าลักษณะเฉพาะของค่าพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ( $E_{00}$ ) โดยการเปรียบเทียบระหว่าง จำนวนโดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงพบว่ามีค่าเท่ากับ 0.102 และ 0.107 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

### 5.1.2.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า และ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากการวัดค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยให้ค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ 60 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นและจากผลการทดลองสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln R_0 / R$  กับ  $1000/T$  ได้ เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ได้ซึ่งจากการทดลอง ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe มีค่าเท่ากับ 1.557 และ 0.107 อิเล็กตรอนโวลต์

### 5.1.2.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปส่วนกลับของ ค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสอง กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยเลือกช่วงที่มีความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้นแล้วลากเส้นตรงลงมาตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า โดยจุดตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า คือ  $V_i$  ซึ่งก็คือ ค่าศักย์ตกคร่อมของรอยต่อ ( $V_{bi}$ ) ได้ และนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $3.16 \times 10^{13}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ระวางอย่าให้ผิวหน้าเป็นรอยเพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกไม่สม่ำเสมอหรือเคลือบไม่ติด
2. ต้องการทำความสะอาดระบบระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทุกครั้งเมื่อทำงานเสร็จหรือก่อนใช้งานเพื่อที่ไม่ได้มีสารอื่นมาปนเปื้อนระหว่างการเตรียมฟิล์มบาง
3. ต้องทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) โดยการกัดในสารละลายเคมีอย่างพิถีพิถันเพื่อให้ได้ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอและต้องไม่มีคราบน้ำปอดประจุติดอยู่
4. การวัดอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ ต้องให้ปลายเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับแผ่นฐานรองรับเพื่อให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิจ่ายกระแสแก่แผ่นฐานรองรับให้ได้อุณหภูมิที่ถูกต้องตามที่ต้องการและจะไม่เกิดความเสียหายกับฟิล์มบางที่เคลือบกับแผ่นฐานรองรับที่เตรียมไว้แล้วหรือที่กำลังเตรียมใหม่
5. การวัดค่าต่างๆที่ความถี่ต่ำต้องมีระบบกันสัญญาณรบกวนที่ดีเพราะเวลาวัดค่าไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำมีสัญญาณรบกวนมากเกินไป

## เอกสารอ้างอิง

- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์-อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2545. “การเตรียมศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. “การประดิษฐ์  $CuAlO_2$  เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และณัฐพร พรหมรส. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยการระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และณัฐพร พรหมรส. 2553. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วยอะตอม Al สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $In_xWO_3 (0 \leq x \leq 0.05)$  และการประยุกต์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จักรพงษ์ สวัสดิวงศ์. 2556. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างซิงค์เทลลูไรด์กับทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของอินเดียม.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย จรรยาธรรม. 2550. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง. 2530. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฐิตินัย แก้วแดง. 2530. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และณัฐพร พรหมรส. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ณัฐพร พรหมรส และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาข้อไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ของฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีแอ็คทีฟสปัตเตอร์ริง เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ดุสิต เครื่องงาม. 2535. โพลีเทคโพลิฟิล์ม. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น
- วรรณภา จำเนียรพิช. 2555. “การศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด CdS/CuO.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วีรชัย ลิภา. 2547. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี.” วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สมเกียรติ สุขเดช. 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม. แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุกฤษฎี เกิดแสง. 2547. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อดิศร นพรุจกุล. 2555. “สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS กับ CuAlO<sub>2</sub>.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เอกชัย วิลามาศ. 2552. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Gowrish K. Rao, Kasturi V. Bangera, G.K. Shivakumar. 2013. “Fabrication and characterization of thermal evaporated n-Si/ p-ZnTe thin film heterojunction diodes”, Manipal 576104, India
- Kittel C. 2005. Introduction to Solid State Physics. 8th Edition. United States of America : John Wiley&Sons Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Runyan, W.R., 1975. **Semiconductor Measurement and Instrument**. 3rd Edition, New York: Mc.Graw-Hill.
- Schroder. D.K. 2007. **Semiconductor material and Device Characterization**. Jhon Wiley & Sons Inc.
- Sze S.M. 2007. **Semiconductor Devices Physics and Technology**. 3rd Edition. United States of America : John Wiley&Sons Inc.
- Irena Zobel, Malgozata Kramkowska. 2001. "The effect of isopropyl alcohol on etching rate and roughness of (100) Si surface etched in KOH and TMAH solutions", Poland.
- Xiwei Zhang, Xiujuan Zhang, LiuWang, Yiming Wu, Yan Wang, Peng Gao, Yuanyuan Han and Jiansheng Jie. 2013. "ZnSe nanowire/Si p-n heterojunctions: device construction and optoelectronic", Suzhou Jiangsu 215123, China.
- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล. 2009. **สารกึ่งตัวนำและไดโอด**.  
 [Online]. Available : [eng.vu.ac.th/mn/2009/~arnon/theching/elec\\_mn/sheet/Elec\\_2.pdf](http://eng.vu.ac.th/mn/2009/~arnon/theching/elec_mn/sheet/Elec_2.pdf) [2 พฤศจิกายน 2557]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


## ภาคผนวก ก

Pattern : 80-8		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Zn Se		2th	l	h	k	l
Zinc Selenide		25.867	100	1	0	0
		27.395	56	0	0	2
		29.335	62	1	0	1
		38.032	31	1	0	2
		45.619	66	1	1	0
		49.648	62	1	0	3
		53.185	9	2	0	0
		54.036	35	1	1	2
		55.166	7	2	0	1
		56.536	<1	0	0	4
		60.851	6	2	0	2
		63.178	<1	1	0	4
		69.702	16	2	0	3
		72.623	11	2	1	0
		74.299	5	2	1	1
		75.473	<1	1	1	4
		78.528	10	1	0	5
		79.251	4	2	1	2
		81.335	<1	2	0	4
		84.360	6	3	0	0
		87.344	14	2	1	3
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 3.97400 c = 6.50600 Z = 2		Mol. weight = 144.34 Volume [CD] = 88.98 Dx = 5.387 I/lor = 4.42				
ICSD COLLECTION CODE : 067778 REMARKS FROM ICSD : REM THE. TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12+ (1997) primary reference : *Phys. Rev. B: Condens. Matter, volume 46, page 10086, (1992) : Yeh. C., Lu, Z.W., Froyen. S., Zunger, A.						
Radiation : CuKa1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 27-1402		Radiation = 1.540600		Quality : High		
Si		2th	l	h	k	l
		28.443	100	1	1	1
		47.304	55	2	2	0
Silicon, syn / Silicon		56.122	30	3	1	1
		69.132	6	4	0	0
		76.380	11	3	3	1
		88.029	12	4	2	2
		94.951	6	5	1	1
		106.719	3	4	4	0
		114.092	7	5	3	1
		127.547	8	6	2	0
		136.897	3	5	3	3
<b>Lattice</b> : Face-centered cubic	<b>Mol. weight</b> = 28.09					
<b>S.G.</b> : Fd3m (227)	<b>Volume [CD]</b> = 160.18					
<b>a</b> = 5.43088	<b>Dx</b> = 2.329					
<b>Z</b> = 8	<b>I/Cor</b> = 4.70					
<p>TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 25(1) C.  SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : This sample is NBS Standard Reference Material No. 640.  GENERAL COMMENTS : Reflections calculated from precision measurement of a0  GENERAL COMMENTS : a0 uncorrected for refraction  ADDITIONAL PATTERN : To replace 5-965 and 26-1481.  COLOR : Gray</p>						
<p>CAS: 7440-21-3  *Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 13, page 35, (1976) primary reference.</p>						
<b>Radiation</b> : CuK $\alpha$ 1	<b>Filter</b> : Monochromator crystal					
<b>Lambda</b> : 1.54060	<b>d-sp</b> : Diffractometer					
<b>SS/FOM</b> : F11=409(0.0021,13)	<b>Internal standard</b> : W					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 1-690		Radiation = 1.540600		Quality : Deleted		
Zn Se		<b>2th</b>	<b>l</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
		27.165	100	1	1	1
		45.306	80	2	2	0
Zinc Selenium		53.888	50	3	1	1
		66.229	8	4	0	0
		72.675	20	3	3	1
		84.107	30	4	2	2
		89.934	10	5	1	1
		100.762	2	4	4	0
		105.719	8	5	3	1
<b>Lattice</b> : Face-centered cubic	<b>Mol. weight</b> = 144.34					
<b>S.G.</b> : F-43m (216)	<b>Volume [CD]</b> = 180.36					
<b>a</b> = 5.65000	<b>Dx</b> = 1.329					
	<b>Dm</b> = 5.420					
DELETED AND REJECTED BY : Deleted by NBS 5-522. COLOR : Yellowish red MELTING POINT : >1100 OPTICAL DATA : B=2.89						
						
*Private Communication, primary reference : New Jersey Zinc Co., Palmerton, PA, USA. *The Structure of Crystals, 1st Ed., unit cell data : *Data on Chem. for Cer. Use, Natl. Res. Council Bull. 107, optical data :						
<b>Radiation</b> : MoK $\alpha$ 1	<b>Filter</b> : Not specified					
<b>Lambda</b> : 0.70900	<b>d-sp</b> : Not given					
<b>SS/FOM</b> : F9= 9(0.0870,11)						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล                    นางสาว รัฐกาญจน์ ประชาเชษฐ์  
 วัน เดือน ปีเกิด               วันที่ 10 ธันวาคม พ.ศ. 2535  
 ภูมิลำเนา                       จังหวัดชุมพร  
 ประวัติการศึกษา               ปี พ.ศ. 2554 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์  
    คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้