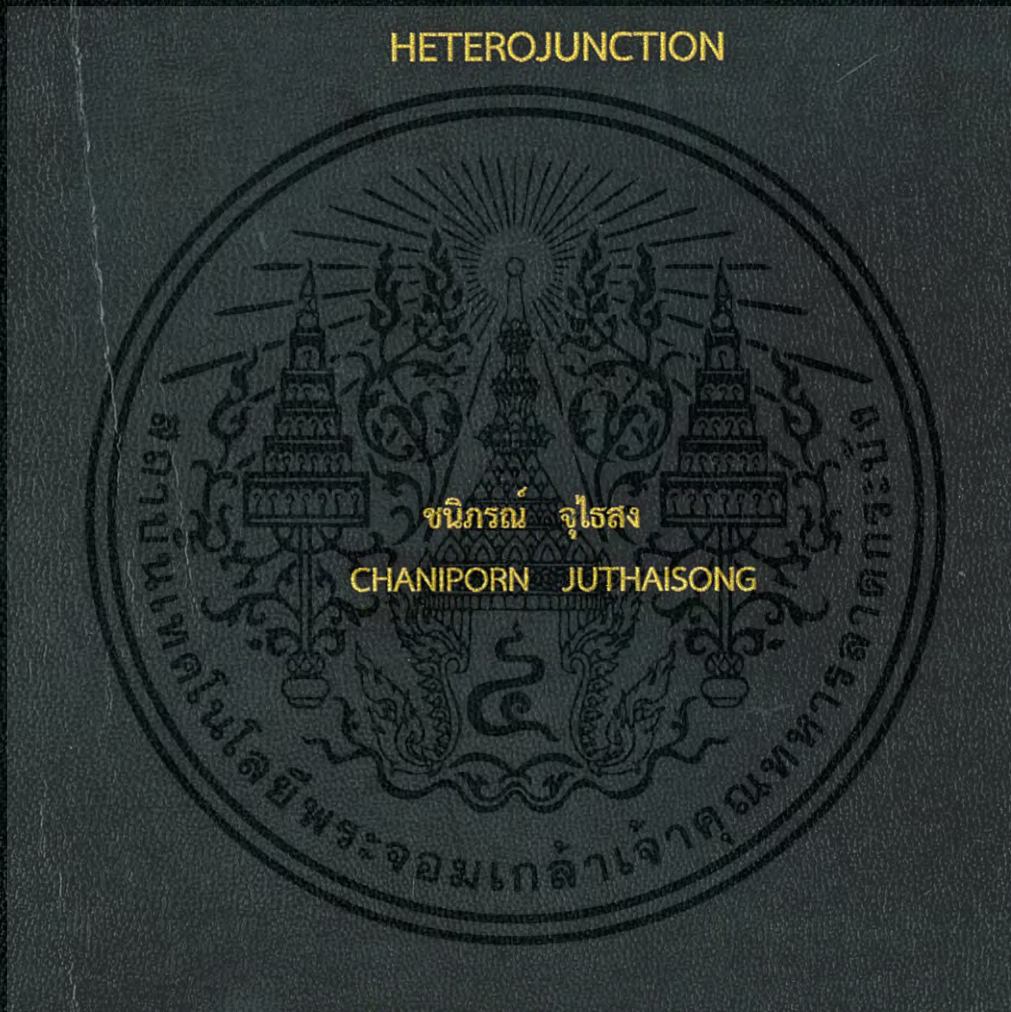


การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างฟิล์มบางของ
ซิงค์ซีลีไนด์กับผลึกเดี่ยวซิลิคอน

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF n-ZnSe/p-Si (100)

HETEROJUNCTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-SC-M-030-017

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างฟิล์มบางของ
ซิงค์ซีลีไนด์กับผลึกเดี่ยวซิลิคอน

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF n-ZnSe/p-Si (100)
HETEROJUNCTION



T144002

ชนิภรณ์ จุไรสง

CHANIPORN JUTHAISONG



b. 00267016
i.

สาขา.....
เลขทะเบียน 144002
วันเดือนปี 10 มี.ค. 2559

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบส่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
พ.ศ. 2559
KMITL-2016-SC-M-030-017

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF n-ZnSe/p-Si (100)
HETEROJUNCTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2016
KMITL-2016-SC-M-030-017



COPYRIGHT 2016


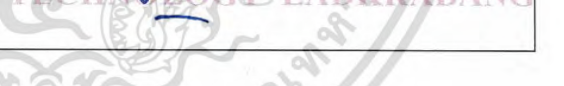
FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ระหว่างฟิล์มบางของซิงค์ซีลีไนด์กับผลึกเดี่ยวซิลิคอน”
 “FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF n-ZnSe/p-Si(100) HETEROJUNCTION”

ชื่อนักศึกษา นางสาวชนิภรณ์ จุไรสง
รหัสประจำตัว 57605081
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.วิจิต ศรีโชติ ประธานกรรมการ	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง)	
ผศ.ดร.ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ	
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ 6 กรกฎาคม เวลา 09.00-12.00 น.
 สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 อาคารจุฬารามณ์วิทยาลัยฯ ชั้น 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

 (รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภณี ธนะบริพัฒน์)
 คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
 วันที่.....เดือน.....ปี.....พ.ศ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างฟิล์มบางของซิงค์ซีลีไนด์กับผลึกเดี่ยวซิลิคอน
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ชนิภรณ์ จุไรสง
รหัสประจำตัว	57605081
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษสมบัติทางฟิสิกส์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน สามารถคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ แפקเตอร์อุดมคติ และความต้านทานอนุกรม โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง พบว่าความสูงของกำแพงศักย์และแפקเตอร์อุดมคติดีค่าขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมาก จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลงความสูงของกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์มีค่าลดลงแต่แפקเตอร์อุดมคติดีค่าเพิ่มขึ้น จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.757 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องดีกับค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่วัดได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส และช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ พบว่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนมีค่าเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและความถี่ อีกทั้งยังได้ทำการวัดความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ จากทั้งสองวิธีนี้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกักตักพาหะที่ผิวเชื่อมต่อชนิดจับพาหะได้เร็วของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) มีค่าอยู่ในระดับ 10^{11} ต่อตารางเซนติเมตรต่ออิเล็กตรอนโวลต์

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe, ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100), เทอร์มิออนิกอิมิสชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Fabrication and Characterization of n-Znse/p-Si (100)
Heterojunction

Student Name Miss. Chaniporn Juthaisong

Student ID 57605081

Degree Master of Science in Applied Physics

Department Physics

Year 2016

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr.Thitinai Gaewdang

ABSTRACT

In this thesis, The n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction was fabricated by thermal evaporating ZnSe thin films on p-Si (100) substrate. The current – voltage characteristics of n-ZnSe/p-Si (100) were investigated in temperature range 20-300 K. the junction barrier height, ideality factor and series resistance values can be evaluated by using thermionic emission theory (TE) and Cheung’s method. The junction barrier height and ideality factor were found to be strong temperature dependence. Evaluation of forward I-V data reveals a decrease in the zero-bias barrier height, but an increase in the ideality factor with decrease in temperature. In part of C-V measurements at room temperature, the obtained built-in potential value being 0.757 V is well consistent with the junction barrier height value evaluated from I-V measurements. The complex impedance characteristics of n-ZnSe/p-Si (100) Heterojunction were investigated by impedance spectroscopy in the temperature range 25-90 °C and frequency range 20 Hz – 2 MHz. The real and imaginary parts of the complex impedance were changed with the temperature and frequency. Moreover, the capacitance and conductance measurements were used to calculate the density of the interface states. Both methods revealed the value of the fast interface trap density distribution for ZnSe/p-Si interface of the order of $10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนในการวิจัย รวมถึงให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา และได้ปลูกฝังสิ่งที่ดีงาม คุณธรรม จริยธรรม ให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์และแนะนำการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ในการวิเคราะห์ฟิล์มบาง

ขอขอบคุณรุ่นพี่รุ่นน้องนักศึกษาทุกคน ในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ นาย นพณัฐ เดชะคำภู นักศึกษาปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำทั่วไปรวมถึงคำแนะนำในการเตรียมฟิล์มบาง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตา ประสิทธิ์ประสาทวิชา ให้การอบรมสั่งสอน และเป็นพี่พี่ ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และญาติพี่น้องทุกคนที่ให้การอุปการะทุนการศึกษา เล่าเรียนและเป็นกำลังใจเสมอมา

นางสาวชนิภรณ์ จุไรสง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญรูป	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ	6
2.2 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก	7
2.2.1 การระบุตำแหน่ง	7
2.2.2 การระบุทิศทาง	7
2.2.3 การระบุชื่อระนาบ	7
2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI	9
2.3.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์	9
2.3.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไซต์	10
2.3.3 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe	10
2.3.4 โครงสร้างผลึกของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si	11
2.4 ผลึกจริง	14
2.4.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	15
2.4.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น	16
2.4.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ	17
2.4.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3.2 ผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของ โครงผลึกแฝด	18
2.4.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอม ผิบลำดับ (stacking faults)	18
2.5 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	19
2.5.1 อัตราการระเหยสาร	19
2.5.2 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements)	20
2.5.3 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)	21
2.5.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วย วิธีการระเหยสาร (deposition geometry)	22
2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	24
2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด	27
2.8 รอยต่อพี-เอ็น	30
2.8.1 รอยต่อในสภาวะสมดุล	31
2.8.2 รอยต่อแบบขั้น (step junction)	32
2.8.3 รอยต่อพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ	36
2.9 ค่าความจุไฟฟ้า	36
2.10 ลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น	39
2.11 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย (Boundary Values of Minority Carrier Densities)	40
2.12 การวิเคราะห์ไดโอดอุดมคติ (ideal-diode analysis)	41
2.12.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว (long-bass diode characteristics)	41
2.12.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น	44
2.13 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง (space-charge-region currents)	46
2.14 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อพี-เอ็น	49
2.14.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ	50
2.14.2 กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของ พาหะฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.15 อิทธิพลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร	53
2.16 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	56
2.16.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม	56
2.16.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน	56
2.16.3 กราฟของโบท (Bode plot)	61
2.16.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์	63
2.16.5 แอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปี	66
2.17 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ	72
2.18 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิคอน	74
2.19 กัปดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ	75
2.20 สายละลายที่ใช้ในการกัดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน	82
2.20.1 โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์	82
2.20.2 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์	82
2.21 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	82
2.21.1 การสร้างสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิธีพันธุ์ของ p-ZnSeNWs/n-Si และการประยุกต์ใช้ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (ZnSe nanowire/Si p-n heterojunctions device construction and optoelectronic applications)	82
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	93
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	93
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100)	93
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุ์ของฟิล์มบางของสาร กึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	ขั้นตอนในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si(100) และแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	94
3.2.1	การเตรียมแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ	94
3.2.2	การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ	95
3.2.3	การเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSeลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจก สไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	95
3.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสาร เคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	97
3.3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	97
3.3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	98
3.3.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	98
3.3.4	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.4.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษากาฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวินและ อุณหภูมิสูงในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส แล้วต่อจากนั้น จึงนำไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการ ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	98
3.4	การวิเคราะห์การวัดค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน	101
บทที่ 4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล	105
4.1	ศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของ สารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	105
4.1.1	ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธ พันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	105
4.1.2	ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสี เอกซ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	106
4.1.3	ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอด ที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบ สุญญากาศ	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

- 4.1.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 110
- 4.1.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 112
- 4.1.6 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 114
- 4.1.7 การศึกษาชนิดการสั่นของโครงผลึกด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 115
- 4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 116
- 4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 116

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

- 4.2.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธี การระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 124
- 4.2.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธี การระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 133
- 4.2.4 ผลการศึกษาการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่ง ตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 141
- 4.2.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำ การวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 144
- 4.2.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำ การวัดในช่วงความถี่ 400 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 146
- 4.2.7 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า กับความถี่เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.8	ผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความจุไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	166
4.2.9	ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	172
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	178
5.1	สรุปผลการทดลองของการศึกษาไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	178
5.1.1	ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	178
5.1.2	ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	179
5.1.2.1	ผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.2.2	ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า และ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิใน ช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	180
5.1.2.3	ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	180
5.1.2.4	ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับแรงดันไบแอสโดยการป้อน ความถี่คงที่หลายๆ ค่า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	180
5.1	ปัญหาและข้อเสนอแนะ	182

เอกสารอ้างอิง
ภาคผนวก
ประวัติผู้เขียน

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมีลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก	8
2.2	แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ	22
4.1	แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	112
4.2	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ (I_S) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{B0}) และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_S) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	123
4.3	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	128
4.4	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	136
4.5	แสดงผลการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ 60 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 - 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	142

สารบัญตาราง (ต่อ)

- 4.6 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกับค่าความจุไฟฟ้าสูงสุด ค่าจินตภาพของความจุไฟฟ้าสูงสุด และความหนาแน่นของกักตักในผิวเชื่อมต่อ ที่หาได้จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 400 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 154
- 4.7 แสดงค่าความถี่ที่สอดคล้องกับค่าจินตภาพของค่าความจุไฟฟ้า และความหนาแน่นของกักตักที่ผิวเชื่อมต่อ และช่วงชีวิตของพาหะที่ขึ้นกับพลังงาน ที่หาได้จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 161
- 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนภายใต้การวัดในช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 165
- 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 174
- 4.10 แสดงค่า ความถี่ก่าทอน พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้จากหลายวิธีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 176

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ	6
2.2	แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	8
2.3	แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	9
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	10
2.5	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์	10
2.6	แสดงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe	11
2.7	แสดงภาพจำลองพันธะโควาเลนต์ของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si	11
2.8	แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si	
	ก. แสดงพันธะเตตระฮีดรัลของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si	
	ข. แสดงภาพแบบสองมิติที่มีพันธะโควาเลนต์ของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si	12
2.9	แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ใน 2 มิติ ที่อุณหภูมิต่างๆ	
	ก. แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si 2 มิติที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 เคลวิน	
	ข. แสดงถึงการสลายของพันธะโควาเลนต์ที่อุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน	
	ค. แสดงถึงการเคลื่อนที่ของโฮลในผลึกเดี่ยวของธาตุ Si	12
2.10	แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ที่มีการเจืออะตอมของสารเจือของธาตุต่างๆ	
	ก. แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb	
	ข. แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ B	14
2.11	แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	
	ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซที่ว่างอยู่	
	ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่	
	ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก	
	ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่	15
2.12	แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขอตตักีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล	16
2.13	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ	17
2.14	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู	17
2.15	แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน	18
2.16	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแฝดและระนาบของผลึกแฝดหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด	18
2.17	แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดลำดับ	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.18	แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว	21
2.19	แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่าง ๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	21
2.20	แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น	23
2.21	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก	25
2.22	แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	27
2.23	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28
2.24	แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ก. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ข. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ค. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์และอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	32
2.25	แสดงรอยต่อแบบขั้นที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง ก. ความเข้มข้นสารเจือ ข. ความหนาแน่นของพาหะอิสระ ค. ประจุค้าง ง. สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ จ. ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ	33
2.26	แสดงโปรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ ก. แสดงความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่าไม่สม่ำเสมอภายในเขตปลอดพาหะ ข. ลักษณะของสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อย	37
2.27	แสดงโครงสร้างของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นขณะถูกไบอัสไปหน้าด้วยแรงดัน V_a	39
2.28	แสดงการลดลงของความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดยาวภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบอัสไปหน้าค่าเท่ากับ V_a	42
2.29	แสดงกระแสโฮล (เส้นทึบ) กับกระแสอิเล็กตรอน (เส้นประ) ในเนื้อสารด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) เนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันไบอัสไปหน้า V_a	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.30	แสดงความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดสั้นภายใต้การไบอัสไปหน้า V_a	45
2.31	แสดงอัตราส่วนของ x_p/x_n เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความหนาแน่นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆ ของรอยต่อ p^+-n	48
2.32	แสดงลักษณะเฉพาะ $J-V$ ของสารกึ่งตัวนำ $Cu(In,Ga)Se_2$ ที่แปรตามอุณหภูมิ	50
2.33	แสดงกลไกผลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะ ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	51
2.34	แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ J_0 และค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่ผ่านและไม่ผ่านการแอนนีลด้วย $CdCl_2$	53
2.35	แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย	56
2.36	แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	57
2.37	แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$	58
2.38	แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ)	59
2.39	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ Z' และ Z'' จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์	61
2.40	แสดงกราฟไนควิสต์ (ก) และกราฟของโบด (ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด	62
2.41	แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) และกราฟของไนควิสต์ (ข) ที่สอดคล้องกับวงจรสมมูลดังกล่าว	64
2.42	แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ก) และกราฟของไนควิสต์ (ข)	65
2.43	แสดงแบบจำลองอีลีเมนต์เฟสคงตัว (ก) กราฟไนควิสต์ของแบบจำลองอีลีเมนต์ (ข) เฟสคงตัว	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.44	แสดงสเปกตรัมของความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $CdS/CuGaSe_2$ ความจุในช่วงอุณหภูมิ 80- 100 เคลวิน คือ ค่า C_{SCR} แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 เคลวินกับดักประจุที่มีระดับพลังงาน 2 ค่าแตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความจุรวม	70
2.45	แสดงความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $CdS/Cu,(InGa)Se_2$ ที่ขึ้นกับความถี่ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆรวมทั้งแสดงพีคของกราฟ $\frac{fdC}{df}$ ที่แรงดันไบอัสค่าหนึ่ง	70
2.46	แสดงสเปกตรัมความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $CdS/CuGaSe_2$ ที่ความถี่ค่าต่าง ๆ ก. กรณีที่ไม่มีมีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na ข. กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na	71
2.47	แสดงกราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ในการหาพลังงานกระตุ้นของกับดักประจุในสารกึ่งตัวนำ $CuGaSe_2$	72
2.48	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่ภาวะสมดุล ($V=0$) ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี	73
2.49	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบอัสเพื่อให้เกิด ก. ช่วงขมุนุมพาหะ ข. ช่วงพร่องพาหะ ค. ช่วงกลับกลาย	74
2.50	แสดงพาหะที่เกิดการออกซีไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน	75
2.51	แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ	76
2.52	ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี C_{ff} และ R_{ff} ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อร่วมอยู่ด้วย ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง	77
2.53	ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS ข. แสดงการยืดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ Ψ_s	78
2.54	แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS	81
2.55	แสดงสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.56	(a) แสดงโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง (b) แสดงการวิเคราะห์ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของ (c) แสดงการวิเคราะห์ของ HRTEM และ Fourier transform (FFT) (d) แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)	85
2.57	(a) แสดงภาพ bottom-gate MOSFET (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (IDS-VGS)	86
2.58	(a) แผนภาพ ภาพตัดขวางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-ZnSeNW/n-Si (b) มุมมองด้านบนของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-ZnSeNW/n-Si (c) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะไม่ฉายแสง (d) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและsemi-logarithmic (e) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dV/dI กับ $1/I$ และรูปแบบวงจรมูลของไดโอด ประกอบด้วย ไดโอดต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน	87
2.59	(a) แสดงแผนผังแสดงให้เห็นถึงกลไกการทำงานของ HJFET (b) แสดงลักษณะกราฟของ HJFET ที่แรงดันต่างกัน (c) แสดงลักษณะกราฟของ HJFET วัดที่ $V_{DS} = 1\text{ V}$	90
2.60	(a) ลักษณะปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-ZnSeNW/n-Si (b) แผนภาพแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ p-ZnSeNW/n-Si ภายใต้ การฉายแสง simulator ซึ่งติดตั้งฟิลเตอร์ AM 1.5 ความเข้มแสงที่ 100 mW/cm^2	91
3.1	แสดงแผนภาพโครงสร้างของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่ง ตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียม โดยวิธี การระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	97
3.2	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียม ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสาร กึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ภายในระบบ สุญญากาศ	99
3.3	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่า แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง และ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) และ อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25 - 300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	100

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.4	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัด ค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	100
3.5	แสดงวงจรสมมูล Rp กับ Cp และแผนภาพแสดงเฟสของค่า $-X_c$ กับ R ก. แสดงวงจรสมมูล Rp กับ Cp ต่อขนานกัน ข. แสดงค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน	101
3.6	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ก. ในกรณีที่มีความจุ (C) มีค่าต่ำ ข. ในกรณีที่มีความต้านทาน (R) มีค่าต่ำมาก	102
3.7	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($ Z $) กับความถี่ (f)	103
3.8	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับความถี่ (f) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$) กับ ความถี่ (f)	104
3.9	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$)	104
3.10	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($ Z $) กับความถี่ (f)	104
4.1	แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	106
4.2	แสดงภาพถ่ายไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	106
4.3	แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	107
4.4	แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.5 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- ก. ที่กำลังขยาย 25,000 เท่า
 - ข. ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า
- 4.6 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- ก. ที่กำลังขยาย 25,000 เท่า
 - ข. ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า
 - ค. ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า
- 4.7 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสาร กึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆด้วยสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆด้วยสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสาร กึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 4.10 แสดงภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 4.11 แสดงภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสาร กึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่น 400 – 1000 นาโนเมตร	114
4.13	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	114
4.14	แสดงสเปกตรัมรามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	115
4.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -4 ถึง 4 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	117
4.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	118
4.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	118
4.18	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส (J) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อฉายแสง และไม่ฉายแสง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	119
4.19	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อฉายแสง และไม่ฉายแสง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.20	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	122
4.21	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	123
4.22	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	125
4.23	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	125
4.24	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	126
4.25	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า I ที่อธิบายวิธีของขงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	126
4.26	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I โดยวิธีของขง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	127
4.27	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแพกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของขงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี	130

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.28	แสดงการหาค่า E_{00} โดยการพิตรกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแพกเตอร์อุทมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	130
4.29	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	131
4.30	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่ได้จากวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	131
4.31	แสดงกราฟอาร์เรเนี่ยสของ $n[\ln J_S]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	132
4.32	แสดงแผนภาพกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน (TE) กลไกเทอร์มิออนิกฟิลด์อิมิสชัน (TFE) และกลไกฟิลด์อิมิสชัน (FE) ที่บริเวณรอยต่อขอตติ์ก็ภายใต้ไบแอสตรงและไบแอสกลับทาง	133
4.33	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	134
4.34	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	134

รูปที่	สารบัญรูป (ต่อ)	หน้า
4.35	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	135
4.36	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า I ที่อธิบายวิธีของขง (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	135
4.37	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I โดยวิธีของขงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	136
4.38	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของขงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	138
4.39	แสดงการหาค่า E_{00} โดยการพิศกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	138
4.40	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของขง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	139
4.41	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่ได้จากวิธีของขง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.42	แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n[\ln J_S]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	140
4.43	แสดงวงจรถ่ายที่ใช้ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	141
4.44	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln R_0 / R$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	143
4.45	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	144
4.46	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C^{-2} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	145
4.47	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 400 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	147
4.48	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C^{-2} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 400 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.49	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า กับแรงดัน เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 400 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	149
4.50	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/W กับแรงดัน เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 400 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	150
4.51	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารเจือ (N_D) และ ศักย์ที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ (ψ_s) กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	155
4.52	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ (W_D) และ ความสูงกำแพงศักย์ (ϕ_b) กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	155
4.53	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกักประจุที่เชื่อมต่อผิว (N_{rs}) และ ความต้านทานอนุกรม (R_s) กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	156
4.54	แสดงการจับและคายประจุของกักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสิ่งประดิษฐ์ MIS ที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำ	158
4.55	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	158
4.56	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.57	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-ZnSe/p-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	160
4.58	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกักประจุที่ผิวเชื่อมต่อกับพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-ZnSe/p-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	161
4.59	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่วงชีวิตของพาหะกับพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-ZnSe/p-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	162
4.60	แสดงระดับเฟอร์มิที่เลื่อนขึ้นลงตามแรงดันไบแอส	163
4.61	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-ZnSe/p-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	163
4.62	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-ZnSe/p-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	164
4.63	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-ZnSe/p-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	164
4.64	แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-ZnSe/p-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	165

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.65	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	166
4.66	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	166
4.67	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	167
4.68	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln(\omega)$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	168
4.69	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dG/d\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	169
4.70	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	169
4.71	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln(\omega)$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ $dG/d\omega$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 170
- 4.73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 172
- 4.74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 172
- 4.75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 173
- 4.76 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 174
- 4.77 แสดงวงจรสมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 175
- 4.78 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	สารบัญญรูป (ต่อ)	หน้า
4.79	แสดงแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	177
4.80	แสดงแผนภาพสถานะผิวเชื่อมต่อ กับดักพาหะตื้น และกับดักพาหะลึกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับชนิดเอ็น	177



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานเป็นจำนวนมากซึ่งตัวอย่างของพลังงานที่รู้จักกันดีก็คือ พลังงานไฟฟ้าซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปอื่นได้ง่าย สามารถควบคุมและใช้งานได้สะดวก โดยทั่วไปแล้วการผลิตกระแสไฟฟ้าจะอาศัยทรัพยากรจากแหล่งกำเนิดพลังงานฟอสซิล ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นต้น แต่ปัจจุบันพบว่าแหล่งพลังงานต่างๆมีปริมาณที่จำกัด กำลังลดลงเรื่อยๆจนหมดไปในไม่ช้า ดังนั้นมนุษย์จึงให้ความสนใจในการพัฒนาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล พลังงานความร้อนใต้พิภพ และ พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงและไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลกมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์และเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ อนุภาคของพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอมและเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นเมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดในช่วงเวลากลางวันซึ่งสอดคล้องและเหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้าเพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งในการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มมาจากการศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2497 หลังจากนั้นงานวิจัยก็แผ่ขยายไปสู่สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI₂ เช่น ZnSe, ZnTe, CdTe, CdS, CuInSe₂ และ CuInGaSe₂ เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ชนิดแรกคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ (heterojunction solar cell) ของสารกึ่งตัวนำ Cu₂S/CdS ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในเวลาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ Si ซึ่งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ในท้องตลาด ประดิษฐ์จากผลึกพหุพันธุ์ (polycrystalline) และอะมอร์ฟัส (amorphous) ของซิลิคอนเกือบทั้งหมด

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์ ได้รับการวิจัยและพัฒนากันมากมาย เช่น p-Cu₂O/n-ZnO [1], p-Cu₂O/n-CuO [2], CuO/ZnO [3], และ p-CuO/n-Si [4] เป็นต้น เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่มีเสถียรภาพดีแม้ในสภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิสูง ไม่เป็นสารพิษ ราคาอ่อนโยม จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อทดแทนซิลิคอนที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-ZnO}$ มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงในระดับ 3.83 เปอร์เซ็นต์ [5] จึงเป็นแรงจูงใจให้นักวิจัยจำนวนมากมุ่งความสนใจมายังสารกึ่งตัวนำออกไซด์กันมากขึ้น อีกทั้งได้มีการประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์กับสารประกอบซัลโคไนด์ เช่น $\text{CuAlO}_2/\text{CdZnS}$ [6-7], $p\text{-Cu}_x\text{Sn}_y\text{S}_2\text{O}/n\text{-ZnO}$ [8] และ CuO/CdS [9] พบว่ามีสมบัติเรียงกระแสที่ดี แต่ยังไม่มียางานเกี่ยวกับการศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ มีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมไม่ต้องทะนุบำรุงมาก สามารถติดตั้งร่วมกับอาคารบ้านเรือนและสำนักงานได้ง่าย แต่อุปสรรคสำคัญของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์คือวัตถุดิบหลักที่ใช้อยู่มีราคาสูงอยู่มาก จนถึงปัจจุบันผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Si) ยังคงเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ซิลิคอนมีสมบัติการดูดกลืนแสงค่อนข้างต่ำ ถ้าต้องการให้ดูดกลืนแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องใช้ความหนาอย่างน้อย 500 ไมโครเมตร แต่สำหรับเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางต้องการให้ชั้นสารกึ่งตัวนำมีความหนาน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร เพื่อลดต้นทุนทั้งค่าวัสดุและลดต้นทุนของกระบวนการผลิต

เมื่อไม่นานมานี้ นักวิจัยได้มีการสนใจถึงสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่จะนำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ยิ่งขึ้นโดยเฉพาะการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende) และมีช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) เท่ากับ 2.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงจึงได้นำมาทดลองสร้างเป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายเทคนิคทั้งเทคนิคทางเคมีและเทคนิคทางฟิสิกส์ ยกตัวอย่างเทคนิคการสังเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการวิจัย เช่น วิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีสปัตเตอร์ริง (sputtering) [10] วิธีไพโรไลซิสสารเคมี และวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี [11] เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Si}$ (100) โดยการกัดผิวหน้าด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ผสมกับไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol) เพื่อนำมาใช้ประดิษฐ์เป็นไดโอดที่มีรอยต่อแบบอวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-ZnSe}/p\text{-Si}$ (100) โดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาคและเชิงมหภาค ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-Si}$ (100) ศึกษาคุณสมบัติทางแสงโดยวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 200 องศาเซลเซียส และจากนั้นศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของกระแสไฟตรง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 80 องศาเซลเซียส ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยทำการจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -1 ถึง 0.5 โวลต์ และความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ของสิ่งประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยจากผลการทดลองที่ได้ สามารถนำมาเขียนแผนภาพแสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
2. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance รังสีเอกซ์ย่าน $\text{Cu}_{K\alpha}$ มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสิ่งประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มอีมิสชัน (FESEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-7001F
4. ศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
5. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของกระแสไฟตรงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 80 องศาเซลเซียส ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยทำการจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -1 ถึง 0.5 โวลต์ และความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
2. ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐาน โดยการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาคุณสมบัติทางแสงโดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และ แผ่นกระจกสไลด์
3. ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
4. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 80 องศาเซลเซียส และ ศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยทำการจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -1 ถึง 0.5 โวลต์ และใช้ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดท้าวสตุอุปกรณ์ที่ใช้ทำงานโครงการพิเศษในครั้งนี้
2. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เตรียมได้ โดยการศึกษาคross-section ด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
4. ศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสลิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ 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 อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 - 80 องศาเซลเซียส และ ศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยทำการจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -1 ถึง 0.5 โวลต์ และใช้ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

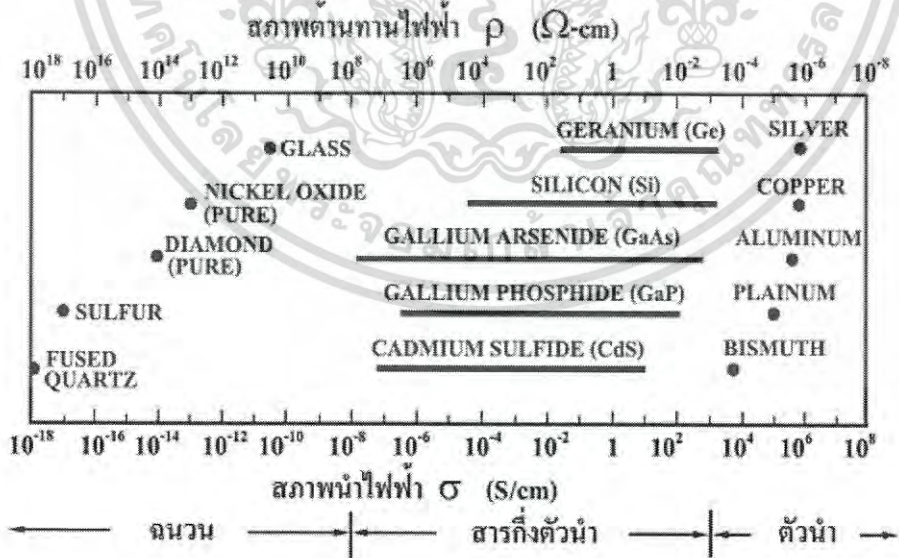
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆจะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆเทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆต่อไป

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ [12-15]

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำ ในรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส ซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำอยู่ในช่วง 10^{-18} - 10^{-8} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงินมีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง 10^4 - 10^8 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างฉนวนและตัวนำ ซึ่งสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนั่นแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก [11-21]

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะที่ดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีหลักเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

2.2.1 การระบุตำแหน่ง

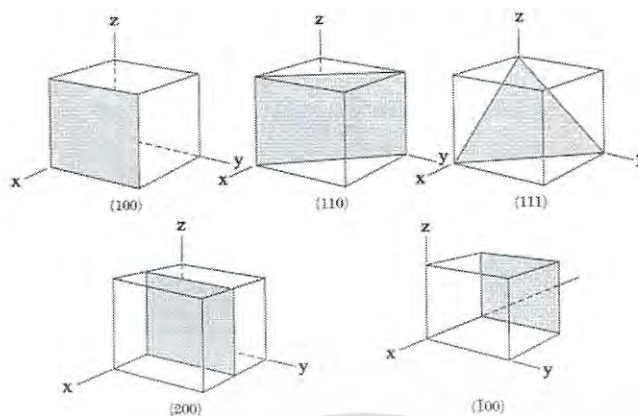
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) โดยให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่นจุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$

2.2.2 การระบุทิศทาง

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

2.2.3 การระบุชื่อระนาบ

การระบุชื่อระนาบแต่ละระนาบจะใช้อักษร (hkl) โดยให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ค่า (hkl) เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งสำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง ค่าดัชนีมิลเลอร์มีวิธีการหาได้จากขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ เริ่มต้นจากการกำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนผลึกแต่ละแกนคือค่า (x,y,z) และจึงทำให้เป็นเศษส่วนกลับ ต่อจากนั้นให้หาผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น.) ของเศษส่วนกลับเหล่านั้น ก็จะได้พารามิเตอร์ (hkl) ตามลำดับ นอกจากนี้ระนาบใดขนานกับแกนใดให้ประมาณว่าระนาบนั้นตัดแกนนี้ที่ระยะอนันต์ ส่วนระนาบใดตัดแกนลบ ก็ให้ใส่เครื่องหมาย $(-)$ บนค่าดัชนีมิลเลอร์ตัวนั้น เช่น ระนาบ (010) จะตัดแกนผลึกที่ $(\infty,1,\infty)$ และระนาบ $(\bar{1}\bar{1}1)$ จะตัดแกนผลึกที่ $(-1,1,1)$ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

จุดที่ระนาบตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก $\frac{1}{h}, \frac{1}{k}, \frac{1}{l}$	ดัชนีมิลเลอร์(hkl)หรือระนาบ
($\infty, 1, \infty$)	$\frac{1}{0}, \frac{1}{1}, \frac{1}{0}$	(010)
(-1, 1, 1)	$-\frac{1}{1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1}$	($\bar{1}$ 11)
(-1, -1, -1)	$-\frac{1}{1}, -\frac{1}{1}, -\frac{1}{1}$	($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)
($\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$)	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$	(224)
($\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0$)	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0$	(220)

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์เพิ่มเติมดังนี้

สำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ต่างไปเป็น (hkil) แต่เนื่องจากมีสมบัติความสมมาตรของแกนผลึกจึงกำหนดให้ดัชนีมิลเลอร์ตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีมิลเลอร์สองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

$$i = -(h + k) \quad (2.1)$$

เช่น ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลระนาบ(110) จะเรียกว่า ($11\bar{2}$) นอกจากนี้มักพบว่าสำหรับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกเท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีดัชนีมิลเลอร์

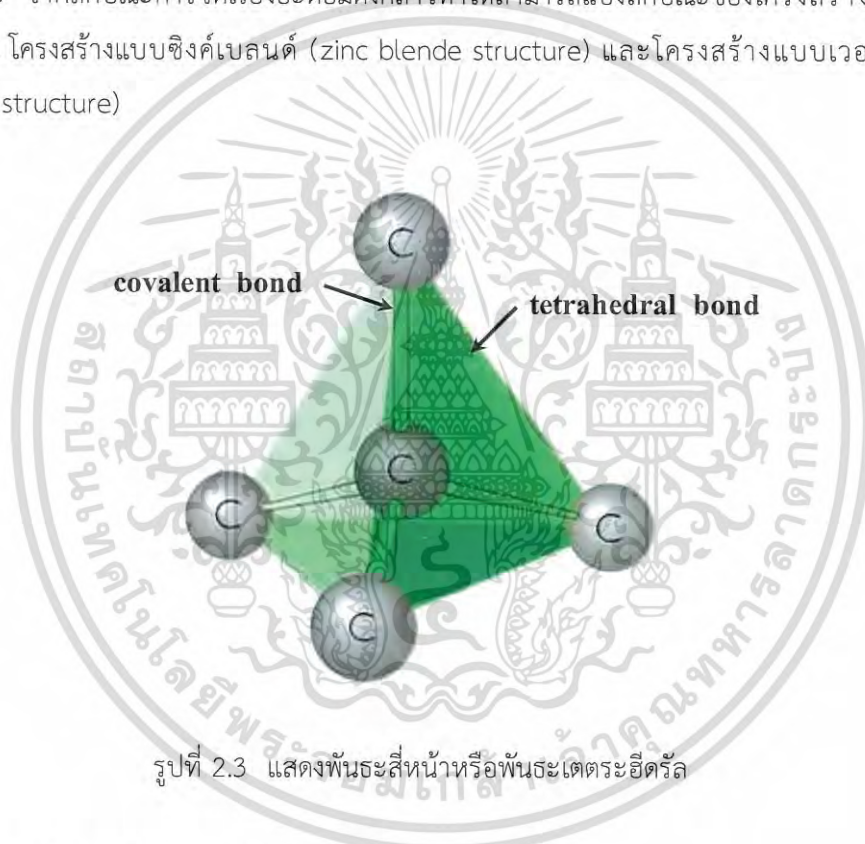
เหมือนกันนั่นคือระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI

[12-22]

ผลึกของสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงสร้างผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอม B จะมีอะตอม B หรืออะตอม A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรอล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งลักษณะของโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างแบบเวอร์ทไฮท์ (wurtzite structure)

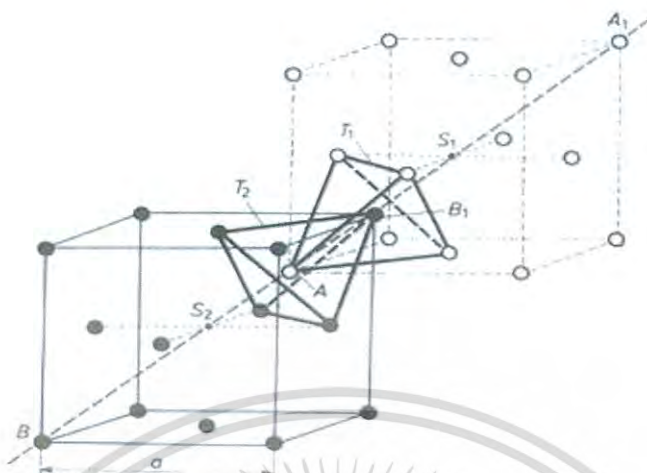


รูปที่ 2.3 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรอล

2.3.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างซิงค์เบลนด์ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ a และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_2 (อะตอม B : สีดำ) และเซลล์หน่วยจัดเรียงไปตามแนว A_1B_1 ดังนั้นจะได้ระยะ $AB = \frac{1}{4}AA_1 = \frac{1}{4}BB_1$ ฐานของพันธะสี่หน้า T_1 และ T_2 ขนานกันและหมุนทำมุม 60° อดิศรอบแกน A_1B_1 ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4}a$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

2.3.2 โครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์

โครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์แสดงในรูปที่ 2.5 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล 2 เซลล์หน่วย ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ a และ c มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 และ s_2 เซลล์หน่วยจัดเรียงไปในแนวแกน c ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{3}{8}c = \sqrt{\frac{3}{8}}a$ ฐานพื้นระนาบสี่หน้า T_1 และ T_2 ขนานกันและระยะระหว่างฐานมีค่าตามแนวแกน c

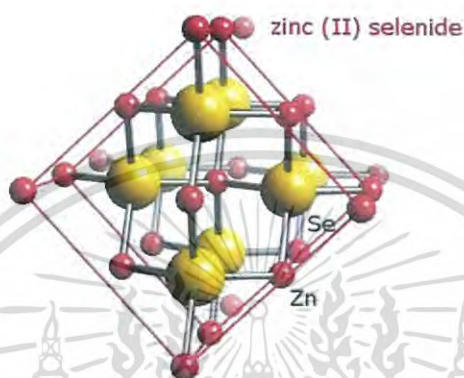


รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์

2.3.3 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ และมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) เท่ากับ 2.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

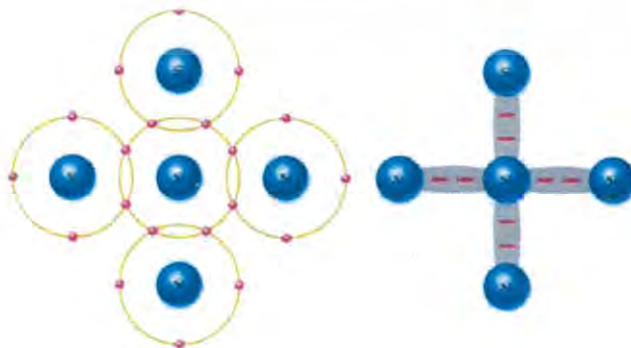
นำมาใช้อย่างแพร่หลายในด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงจึงได้นำมาทดลองสร้างเป็นชั้นหน้าต่างของ เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งในการทดลองสามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายเทคนิคทั้งเทคนิคทางเคมีและ เทคนิคทางฟิสิกส์ ยกตัวอย่างเทคนิคการสังเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการงานวิจัย เช่น เทคนิคการทำให้ ระเหยกลายเป็นไอ เทคนิคการสปัตเตอร์ เทคนิคออกซิเดชัน เทคนิคการระเหยด้วยแสงเลเซอร์ และ เทคนิคการใช้ปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้น



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe

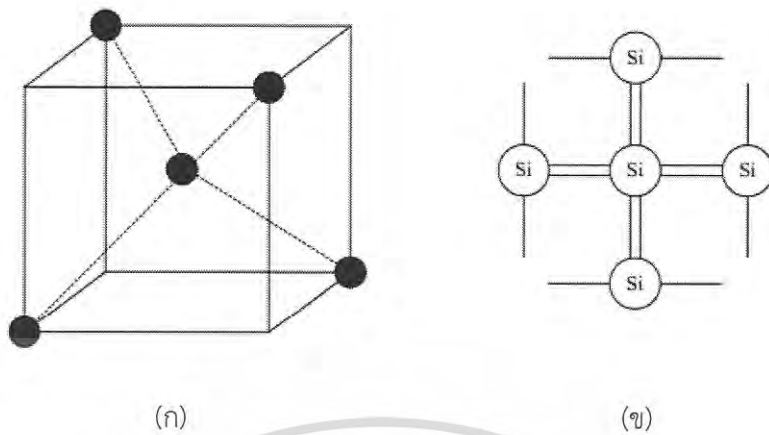
2.3.4 โครงสร้างผลึกของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si

ผลึกเดี่ยวของธาตุ Si เป็นส่วนประกอบของทรายซึ่งเป็นที่รู้จักกันแพร่หลายมากที่สุด อะตอม ของธาตุซิลิคอนจะมีจำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว สามารถเชื่อมต่อกับอิเล็กตรอนของอะตอม ข้างเคียงเรียกว่า อิเล็กตรอนร่วม (share electrons) อะตอมของธาตุซิลิคอน และ เพชร มี โครงสร้างของผลึกและ สมบัติฟิสิกส์เหมือนกันแต่ผลึกซิลิคอนไม่โปร่งใสซึ่งในการสร้างอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ ผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอนบริสุทธิ์จะมีการนำไฟฟ้าไม่ค่อยดี ดังนั้นจึงต้องเติมอะตอม ของสารเจือ เช่น อะตอมของธาตุฟอสฟอรัส อะตอมของธาตุโบรอน หรืออย่างอื่น กระบวนการอย่าง นี้เรียกว่าโด๊ป (doping) ผลึกเดี่ยว ของธาตุซิลิคอน



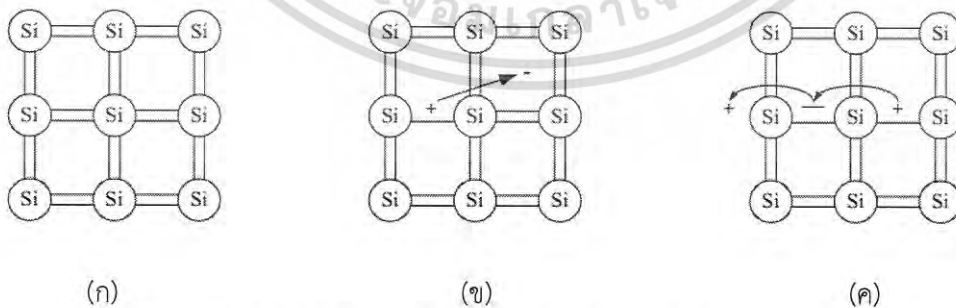
รูปที่ 2.7 แสดงภาพจำลองพันธะโควาเลนต์ของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si
 ก. แสดงพันธะเตตระฮีดรัลของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si
 ข. แสดงภาพแบบสองมิติที่มีพันธะโคเวเลนต์ของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si

จากรูปที่ 2.8(ก.) แสดงถึงโครงสร้างของอะตอมจำนวน 5 ตัวที่หยุดนิ่งโดยมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว กระจายอยู่รอบๆซึ่งโครงสร้างแบบนี้เราเรียกว่า เตตระฮีดรัล แสดงดังรูปที่ 2.8(ข.) โดยที่อะตอมของธาตุซิลิคอนแต่ละอะตอมก็จะมีอะตอมของธาตุซิลิคอนข้างเคียงล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม โดยเวเลนซ์อิเล็กตรอนก็จะถูกใช้ร่วมกันระหว่างแต่ละอะตอมซึ่งเราเรียกว่า พันธะโคเวเลนต์ ส่วนในรูป 2.8(ข.) เป็นโครงสร้างของอะตอมซิลิคอนในแบบ 2 มิติ (เรียกว่า แลตทิซ) ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของโครงสร้างแบบนี้ก็คือ เวเลนซ์อิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณขอบนอกสุดของอะตอมสามารถที่จะต่อจับยึดกับอะตอมของธาตุซิลิคอนอื่นๆได้อีก ทำให้ได้ผลึกซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 2.9 แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ใน 2 มิติ ที่อุณหภูมิต่างๆ
 ก. แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si 2 มิติที่อุณหภูมิเท่ากับ 0 เคลวิน
 ข. แสดงถึงการสลายของพันธะโคเวเลนต์ที่อุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน
 ค. แสดงถึงการเคลื่อนที่ของโฮลในผลึกเดี่ยวของธาตุ Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

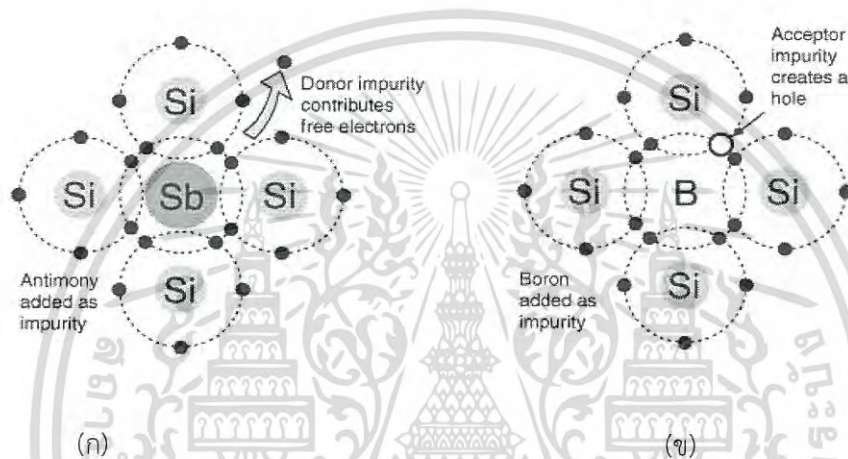
จากรูป 2.9(ก.) ถ้ากำหนดให้พิจารณาที่อุณหภูมิ $T = 0$ เคลวิน ก็จะทำให้ อิเล็กตรอนที่เกาะอยู่ในแต่ละพันธะมีค่าพลังงานที่ต่ำที่สุด ถ้ามีพลังงานที่สนามไฟฟ้าภายนอกถูก ปลดปล่อยเข้าไปในผลึกเหล่านี้ อิเล็กตรอนก็จะไม่เคลื่อนที่ดังนั้นในสภาวะผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอนจึงมี ลักษณะเป็นฉนวน (insulator) จึงไม่มีกระแสไหลผ่านได้เลย เมื่ออุณหภูมิในผลึกสูงขึ้นทำให้เวเลนซ์ อิเล็กตรอนมีโอกาสหลุดออกจากพันธะได้ ทำให้ตำแหน่งเดิมของอิเล็กตรอนมีสภาพเป็นประจุบวก ดังรูป 2.9(ข.) เรียกว่า “เกิดสถานะพลังงานว่าง (empty state)” และถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นอีกก็จะทำให้ พันธะโคเวเลนซ์ถูกสลายออกมามากขึ้นทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากยิ่งขึ้น เพื่อที่จะสลายพันธะ เวเลนซ์ เวเลนซ์อิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานอย่างน้อยที่สุดจำนวนหนึ่ง ที่เรียกว่า ช่องว่าง แถบพลังงาน สำหรับสสารทั่วไปค่าช่องว่างแถบพลังงานนี้จะมีค่าประมาณ 3-6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวน (insulator) เพราะที่อุณหภูมิห้องสสารเหล่านี้จะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ใน สสารเลย ในขณะที่สสารบางอย่าง เช่น โลหะกลับมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่จำนวนมากที่อุณหภูมิห้อง จึงจัดสสารเหล่านี้เป็นตัวนำ (conductor) และ สำหรับสารกึ่งตัวนำจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน อยู่ ประมาณ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำนี้เองที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เมื่อดู จากรูป 2.9(ค.) พบว่าอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากพลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่ตลอดเวลาโดย อิเล็กตรอนอิสระนี้ถ้าเคลื่อนที่ออกมาจากตำแหน่งใดก็จะทำให้ตำแหน่งนั้นมีสภาพทางไฟฟ้าเป็น ประจุบวก ซึ่งเรียกว่า โฮล (hole) โดยทั้งอิเล็กตรอนและโฮลก็สามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ เหมือนกันเพราะทั้งโฮลและ อิเล็กตรอนต่างก็เคลื่อนที่ได้เหมือนกัน

ในอะตอมของธาตุหมู่ V ที่นิยมนำมาทำเป็นอะตอมของสารเจือ ได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) และ อาร์เซนิก (As) ในรูปที่ 2.10(ก.) แสดงถึงการนำอะตอมของธาตุฟอสฟอรัสมาเจือในผลึก เดี่ยวของธาตุซิลิคอน ดังรูป โดยเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ของอะตอมของธาตุฟอสฟอรัสก็จะจับตัว กับอะตอมของธาตุซิลิคอนกลายเป็นพันธะเคมี แต่อิเล็กตรอนตัวที่ 5 ของอะตอมของธาตุฟอสฟอรัส ก็จะถูกกลายเป็นส่วน เกินซึ่งอิเล็กตรอนตัวนี้ก็จะเคลื่อนที่ไปตามโครงสร้างผลึกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ไหลในผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอนโดยไม่ต้องใช้พลังงานความร้อนมาสลายพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของ ธาตุซิลิคอนอีก อะตอมของธาตุฟอสฟอรัส เรียกว่า อะตอมของสารเจือผู้ให้เนื่องจากเป็นอะตอมที่ให้ อิเล็กตรอนอิสระกับผลึกและเรานิยมเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุหมู่ V นี้ว่าสารกึ่ง ตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor)

สำหรับอะตอมของธาตุในหมู่ III ที่นิยมนำมาทำเป็นอะตอมของสารเจือ ได้แก่ อะตอม ของธาตุโบรอน (B) ดังรูปที่ 2.10(ข.) ถ้านำธาตุนี้ไปเจือในผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอนก็จะทำให้เวเลนซ์ อิเล็กตรอนทั้ง 3 ตัว ของอะตอมของธาตุโบรอนจับยึดกับอะตอมของธาตุซิลิคอนทำให้เกิดพันธะโค เวเลนซ์ 3 ใน 4 ของอะตอมของธาตุซิลิคอน ทำให้อะตอมของธาตุซิลิคอนขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว บริเวณที่ขาดอิเล็กตรอนนั้นเรียกว่า โฮล ซึ่งโฮลนี้จะดึงอิเล็กตรอนจากพันธะข้างเคียงมาทำให้เกิด โฮลที่จุดอื่นๆแทนและโฮลก็จะเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ เพราะเกิดการดึงอิเล็กตรอนต่อกันไปเรื่อยๆ ซึ่งก็ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านผลึกเดี่ยวของธาตุซิลิคอนได้เช่นกัน อะตอมของธาตุโบรอนเราเรียกว่า อะตอมของสารเจือผู้รับ เนื่องจากเป็นอะตอมที่ต้องรับอิเล็กตรอนจากผลึกเดี่ยวของธาตุ ซิลิคอนและ เราเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุหมู่ III นี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor)

ดังนั้นสารกึ่งตัวนำใดๆ ที่มีการเติมอะตอมของสารเจือชนิด (n หรือ p) ลงไปเราจะ เรียกว่า สารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินสิค (extrinsic semiconductor) ซึ่งในการเจืออะตอมของสารเป็น การควบคุมปริมาณความเข้มข้นของอิเล็กตรอนอิสระ และ โฮล



รูปที่ 2.10 แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ที่มีการเจืออะตอมของสารเจือของธาตุต่างๆ
 ก. แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb
 ข. แสดงพันธะเคมีของผลึกเดี่ยวของธาตุ Si ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ B

2.4 ผลึกจริง [12-21]

ที่ผ่านมาพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วมักจะพบความ ไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่อง (defects) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลึกเสมอซึ่งเรียกว่า ผลึกจริง (real crystal) หรือผลึกไม่สมบูรณ์ (imperfect crystal) โดยความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่ เกิดขึ้นเหล่านี้ มักจะมีผลทำให้สมบัติต่าง ๆ ของสารเปลี่ยนแปลงไปสามารถแบ่งความไม่สมบูรณ์ของ ผลึกตามรูปทรงเรขาคณิตและรูปร่างได้เป็น 3 แบบ ดังนี้คือ

2.4.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

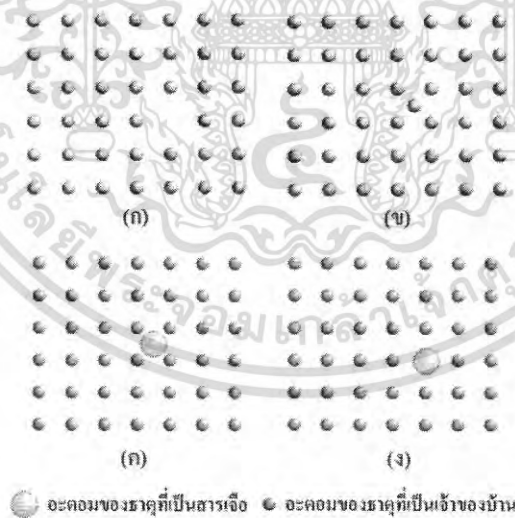
ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลตทิสที่ว่างอยู่หรือแวนแคนซี(vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ในโครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่(self interstitial) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน(host lattice) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอม

ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก(interstitial impurity-atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นหรืออะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือ (impurity atom) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอมของโครงผลึกเจ้าของบ้าน

ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่ (substitutional impurity atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นที่เป็นสารเจือ เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน



รูปที่ 2.11 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

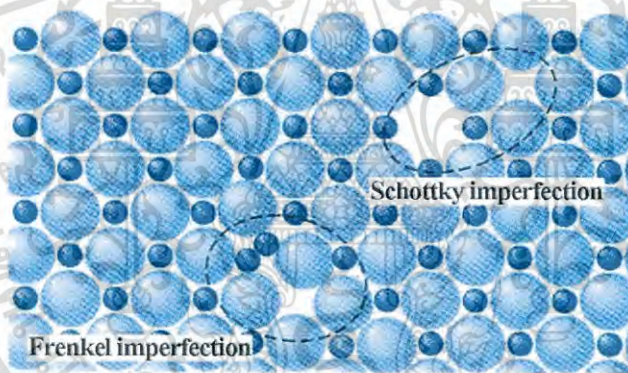
- ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลตทิสที่ว่างอยู่
- ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่
- ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก
- ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ในโครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กี (Schottky imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณผิวหน้าของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากทั้งไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกไปจากโครงผลึกเพื่อรักษาประจุของโครงผลึกให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดแวนแคนซี 2 ช่องของไอออนบวก - ไอออนลบ (cation-anion divacancy)

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล (Frenkel imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดช่องว่างขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากไอออนบวกที่มีขนาดเล็กกว่าไม่ได้หลุดหายออกไปจากโครงผลึก แต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างที่อยู่ระหว่างไอออนลบกับไอออนบวกอีกตัวหนึ่งทำให้เกิดตำแหน่งว่างของไอออนบวก (cation vacancy)



รูปที่ 2.12 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล

2.4.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น

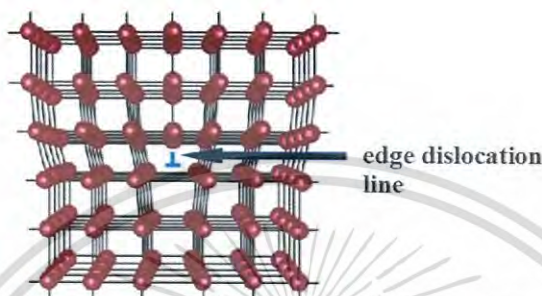
เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเชิงเส้น (line imperfection) หรือสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งคือ การเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการที่แถวของอะตอมเกิดการบิดเบี้ยว (distortion) หรือผิดรูปไป โดยมี 2 ลักษณะดังนี้

ก. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของโครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือดันออกไปจากแนวปกติโดยมีระนาบเลื่อนไถล (slip plane) ตั้งฉากกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or edge dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด (displacement) นั้นเรียกว่า

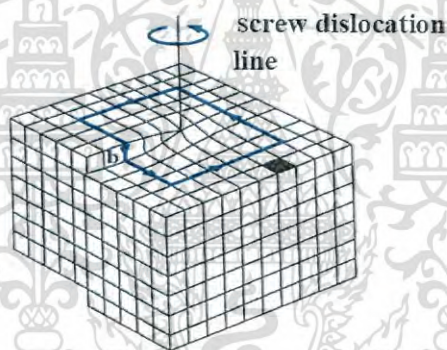
เบอร์เกอร์เวกเตอร์ (burgers vector : \vec{b}) ดังแสดงในรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู (screw dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของโครงผลึกผิดรูปไปแบบสกรูกล่าวคือระนาบที่การเลื่อนไถล (slip plane) จะขนานกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or screw dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัดนั้นเรียกว่าเบอร์เกอร์เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู

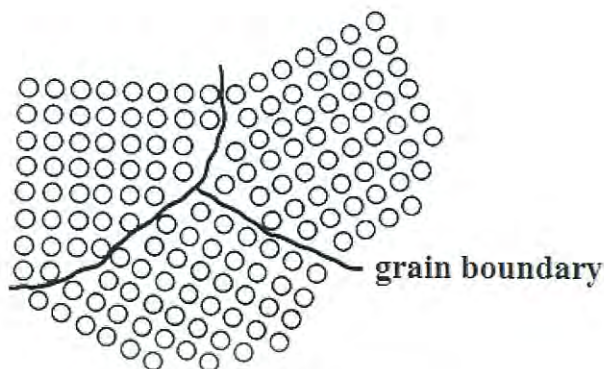
2.4.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มักเกิดขึ้นเป็นพื้นผิว (surface- imperfection) ของผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

2.4.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เกรน (grain) คือบริเวณเล็กๆที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน และตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันนั้นเรียกว่าบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยที่ผลึกที่มีมากกว่าหนึ่งเกรนนั้นเรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้นเรียกว่า ผลึกเอกพันธ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)

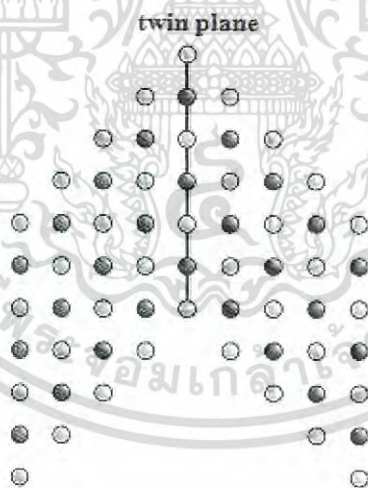
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.4.3.2 ผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด

ผลึกแฝด (twin) คือบริเวณที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจกโดยที่โครงผลึกที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงผลึกที่ผิดรูปและโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า บริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของผลึกแฝด (twin boundary or twinplane) ดังแสดงในรูปที่ 2.16



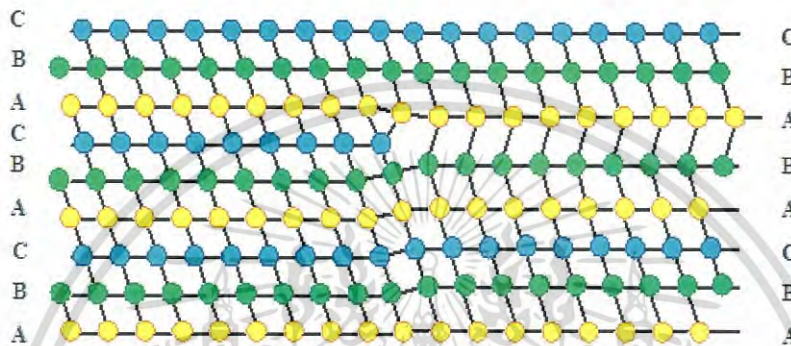
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแฝดและระนาบของผลึกแฝดหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด

2.4.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด (stacking faults)

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงผลึกมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิดพลาด เช่น สำหรับโครงผลึกออคตาเดคคิแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณีโครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิดลำดับจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลโคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิดผลึกและอาจเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของโครงสร้างผลึกแบบย่อย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดลำดับ

2.5 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ [18,19]

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร ซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้ว เกิดเป็นฟิล์มบาง

2.5.1 อัตราการระเหยสาร

จากการทดลองของเฮิร์ตซ์ (Hertz) และนูดเซน (Knudsen) พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุล ในสุญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ Φ_e คือ พลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
 P_e คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์
 M คือ มวลโมเลกุล
 T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate: Γ_e) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 * 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.3)$$

ที่ความดัน 10^{-2} ทอร์ ค่าของ Γ_e ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสาร คือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

2.5.2 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.4)$$

ถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และเมื่อแก๊สนี้เป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.65) ใหม่ได้เป็น

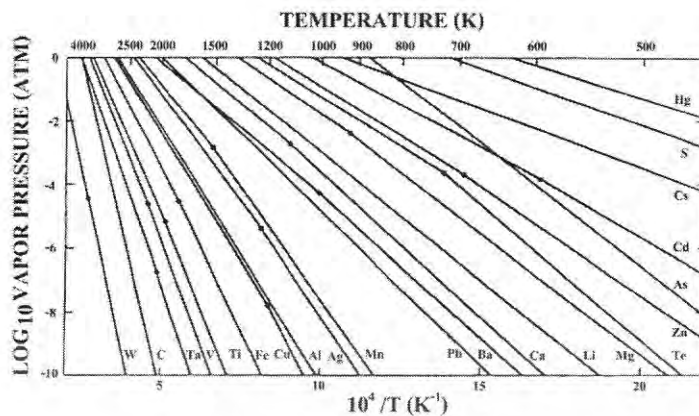
$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.5)$$

ถ้าประมาณให้ $\Delta H(T)$ มีค่าเท่ากับ ΔH_e (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

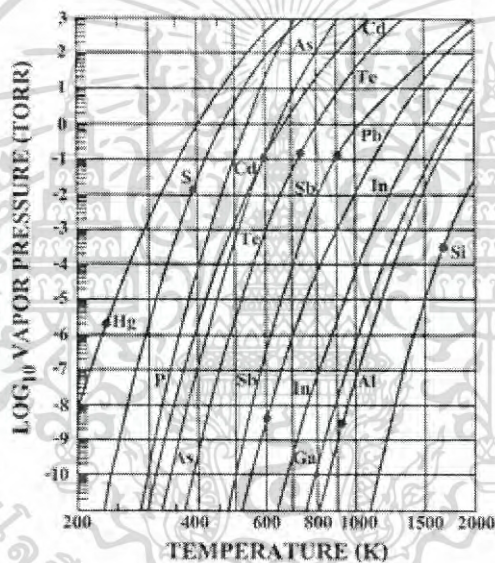
$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_e}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_e}{RT}\right) \quad (2.6)$$

เมื่อ I (หรือ $P_0 = \exp I$) เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว



รูปที่ 2.19 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

2.5.3 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อสารประกอบระเหิดกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว ตัวอย่างเช่น การระเหยสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น

เมื่อระเหยเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้ $MX_{(s)} \rightarrow M_{(g)} + \frac{1}{2}X_{2(g)}$ โดยที่ X คือ S, Te และ Se และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น $MX_{(s)}$ เหมือนเช่นเดียวกับสารตั้งต้นในการระเหย แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี	สารตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มีการแตกตัว	$MX(\text{หรือ}l) \rightarrow MX(\text{g})$	$SiO, GeO, SnO, AlN, CaF_2, MgF_2$
การแยกส่วนประกอบ	$MX(\text{s}) \rightarrow M(\text{s}) + 1/2 X_2(\text{g})$ $MX(\text{s}) \rightarrow M(\text{l}) + 1/n X_n(\text{g})$	Ag_2S, Ag_2Se สารกึ่งตัวนำกลุ่มIII-IV
การระเหยโดยการแตกตัว	$MX(\text{s}) \rightarrow M(\text{g}) + 1/2 X_2(\text{g})$	$CdS, CdTe, CdSe$
(ก) ชาลโคจีไนด์	$X = S, Se, Te$	$SiO_2, GeO_2, TiO_2, SnO_2, ZrO_2$
(ข) ออกไซด์	$MO_2(\text{s}) \rightarrow MO(\text{s}) + 1/2 O_2(\text{g})$	

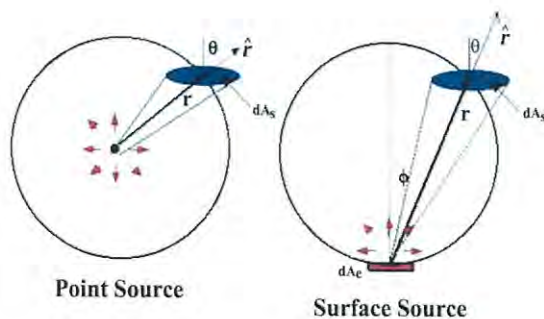
M = โลหะ X = อโลหะ

2.5.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหยรวมถึงฐานรองรับที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจากการระเหย (total evaporation mass: \bar{M}_e) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหย แต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\bar{M}_e = \int_0^t \int_{A_c} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_c dt = \int_0^t \int_{A_c} \Gamma_e dA_c dt \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น

โดยที่ A_c คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหย ปริมาณของมวล $d\bar{M}_s$ ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่ dA_s จากรูปที่ 2.20 dA_c คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า $dA_c = dA_s \cos\theta$ ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\bar{M}_s = dA_s \left(\frac{\bar{M}_c \cos\theta}{4\pi r^2} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อ r คือระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบ มวลตกกระทบลงบนพื้นที่เล็กน้อย dA_c โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด ϕ และอยู่ห่างเป็นระยะ r จะได้

$$d\bar{M}_s(\phi, r) = (\cos\phi) d\bar{M}_s(0, r) dA_c \quad (2.9)$$

แฟกเตอร์ $\cos\phi$ เป็นฟังก์ชันของ ϕ เรียกว่า การกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ (cosine flux distribution) เป็นผลมาจากระบบการไหลของโมเลกุลเพื่อประมาณค่า $\frac{d\bar{M}_s(\phi, r)}{dA_c}$ ทำการอินทิเกรตตลอดครึ่งทรงกลมรัศมี r จะได้

$$\bar{M}_c = \int_0^{\pi/2} \left(\frac{d\bar{M}_s(0, r)}{dA_c} \right) (\cos\phi) 2\pi r (\sin\phi) r d\phi \quad (2.10)$$

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

$$\frac{d\bar{M}_s(0, r)}{dA_c} = \frac{\bar{M}_c}{\pi r^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น
$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, r)}{dA_c} = \frac{\bar{M}_c}{\pi^2} \cos\phi$$

จาก
$$dA_c = dA_s \cos\theta$$

จะได้
$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \frac{\bar{M}_c \cos\phi \cos\theta}{\pi^2} \quad (2.11)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \bar{M}_c \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos\theta}{2\pi^2} \quad (n \geq 0) \quad (2.12)$$

เมื่อ $n = 1$ สมการนี้จะเป็นการกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ ถ้า $n > 1$ อธิบายได้ว่ามีทิศทางของฟลักซ์หลายทิศทาง (more forward directed) หรือถ้า $n < 1$ จะเกิดการกระจายแบบเดียวกัน (more uniform distribution) และสำหรับ $n = 0$ การกระจายของฟลักซ์จะเหมือนแหล่งกำเนิดแบบจุด

2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [12-15,20-23]

การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบใดเป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ต่อไป

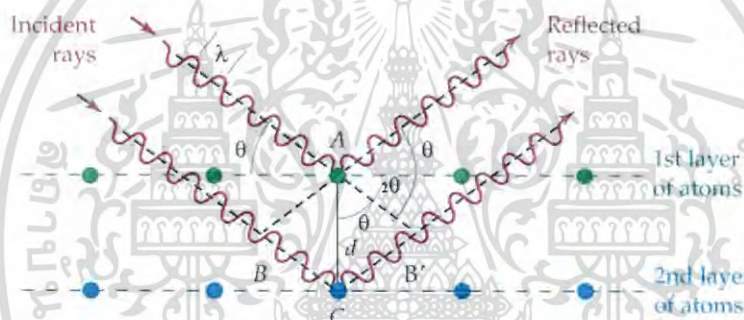
ในปี 1912 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ มากซ์ ฟอน เลาเอ (Max Von Laue) ได้ค้นพบการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึก (มีระยะห่างระหว่างอะตอมประมาณ 10^{-10} เมตร) โดยการผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในผลึกแล้วศึกษาถึงวิธีการแทรกสอดของรังสีเอกซ์บนแผ่นฟิล์ม โดยสังเกตว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่รังสีเอกซ์ถูกกระเจิงด้วย อะตอมหรือโมเลกุลที่จัดเรียงตัวบนระนาบต่าง ๆ ของโครงผลึก

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ชาวอังกฤษคือ วิลเลียม เฮนรี แบริก และวิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบริก (William Henry Bragg and William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนและได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ไว้ว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกัน เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (2.13)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.13)$$

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



รูปที่ 2.21 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เราสามารถนำมาหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ ในกรณีของผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก ($a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90$ องศา) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.13) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.14) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a) เมื่อทราบมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผลึกที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์จัดอยู่ในระบบเตตระโกนัล

($a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90$ องศา) มีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.16)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.13) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.16) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก (a, c) เมื่อเรารู้ขนาดมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.17)$$

นอกจากนั้นเรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปหาสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึก (texture coefficient) ของระนาบ (hkl) ขนาดของเกรน ความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ของโครงสร้างผลึก (dislocation density) ความเครียด (strain) และความน่าจะเป็นของความผิดพลาดการจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึก (stacking fault probability) สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึกหาได้จากสมการ

$$TC(hkl) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}{\frac{1}{N} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}} \quad (2.18)$$

เมื่อ $TC(hkl)$ คือ สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงสร้างผลึก (hkl)

$I(hkl)$ คือ ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ปรากฏ

$I_0(hkl)$ คือ ความเข้มมาตรฐาน ASTM ของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

N คือ จำนวนพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏ

ขนาดของเกรน (D) และความเครียด (ϵ_s) เราสามารถหาได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.19)$$

ดังนั้น

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.20)$$

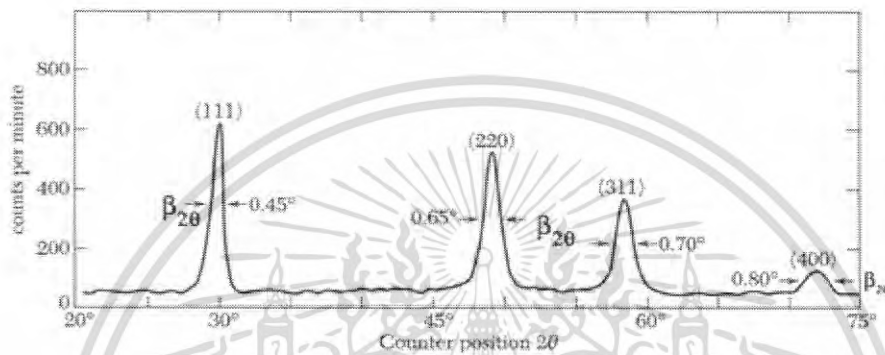
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน

β คือ ความกว้างเต็มช่วงที่ครึ่งค่าสูงสุดของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
(full width at half maximum : FWHM)

θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก

ϵ_s คือ ความเครียด

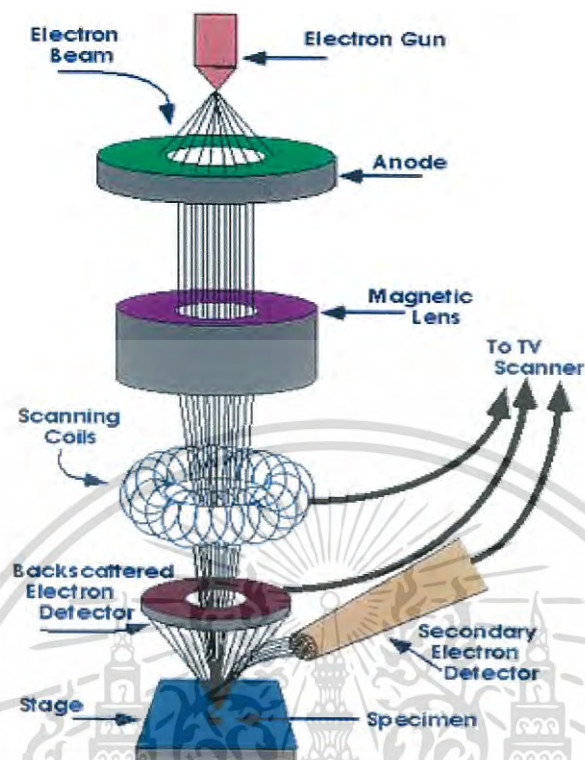


รูปที่ 2.22 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [12-15,17-25]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

1. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวตรวจอิเล็กตรอน (electron probe diameter : d_p)
2. กระแสตัวตรวจอิเล็กตรอน (electron probe current : i_p)
3. มุมการกระเจิงของลำอิเล็กตรอน (electron probe convergence : α_p)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย d_p แปรผันตรงกับ i_p แต่ผกผันกับ α_p ตัวอย่างเช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง i_p จะมีค่าน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งสามารถแบ่งอันตรกิริยาของการชนเป็นสองลักษณะคือการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งการชนทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน

การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)

ในกรณีการชนแบบยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสูญเสียพลังงานบางส่วน (น้อยมาก) ให้กับอะตอมของตัวอย่างที่ตกกระทบและมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่มีการกระเจิงกลับจากผิวของสารตัวอย่างอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับส่วนนี้เรียกอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (backscatter electron : BE) ภายในห้องใส่ตัวอย่างจะมีหัววัดสัญญาณ (detector) ติดตั้งไว้เพื่อนำสัญญาณ BE นี้ไปสร้างเป็นสัญญาณภาพแสดงผลบนจอ CRT

การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

ในกรณีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจลน์ให้กับอิเล็กตรอนของสารตัวอย่างและทำให้อะตอมของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกันซึ่งหลังจากการชนชนิดนี้จะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชนชนิดนี้ เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ ออเจิเล็กตรอน (Auger electrons) รังสีเอ็กซ์ลักษณะเฉพาะ (characteristic X-ray) รังสีเอ็กซ์ชนิดต่อเนื่องหรือเบรมสตราลุง (continuum X-rays or bremsstrahlung) การเปล่งแสงแสงแคโทด (cathode luminescence) เป็นต้น จะเห็นว่าการชนในลักษณะนี้จะเกิดสัญญาณหลายชนิดโดยแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะของภาพจากสัญญาณ SE จนถึงวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอ็กซ์อันจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างนั้น ๆ

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

การถ่ายโอนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิของสารตัวอย่างไปยังบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษา ลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ภาพของสัญญาณ SE เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้โอกาสในการเกิดสัญญาณ SE ยังขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสามารถเคลื่อนผ่านลงไปเนื้อของสาร

ตัวอย่าง ซึ่งถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิจำกัดโอกาสที่จะเกิด SE นั้นก็จะน้อยลงหมายถึง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทาง การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจากสารตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวของ สารตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวของสารตัวอย่างโอกาสที่ SE จะหลุดออกมาจากชั้นที่อยู่ในระดับลึกนั้นก็น้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้นโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคูโลมบีใกล้นิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วจึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ซึ่งจะมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยาถึงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยาสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ (กรณี $E_0 - E_1$)

$$E_0 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (2.21)$$

เมื่อ E_0 คือ พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยา

E_1 คือ พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยา

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant) = 6.625×10^{-34} จูล.วินาที

ν คือ ความถี่ของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น

2.8 รอยต่อพี-เอ็น [11-15,18-19,23]

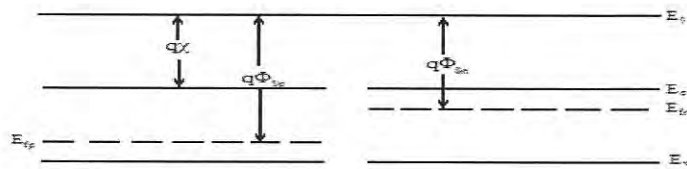
รอยต่อพี-เอ็น คือบริเวณที่ชนิดการนำไฟฟ้าของสารเปลี่ยนจากชนิดพีเป็นชนิดเอ็นหรือเปลี่ยนจากชนิดเอ็นเป็นชนิดพี โดยที่โครงสร้างของผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด รอยต่อพี-เอ็น เป็นส่วนที่สำคัญมากในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแทบทุกชนิด และคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นดังกล่าวนี้จะขึ้นกับกระบวนการผลิตซึ่งมีมากมายหลายแบบ วิธีการประดิษฐ์รอยต่อที่สำคัญ ๆ ในปัจจุบันมีดังนี้คือ วิธีการแพร่ซึม วิธีอีพิแทกซี (epitaxy) วิธีฝังไอออน (ion implantation) และแบบหลอมผสม (alloying) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

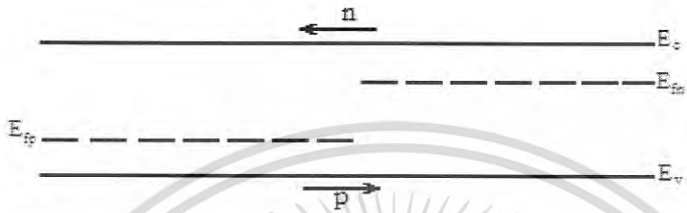
2.8.1 รอยต่อในสภาวะสมดุล

แบบจำลองของรอยต่อพี-เอ็น ในเชิงอุดมคติจะเริ่มพิจารณาที่รอยต่อแบบโฮโม (homo junction) ซึ่งทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน จึงมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากัน โดยเริ่มจากอิเล็กตรอนที่มีอยู่จำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่เข้าไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่น้อยมาก ในทำนองเดียวกันโฮลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะแพร่เข้าไปยังด้านเอ็นซึ่งมีโฮลอยู่น้อยมาก การแพร่ของพาหะเหล่านี้จะทำให้เนื้อสารขาดความเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอนอิสระไป ทำให้บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ใกล้รอยต่อ แสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวกเนื่องจากมีประจุบวกของไอออนของอะตอมผู้ให้ถูกทิ้งไว้ สำหรับทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็จะมีลักษณะคล้าย ๆ กัน คือมีไอออนของอะตอมผู้รับซึ่งมีประจุเป็นลบปรากฏอยู่ ยังผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อโดยที่สนามไฟฟ้ามีทิศจากทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ต้านการแพร่ซึม บริเวณรอยต่อนี้จึงปลอดจากพาหะอิสระและเรียกบริเวณนี้ว่าเขตปลอดพาหะ (depletion region) หรือบางครั้งเรียกว่าบริเวณประจุค้าง (space charge region) เนื่องจากมีประจุของไอออนสารเจืออยู่ซึ่งเป็นประจุที่ถูกตรึงอยู่กับที่ (fixed charge) ไม่ใช่ประจุอิสระ

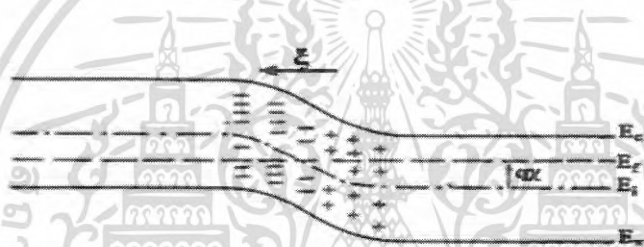
ลักษณะการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนและโฮลที่รอยต่ออาจแสดงได้โดยแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานดังรูปที่ 2.24 โดยที่รูป 2.24(ก) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ รูปที่ 2.24(ข) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ซึ่งจะเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.24(ค) โดยที่ ϕ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อ และ ξ คือ สนามไฟฟ้าที่รอยต่อ



(ก)



(ข)



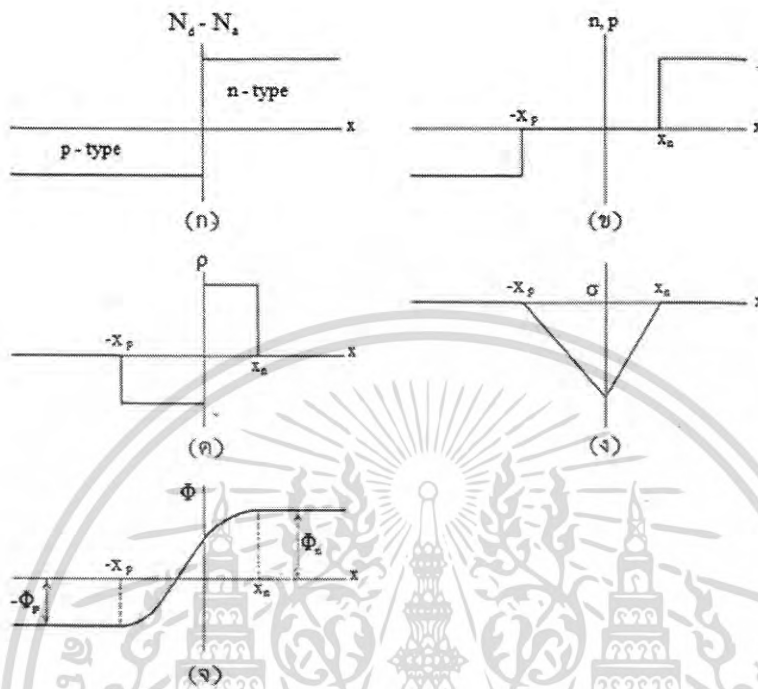
(ค)

- รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น
- ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์
 - ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์
 - ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์และอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

2.8.2 รอยต่อแบบขั้น (step junction)

รอยต่อแบบขั้นเป็นรอยต่อในเชิงอุดมคติ ที่พิจารณาว่าปริมาณความเข้มข้นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีต่างมีค่าคงที่ (แต่ค่าไม่เท่ากัน) จนกระทั่งถึงจุดเชื่อมต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังแสดงในรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงรอยต่อแบบชั้นที่เป็นฟังก์ชันกึ่งประยะทาง

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

ประจุไฟฟ้าจะมีค่าไม่เป็นศูนย์เฉพาะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จะหาสนามไฟฟ้าทางสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นได้โดยใช้สมการของปัวซอง (Poisson's equation) นั่นคือ

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{-d^2\xi}{dx^2} = \frac{-qN_d}{\epsilon_s} \tag{2.22}$$

แล้ว

$$\xi(x) = \frac{-qN_d}{\epsilon_s}(x_n - x) ; 0 < x < x_n \tag{2.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่ามีทิศไปทางซ้ายมือและสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นและสิ้นสุดที่ระยะทาง x_n ดังนั้นสนามไฟฟ้าจะต้านการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนที่จะแพร่ซึมจากขวาไปซ้าย ในทำนองเดียวกันสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีความสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นดังนี้

$$\xi(x) = \frac{-q}{\epsilon_s} N_a (x + x_p) ; -x_p < x < 0 \quad (2.24)$$

ซึ่งสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีทิศต้านการแพร่ซึมของโฮลด้วยเหมือนกัน ที่ระยะ $x=0$ สนามไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่อง นั่นคือ

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (2.25)$$

ซึ่งแสดงว่าความกว้างของเขตปลอดพาหะทั้งทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารเจือ กล่าวคือถ้าด้านใดมีความเข้มข้นของสารเจือสูง เขตปลอดพาหะจะยื่นเข้าไปในเนื้อสารด้านนั้นน้อย ในทางตรงกันข้าม ถ้าด้านใดมีความเข้มข้นของสารเจือต่ำ เขตปลอดพาหะส่วนใหญ่จะตกอยู่ในเนื้อสารของด้านนั้น แต่ถ้าให้ความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้รับทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากๆ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกเจืออย่างหนัก (heavily doped n-type) จะถือได้ว่า เขตปลอดพาหะที่รอยต่อเข้าไปอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพี และจะเรียกรอยต่อชนิดนี้ว่า รอยต่อแบบขั้นด้านเดียว (one-sided step junction)

ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตสมการที่ (2.24) เทียบกับ x นั่นคือ

$$\phi(x) = \phi_n - \frac{qN_d}{2\epsilon_s} (x_n - x)^2 ; 0 < x < x_n \quad (2.26)$$

โดยที่
$$\phi_n = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \quad (2.27)$$

ในทำนองเดียวกัน ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ

$$\phi(x) = \phi_p + \frac{qN_a}{2\epsilon_s} (x + x_p)^2 ; -x_p < x < 0 \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\phi_p = \frac{-kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (2.29)$$

ϕ_p คือ ศักย์ไฟฟ้าในเนื้อของสารสารกึ่งตัวนำชนิดพีนอกเขตปลอดพาหะอิสระและมีค่าเป็นลบ ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่าง $\phi_n - \phi_p$ จะมีค่าดังนี้ คือ

$$\phi_i = \phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) \quad (2.30)$$

และเรียก ϕ_i ว่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อ (built-in potential) ซึ่งจะมีเครื่องหมายเป็นบวก ในกรณีที่มีการเจือสารด้วยความเข้มข้นสูงมาก ($\approx 10^{19}$ ต่อตารางเซนติเมตร) สมการที่ (2.30) จะไม่เป็นจริงอีกต่อไป เพราะว่าการเจือสารอย่างสูง เราจะประมาณฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มิ-ดิแรคด้วยฟังก์ชันการแจกแจงของแม็กเวลล์-โบลต์ซมานน์ไม่ได้ เนื่องจากระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำจะเลื่อนเข้าหาขอบของแถบพลังงาน (ในสารสารกึ่งตัวนำชนิดพีระดับเฟอร์มิจะเลื่อนเข้าหาขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ เป็นต้น) นั่นคือระดับเฟอร์มิของสารที่ถูกเจืออย่างหนัก จะเลื่อนไปจากระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิคเท่ากับ $E_g/2q$ หรือราว ๆ 0.56 อิเล็กตรอนโวลต์ ใน Si ดังนั้นในรอยต่อ $p^+ - n$ ศักย์ในตัวจะมีค่าดังนั้นคือ

$$|\phi_i| = 0.56 + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (2.31)$$

และที่บริเวณเขตปลอดพาหะเกือบทั้งหมดจะปรากฏในเนื้อสารสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของหัวต่อแต่ถ้าเป็นหัวต่อพี-เอ็นปกติ จะพบว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะคือ

$$x_p + x_n = \left[\frac{2 \epsilon_s}{q} \phi_i \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (2.32)$$

ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะขึ้นกับส่วนกลับของรากที่สองของความเข้มข้นของสารเจือโดยประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 รอยต่อพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ [11-15,17,23-24,34-37]

ถ้าให้แรงดันไฟ V_a แก่รอยต่อในลักษณะที่ขั้วลบต่อเข้ากับสารสารกึ่งตัวนำชนิดพีและขั้วบวกต่อเข้ากับสารสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และประมาณว่าแรงดัน V_a ทั้งหมดไปตกคร่อมอยู่ที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้น แรงดันในตัว ϕ_i ของสมการที่ (2.33) จะถูกแทนที่ด้วย $\phi_i - V_a$

$$x_d = x_n + x_p = \left[\frac{2 \epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

ถ้า V_a มีค่ามากกว่า ϕ_i แล้ว ความกว้างของเขตบริเวณเขตปลอดพาหะจะแปรผันตรงกับรากที่สองของ V_a จากรูปที่ 2.2 (ง) สนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเมื่อ

ดังนั้น

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

$$\xi_{\max} = \frac{2(\phi_i - V_a)}{x_d} \quad (2.34)$$

2.9 ค่าความจุไฟฟ้า [11,13-15,28,23-25]

ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของบริเวณรอยต่อจะแสดงอยู่ในรูปของประจุ Q_s (ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) ในบริเวณเขตปลอดพาหะ ดังความสัมพันธ์

$$Q_s = qN_d x_n = qN_a x_p \quad (2.35)$$

จากนิยามของค่าความจุไฟฟ้าคือ

$$C = \frac{dQ}{dV_a} = qN_d \frac{dx_n}{dV_a} = qN_a \frac{dx_p}{dV_a} \quad (2.36)$$

แต่เนื่องจาก $x_p = (N_d / N_a) x_n$ และ $x_d = x_n + x_p$ รวมทั้งพิจารณาสมการที่ (2.33) จะได้ว่า

$$\frac{dx_n}{dV_a} = \frac{1}{N_d} \left[\frac{\epsilon_s}{2q \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$C = \left[\frac{q \epsilon_s}{2q \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.38)$$

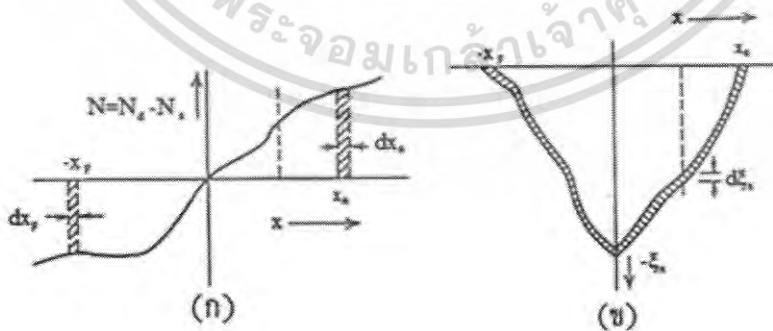
ในกรณีที่ $|V_a|$ มีค่ามากกว่า ϕ_i แล้วค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อแบบชั้นจะลดลงโดยแปรผกผันกับรากที่สองของ V_a ถ้าแทนสมการที่ (2.33) ลงในสมการที่ (2.17) จะได้ว่า $C = \epsilon_s / x_d$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่รู้จักกันแพร่หลายสำหรับไฟฟ้าสถิตย์ขนาดเล็กละ

อย่างไรก็ตาม ถ้าเป็นกรณีที่ความหนาแน่นของสารเจือในบริเวณรอยต่อมีค่าไม่สม่ำเสมอในช่วง $-x_p$ ถึง x_n ดังรูปที่ 2.26 ประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ Q ที่ปรากฏอยู่ระหว่าง x และขอบเขตบริเวณปลอดพาหะ x_n จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q = q \int_x^{x_n} N dx \quad (2.39)$$

เมื่อ N คือค่าความหนาแน่นของประจุสุทธิและมีค่าเท่ากับ $N_D - N_A$ แต่เนื่องจาก $\zeta_x(x_n) = 0$ โดยการใช้กฎของเกาส์ (Gauss' law) จะได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง x ใด ๆ มีค่าดังนี้คือ

$$-\zeta(x) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_x^{x_n} q N dx = \frac{Q}{\epsilon_s} \quad (2.40)$$



รูปที่ 2.26 แสดงโปรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ

ก. แสดงความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่าไม่สม่ำเสมอภายในเขตปลอดพาหะ

ข. ลักษณะของสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า

เปลี่ยนไปเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.26 (ข) เมื่อแรงดันไฟย้อนกลับ V_a มีค่าเปลี่ยนไป dV_a ขอบเขตของบริเวณปลอดพาหะทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเปลี่ยนไป dx_n และประจุไฟฟ้าที่ปรากฏอยู่ในบริเวณตั้งแต่ x จนถึง x_n จะมีค่าดังนี้คือ

$$dQ = qN(x_n) dx_n \quad (2.41)$$

แล้วสนามไฟฟ้าที่จุด x จะเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์

$$-d\xi_x = \frac{dQ}{\epsilon_s} = \frac{q}{\epsilon_s} N(x_n) dx_n \quad (2.42)$$

แต่เนื่องจากพื้นที่กราฟ ξ_x กับ x จะสัมพันธ์กับ $\phi_i - V_a$ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะสอดคล้องกับพื้นที่แรเงาของรูปที่ 2.26 (ข) ดังนั้นจะได้ว่า

$$dV_a \approx -x_d d\xi_x = \frac{x_d}{\epsilon_s} dQ \quad (2.43)$$

และจากนิยาม ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็ก คือ

$$C = \frac{dQ}{dV_a} = \frac{\epsilon_s}{x_d} \quad (2.44)$$

ภายใต้สภาวะไบอัสย้อนกลับ บริเวณขอบเขตปลอดพาหะทั้งด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเลื่อนออกไปจากแนวเดิม สำหรับอนุพันธ์ของสมการที่ (2.44) เทียบกับ x_n คือ

$$\frac{dC}{dx_n} = \frac{\epsilon_s}{(x_n + x_p)^2} \left(1 + \frac{dx_p}{dx_n} \right) \quad (2.45)$$

แต่เนื่องจากขนาดของประจุไฟฟ้าทั้งสองข้างของบริเวณรอยต่อที่เปลี่ยนไปต่างต้องมีปริมาณที่เท่ากัน

$$\text{นั่นคือ} \quad |dQ| = |qN(-x_p) dx_p| = qN(x_n) dx_n \quad (2.46)$$

$$\text{และ} \quad \frac{dC}{dx_n} = \frac{-C^2}{\epsilon_s} \left(1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|} \right) \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

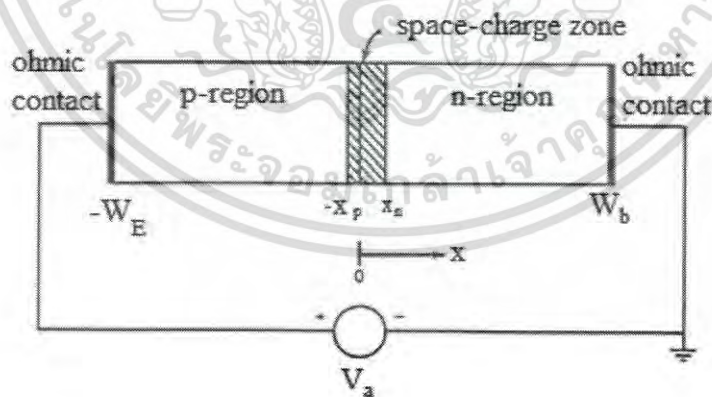
แทนค่า dx_n ของสมการที่ (2.47) ลงในสมการที่ (2.41) จะได้ว่า

$$N(x_n) = \frac{C^2}{\epsilon_s (dC/dV_a)} \left(1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|} \right) \quad (2.48)$$

ถ้าด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีถูกเจืออย่างหนัก แล้วพจน์ขวามือในวงเล็บของสมการที่ (2.48) จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะกลายเป็นการหาค่าความเข้มข้นสารเจือของรอยต่อแบบข้างเดียว (one sided step junction)

2.10 ลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น [13-15,24-25,30-32]

จากรูปที่ 2.27 แสดงการป้อนแรงดันไฟตรง V_a ให้กับไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น ไดโอดมีพื้นที่หน้าตัด A ถ้าไม่มีการฉายแสงไปยังไดโอด กระแสที่ไหลผ่านไดโอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดของแรงดัน V_a แรงดันส่วนใหญ่จะตกคร่อมที่รอยต่อมากกว่าในเนื้อสารซึ่งถือว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) และที่ขั้วไฟฟ้า (ohmic contact) แรงดันไฟฟ้าสุทธิที่รอยต่อจะเท่ากับ $\phi_i - V_a$ ถ้า V_a มีค่าเป็นบวก จะเรียกว่าการไบอัสไปหน้า แต่ถ้า V_a มีเครื่องหมายเป็นลบเรียกว่าการไบอัสย้อนกลับ กระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าน้อยมาก และกระแสจะคงที่ไม่ขึ้นกับค่า V_a ในช่วงของ V_a ขนาดหนึ่ง



รูปที่ 2.27 แสดงโครงสร้างของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นขณะถูกไบอัสไปหน้าด้วยแรงดัน V_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย (Boundary Values of Minority Carrier Densities) [13-15,24-25,30-32]

ภายใต้เงื่อนไขการฉีดกระแสระดับต่ำ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ขอบของเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ติดกับรอยต่อพี-เอ็น คือที่ระยะ x_n จะเท่ากับ ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือไม่ว่าจะอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนหรือภายใต้การไบอัสก็ตาม นั่นคือ $n_{no}(x_n) = N_d(x_n)$ ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของโฮลที่ขอบของเนื้อสารชนิดกึ่งตัวนำชนิดพีที่ระยะ $-x_p$ จะมีค่า $p_{po}(-x_p) = N_a(-x_p)$ ดังนั้นจะสรุปได้ว่า

$$\begin{aligned} n_{po}(-x_p) &= n_{no}(x_n) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \\ &= N_d(x_n) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} p_{no}(x_n) &= p_{po}(-x_p) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \\ &= N_a(-x_p) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.50)$$

ภายใต้การไบอัสด้วยแรงดันตามเงื่อนไขการฉีดพาหะระดับต่ำจะได้

$$n_p(-x_p) = N_d(x_n) \exp\left[\frac{-q(\phi_i - V_a)}{kT}\right] \quad (2.51)$$

และ

$$p_n(x_n) = N_a(-x_p) \exp\left[\frac{-q(\phi_i - V_a)}{kT}\right] \quad (2.52)$$

นิยามความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกิน n' และความหนาแน่นของโฮลส่วนเกิน p' ที่เกิดขึ้นคือ

$$n' \equiv n - n_0 \quad (2.53)$$

$$p' \equiv p - p_0 \quad (2.54)$$

แล้ว

$$n'_p(-x_p) = n_{po}(-x_p) \left[\exp\left(\frac{-qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.55)$$

และ

$$p'_n(x_n) = p_{no}(x_n) \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การวิเคราะห์ไดโอดอุดมคติ (ideal-diode analysis) [13-15,24-25,30-32]

ในเบื้องต้นจะพิจารณาการฉีดโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีข้ามรอยต่อเข้าไปในเนื้อสารชนิดสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านศูนย์กลางการรวมตัว ดังนั้นสมการความต่อเนื่องในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนอกรอยต่อ คือ

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

แต่จากสมการที่ (3.22)

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

ดังนั้น

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{(p_n - p_{no})}{\tau_p} \quad (2.57)$$

ในสภาวะคงตัว $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$ แล้วสมการที่ (2.57) จะกลายเป็น

$$0 = D_p \frac{d^2 p'_n}{dx^2} - \frac{p'_n}{\tau_p} \quad (2.58)$$

ผลเฉลยของสมการที่ (2.58) คือ

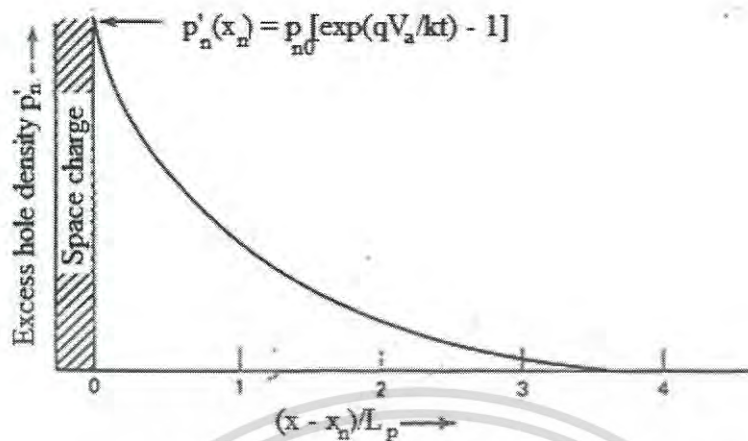
$$p'_n(x) = A \exp\left(-\frac{(x-x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) + B \exp\left(\frac{(x-x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) \quad (2.59)$$

2.12.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว (long-bass diode characteristics)

จากรูปที่ 2.28 ถ้า W_b มีความยาวมากกว่าความยาวแพร่ซึมของโฮล $L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p}$ ในกรณีที่โฮลที่ถูกฉีดเข้ามาในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนจนหมดก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า จะเรียกกรณีนี้ว่าไดโอดยาว เนื่องจาก p'_n ควรจะต้องมีค่าน้อยลงตามระยะทาง x ที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลนี้ค่าคงตัว B ในสมการที่ (2.59) จะต้องเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$p'_n(x) = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1] e^{-(x-x_n)/L_p} \quad (2.60)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



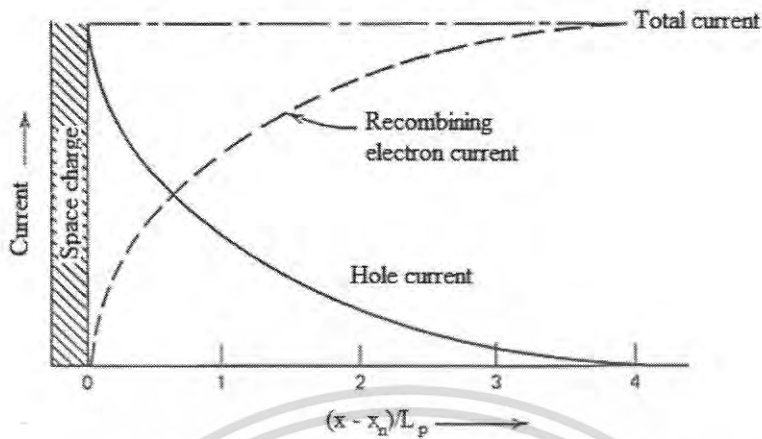
รูปที่ 2.28 แสดงการลดลงของความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดยวาทภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบอัสไปหน้าค่าเท่ากับ V_a

ความหนาแน่นของกระแสโฮลที่ไหลในเนื้อสารจะคิดเฉพาะกระแสที่มาจากกลไกการแพร่ซึมเท่านั้นเนื่องจากถือว่าแรงดันตกคร่อมในเนื้อสารมีค่าน้อยมากสนามไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นศูนย์ จากสมการที่(2.58) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 J_p(x) &= -qD_p \frac{dp_n}{dx} = qD_p \frac{p_{n0}}{L_p} [e^{(qV_a/kT)} - 1] e^{-(x-x_n)/L_p} \\
 &= qD_p \frac{n_i^2}{N_d L_p} [e^{(qV_a/kT)} - 1] e^{-(x-x_n)/L_p}
 \end{aligned} \quad (2.61)$$

กระแสโฮลจะมีค่าสูงสุดที่ระยะ $x = x_n$ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นแล้วความหนาแน่นของโฮลจะลดลง เนื่องจากรวมตัวกับอิเล็กตรอน แต่กระแสสุทธิจะต้องคงที่เสมอ ดังนั้นกระแสอิเล็กตรอนจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทาง x เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 แสดงกระแสโฮล (เส้นทึบ) กับกระแสอิเล็กตรอน (เส้นประ) ในเนื้อสารด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) เนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันไบอัสไปหน้า V_a

ในการทำงานเดียวกันอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพีของรอยต่อพี-เอ็นอิเล็กตรอนจะกลายเป็นพาหะข้างน้อย จึงเรียกว่าการฉีดพาหะข้างน้อย (minority-carrier injection) ถ้า $W_E \gg L_n$ กระแสของอิเล็กตรอนที่เข้าไฟฟ้าที่ตำแหน่ง $-W_E$ คือ

$$J_n = qD_n \frac{n_i^2}{N_a L_n} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] e^{(x+x_p)/L_n} \quad (2.62)$$

โดยที่ x ในสมการที่ (2.62) จะมีเครื่องหมายเป็นลบ นั่นคือกระแสอิเล็กตรอนจะลดลงเมื่อ x ออกห่างจากรอยต่อพี-เอ็นไปสู่เนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากขึ้นกระแสสุทธิจะหาได้จากการนำเอาสมการที่ (2.61) รวมกับสมการที่ (2.62) นั่นคือ

$$\begin{aligned} J_t &= J_p(x_n) + J_n(-x_p) = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{N_d L_p} + \frac{D_n}{N_a L_n} \right) \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\ &= J_0 \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.63)$$

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 ว่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น

ถ้าทั้ง W_B และ W_E สั้นกว่า ความยาวแพร่ซึมของโฮล L_p และของอิเล็กตรอน L_n จะมีเพียงบางส่วนของพาหะข้างน้อยที่สูญหายไปเนื้อสาร เนื่องจากการรวมตัวกับพาหะข้างมากในเนื้อสารเหล่านั้น แล้วพาหะข้างน้อยนี้จะเกิดการรวมตัวกันหมดที่ขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง W_B และ W_E สำหรับไดโอดสั้น จากการกระจายพจน์ในสมการที่ (2.59) ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์จะได้ว่า

$$p'_n(x) = A' + B' \frac{(x - x_n)}{L_p} \quad (2.64)$$

ที่ขั้วไฟฟ้า ณ ที่ตำแหน่ง $x = W_B$, $p'_n(W_B) = 0$

หรือ

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

$$B' = \frac{-A' L_p}{(W_B - L_n)} \quad (2.65)$$

ที่ตำแหน่ง $x = x_n$ จะได้ว่า $p'_n(x_n) = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1]$ (2.66)

และที่ตำแหน่ง $x = x_n$ นี้สมการที่ (2.66) และสมการที่ (2.64) ต้องมีค่าเท่ากัน นั่น คือ

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

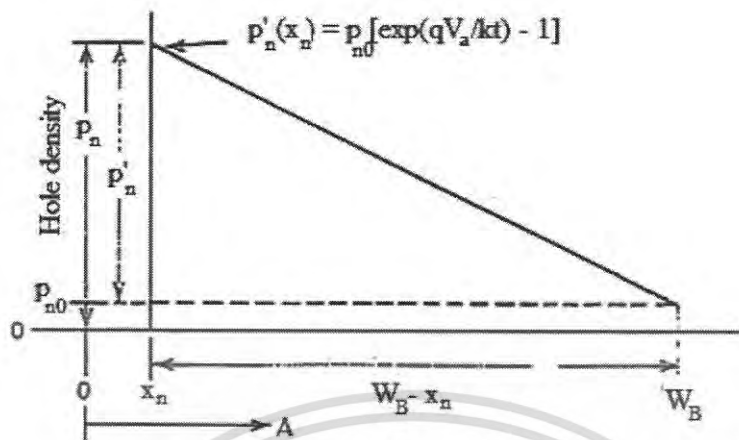
แล้ว

$$A' = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1] \quad (2.67)$$

แทนสมการที่ (2.65) และสมการที่ (2.67) ลงในสมการที่ (2.64) จะได้

$$p'_n(x) = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1] \left(1 - \frac{x - x_n}{W'_B} \right) \quad (2.68)$$

เมื่อ $W'_B = W_B - x_n$ ความเข้มข้นของโฮลส่วนเกินจะลดลงแบบเชิงเส้นกับระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดสั้นภายใต้การไบอัสไปหน้า V_a

จะหาความหนาแน่นของกระแสโฮลได้โดยการแทนสมการที่ (2.68) ลงในสมการที่ (2.58) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 J_p &= -qD_p \frac{dp}{dx} = qD_p \frac{p_{n0}}{W_B'} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\
 &= qD_p \frac{n_i^2}{N_d W_B'} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right]
 \end{aligned} \quad (2.69)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถที่จะหาความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังสมการ

$$J_n = qD_n \frac{n_i^2}{N_a W_E'} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \quad (2.70)$$

ความหนาแน่นกระแสสุทธิในไดโอดสั้นคือ

$$\begin{aligned}
 J_t &= qn_i^2 \left(\frac{D_p}{N_d W_B'} + \frac{D_n}{N_a W_E'} \right) \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\
 &= J_0 \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right]
 \end{aligned} \quad (2.71)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

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

ในทางปฏิบัติไดโอดที่ใช้งานจริง อาจจะเป็นรูปแบบการผสมของไดโอดสั้นกับไดโอดยาวก็ได้ ซึ่งการหาค่ากระแสเล็กรอนและโวลสามารถนำเอาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไดโอดยาวและไดโอดสั้นมาประยุกต์ใช้ได้ทันที จากสมการที่ (2.63) และสมการที่ (2.71) ภายใต้การไบอัสไปหน้า กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตามค่าของ V_a เนื่องจากการฉีดพาหะข้างมากข้ามรอยต่อ แต่ภายใต้การไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสอิมิตัวปริมาณเล็กน้อยไหลผ่านไดโอด เนื่องจากการฉีดพาหะข้างน้อยข้ามรอยต่อ โดยที่กระแสอิมิตัวนี้ไม่ขึ้นกับแรงดันย้อนกลับ

2.13 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง (space-charge-region currents) [13-15,24-25,30-32]

ในกรณีไดโอดอุดมคติซึ่งมีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ดังสมการที่ (2.63) และสมการที่ (2.71) นั้นยังไม่ได้คิดถึงผลของกระแสที่อาจจะลดลงภายใต้การไบอัสไปหน้า เนื่องจากพาหะอิสระสูญหายไปบางส่วนซึ่งเกิดจากกลไกการรวมตัวผ่านศูนย์กลางการรวมตัวในบริเวณประจุค้าง ในทางกลับกันพาหะอาจถูกสร้างขึ้นได้ภายใต้การไบอัสย้อนกลับ ยังผลให้กระแสอิมิตัวมีค่ามากกว่าค่าที่ได้ในสมการของไดโอดอุดมคติ

จากทฤษฎีของชอกเลย์-ฮอลล์-รีด สามารถจะหาอัตราการเกิด-การรวมตัวสุทธิได้โดยการแทน $pn = n_i^2 \exp(qV_a / kT)$ ลงในสมการที่ (2.65) แล้วจะได้ว่า

$$U = n_i^2 \frac{[e^{(qV_a/kT)} - 1]}{[p + n + 2n_i \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)] \tau_0} \quad (2.72)$$

ความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากพาหะที่เกิดหรือรวมตัวในบริเวณประจุค้างคือ

$$J_r = q \int_{-x_p}^{x_n} U dx \quad (2.73)$$

ถ้าประมาณว่า $E_t \approx E_i$, $p = n = n_i \exp(qV_a / 2kT)$ แล้วสมการ (2.72) จะกลายเป็น

$$U = \frac{n_i^2 [e^{(qV_a/kT)} - 1]}{2n_i [e^{(qV_a/kT)} + 1] \tau_0} \quad (2.73)$$

แทนสมการที่ (2.74) ลงในสมการที่ (2.73) จะได้

$$J_r = \frac{q x' n_i^2 [e^{(qV_a/kT)} - 1]}{2n_i [e^{(qV_a/kT)} + 1] \tau_0} \approx \frac{q x' n_i}{2\tau_0} \exp(qV_a / 2kT) \quad (2.74)$$

เมื่อ $\tau_0 = 1 / N_t \sigma v_{th}$ ความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากกลไกการรวมตัวของพาหะในบริเวณประจุก้างภายใต้การไบอัสไปหน้า จะเพิ่มขึ้นตามแรงดันในแบบ $\exp(qV_a/2kT)$ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าในกรณีของไดโอดอุดมคติ อัตราส่วนของ J_t / J_r ภายใต้การไบอัสไปหน้าคือ

$$\frac{J_t}{J_r} = \frac{2n_i}{x_d} \left[\frac{L_n}{N_a} + \frac{L_p}{N_d} \right] \exp(qV_a / 2kT) \quad (2.75)$$

ในสารกึ่งตัวนำที่มีข้อบกพร่องหรือตำหนิในผลึกน้อย ค่าความยาวแพร่ซึมจะยิ่งมากขึ้น ยิ่งผลให้ J_t ยิ่งเด่นกว่า J_r ในกรณีไดโอดหัวต่อด้านเดียวที่มี $L_n = 60$ ไมโครเมตร, $X_d = 0.25$ ไมโครเมตร, $N_a = 10^{16}$ ต่อตารางเซนติเมตร และ J_t จะมีค่ามากกว่า J_r เมื่อ V_a มากกว่า 0.375 โวลต์

ภายใต้การไบอัสกลับทาง ตัวเศษของสมการที่ (2.72) จะมีค่าเป็น $-n_i^2$ ยิ่งผลให้ U มีค่าเป็นลบ แสดงว่ามีการเกิดพาหะสุทธิ (net generation) ขึ้นในบริเวณประจุก้าง บริเวณความกว้าง x_i ซึ่งมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายในบริเวณประจุก้าง x_d เท่านั้นที่จะมีการเกิดพาหะสุทธิอย่างมีประสิทธิภาพและต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข $p = n \ll n_i$ ซึ่งจะทำให้ U ของสมการที่ (2.72) กลายเป็น

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

แทนค่า U ลงในสมการที่ (2.73) จะได้ว่า

$$J_g = \frac{qn_i x_i}{2\tau_0} \quad (2.76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยประมาณว่าศูนย์กลางการเกิด-การรวมตัวจะอยู่ที่บริเวณ E_i ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับรอยต่อ $p^+ - n$ บริเวณประจุค้างจะอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ความกว้างของบริเวณประจุค้าง x_d และบริเวณ x_i ซึ่งจะมีอัตราการเกิดพาหะสูงสุด จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

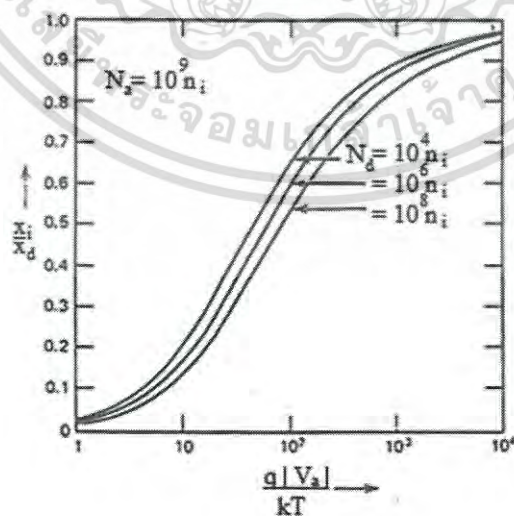
$$x_d = \left[\frac{2 \epsilon_s}{q N_d} (\phi_i - V_a) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[\frac{2 \epsilon_s kT}{q^2 N_d} \left(\ln \left(\frac{N_d N_a}{n_i^2} \right) - \frac{q V_a}{kT} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.77)$$

และ

$$x_i = \left(\frac{2 \epsilon_s kT}{q^2 N_a} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) - \frac{q V_a}{kT} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\ln \frac{N_d}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.78)$$

ซึ่ง V_a คือแรงดันไบอัส ($V_a < 0$ ในกรณีไบอัสย้อนกลับ) ทั้ง x_d และ x_i จะขึ้นกับรากที่สองของแรงดันไบอัสย้อนกลับ ความแตกต่างระหว่าง x_d และ x_i จะมีค่าน้อยลง เมื่อแรงดันย้อนกลับมีค่ามาก รูปที่ 2.21 แสดงอัตราส่วนของ x_i/x_d ที่เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับ ที่ความเข้มข้นเจือผู้ให้ค่าต่าง ๆ ของรอยต่อแบบชั้นด้านเดียว $p^+ - n$



รูปที่ 2.31 แสดงอัตราส่วนของ x_i/x_d เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความหนาแน่น

ของสารเจือของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆ ของรอยต่อ $p^+ - n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 แบบจำลองสำหรับการรวมตัวกันของพาหะในรอยต่อวิวิธพันธุ์ [13-15,24-25,30-32]

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า มักเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิดังตัวอย่างในรูปที่ 2.29 แสดงว่ากระบวนการนำกระแสขึ้นกับกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน นอกจากนั้นกระบวนการนำกระแส ยังเกี่ยวข้องกับกลไกการฉีดกระแสสูง รวมทั้งการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะและสถานะผิวรอยต่อ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสภายใต้การไบอัสตรงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.79)$$

เมื่อ

$$J_0 = J_{00} \exp\left(\frac{-E_a}{nkT}\right) \quad (2.80)$$

โดยที่ V คือ แรงดันไบอัสตรง

n คือ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด

J_0 คือ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

E_a คือ พลังงานกระตุ้น

k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ $= 1.38 \times 10^{-23}$ จูลต่อเคลวิน

J_{00} คือ พจน์แฟกเตอร์หน้า (prefactor)

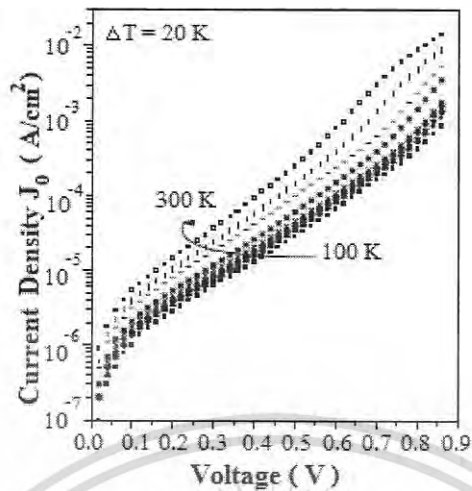
ซึ่ง J_{00} จะสัมพันธ์กับการโค้งงอของแถบพลังงาน (V_b) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนี้

$$J_{00} = qS_p N_v \left[\frac{\pi q V_b E_{00}}{kT \cosh(E_{00}/kT)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{-qV_n}{kT} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \right] \quad (2.81)$$

โดยที่

$$V_b = \phi_b^p - V - V_n \quad (2.82)$$

เมื่อ S_p คือความเร็วในการรวมตัว (recombination velocity) สำหรับโฮล, N_v ความหนาแน่นยังผลของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ (ϕ_b^p) คือค่าแฟกต์ยกขวางกั้นโฮลที่ปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อตรงแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะเฉพาะ J-V ของสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se_2 ที่แปรตามอุณหภูมิ

ค่า J_{00} นี้จะขึ้นกับกลไกการนำกระแสในรอยต่อวิวิธพันธุ์ ลักษณะเด่นของกระบวนการการนำกระแส เนื่องจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ (โดยไม่คิดกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่าน กำแพงศักย์) คือแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของกักตัก ประจุและความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น และชนิดพี และ $\ln J_0$ จะแปรผกผันกับ อุณหภูมิ ($\ln J_0 \propto T^{-1}$)

2.14.1 กลไกการรวมตัวของพาหะที่บริเวณประจุค้างและที่บริเวณผิวรอยต่อ

ชอคเคิลีย์-รีด-ฮอลล์ (Shockley-Read-Hall) ได้อธิบายการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะโดยผ่านกักตักประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยวซึ่งปรากฏอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมของสารเจือน้อย

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

การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณผิวรอยต่อจะเป็นกลไกที่สำคัญของการนำกระแสของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe เนื่องจากความต่างกันของโครงสร้างผลึกที่บริเวณผิวรอยต่อมีค่าสูงดังนั้นความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อนั้นจะขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ฉีดเข้าไปที่บริเวณรอยต่อ

สำหรับกรณีรอยต่อแบบไม่สมมาตร (เช่น $p-n^+$) ปริมาณ $N_d > N_a$ กระแสของการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวรอยต่อจะเด่น แล้วแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

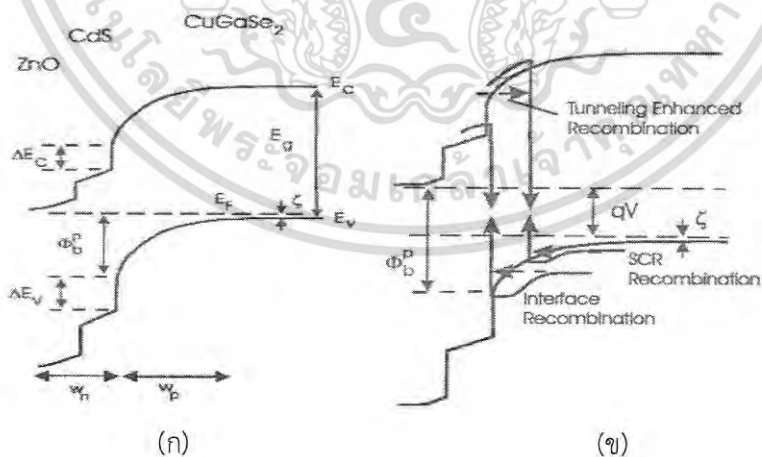
จะขึ้นอยู่กับ $\epsilon_p N_A / \epsilon_n N_D$ ซึ่ง N_D และ N_A คือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ส่วนค่า ϵ_n และ ϵ_p คือค่าไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพีตามลำดับ

2.14.2 กลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะ

สำหรับการนำกระแสที่มาจากกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$J = J_0(T) \exp(AV) \quad (2.83)$$

โดยที่ A คือ ความชันของกราฟระหว่าง $\ln J$ กับ V ซึ่งค่าของ A ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและเรียกว่า แฟกเตอร์แรงดัน (voltage factor) นอกจากนั้น $\ln J_0$ จะแปรตามอุณหภูมิ (ซึ่งต่างกับกรณีการนำกระแสที่เกิดจากกลไกการปลดปล่อยพาหะด้วยความร้อน ซึ่ง $\ln J_0$ ซึ่งจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ) ในที่นี้ไม่คิดถึงการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านระหว่างแถบพลังงาน (band to band tunneling) ที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จากแนวความคิดของรอยต่อขอตติ์ การโค้งของแถบพลังงาน โดยเฉพาะการโค้งของแถบวาเลนซ์จะทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ขวางกั้นโฮลก่อนที่จะไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ถ้ากับดักประจุมีหลายระดับโฮลจะขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (multi tunneling step) โดยผ่านแต่ละกับดักประจุอย่างต่อเนื่องกัน จนกระทั่งเคลื่อนที่ไปถึงสถานะผิวรอยต่อ ส่งผลให้ J_0 จะขึ้นกับอุณหภูมิบ้างเล็กน้อย



รูปที่ 2.33 แสดงกลไกผลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะ

ก. รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

ข. รอยต่อไม่อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึกที่ปรากฏอยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะหรือบริเวณผิวรอยต่อนั้นว่าเป็นแบบจำลองใหม่ ในการอธิบายการนำกระแสผ่านรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuInGaSe₂ และของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe การรวมตัวของพาหะอาจเกิดขึ้นในเนื้อสารชนิดพี หรือที่บริเวณผิวรอยต่อ ความหนาแน่นของกระแสภายใต้แรงดันไบอัสตรงจะแสดงได้ดังสมการ (2.84) ซึ่งพลังงานกระตุ้นสามารถจะเขียนได้ดังนี้

$$n \ln(J_0) = \frac{-E_a}{kT} + n \ln(J_{00}) \quad (2.84)$$

พลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $n \ln J_0$ กับ $1/T$ พลังงานกระตุ้น E_a นี้จะสอดคล้องกับความสูงของกำแพงศักย์กั้นขวางโฮลในกรณีที่เกิดกลไกการนำกระแสเกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะแล้วรวมตัวกันที่บริเวณผิวรอยต่อ แต่สำหรับกรณีกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะ แล้วรวมตัวกันในเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสง พลังงานกระตุ้น E_a นี้จะสอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน (E_g) ของตัวดูดกลืนแสง สำหรับการเคลื่อนที่ของโฮลจากเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสงชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อส่งผลให้แพกเตอร์อุคมคติของไดโอดขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้คือ

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.85)$$

โดย E_{00} คือ ลักษณะเฉพาะของพลังงานการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (characteristic tunneling energy) ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบุถึงกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ว่ามีส่วนช่วยเสริมการรวมตัวของพาหะมากน้อยแค่ไหน นิยาม E_{00} คือ

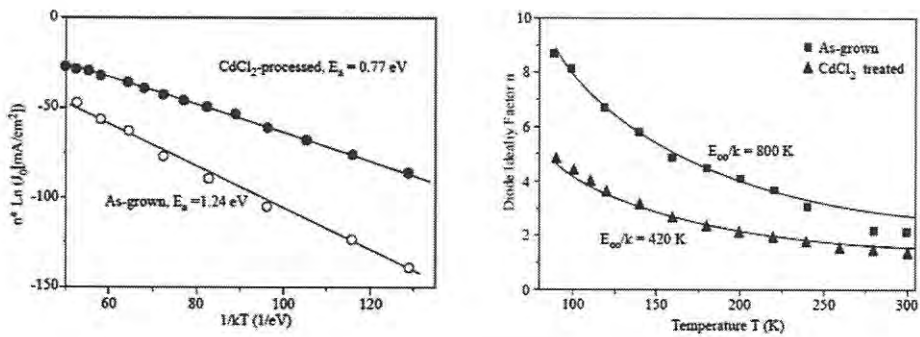
$$E_{00} = \left(\frac{q\hbar}{2}\right) \left[\frac{N_A}{m^* \epsilon_s}\right]^{1/2} \quad (2.86)$$

เมื่อ N_A คือ ความหนาแน่นสุทธิของอะตอมผู้รับ และ ϵ_s คือ สถานะยอมของสารกึ่งตัวนำ ถ้าการรวมตัวของพาหะผ่านกับดักประจุในเนื้อสารของตัวดูดกลืนแสง แพกเตอร์อุคมคติของไดโอดที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะแสดงดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T}{T^*} - \frac{E_{00}^2}{3k^2 T^2}\right) \quad (2.87)$$

ซึ่ง kT^* คือ ลักษณะเฉพาะของกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 แสดงการเปรียบเทียบของค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ J_0 และค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (n) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ผ่านและไม่ผ่านการแอนนีสด้วย CdCl_2

2.15 อิทธิพลของการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร [12-15,23-25,28,31]

อัตราการรวมตัวของพาหะ (R) ของกลไกการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดจากการรวมตัวของพาหะ สามารถเขียนได้ถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$R = \frac{np - n_i^2}{\gamma_p(n + n^*) + \gamma_n(p + p^*)} \tag{2.88}$$

เมื่อ
และ

$$n^* = N_C \exp[-(E_C - E_T)/kT]$$

$$p^* = N_V \exp[-(E_T - E_V)/kT]$$

ซึ่ง N_C และ N_V คือ ความหนาแน่นยังผลของสถานะของแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ, E_T คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุ, n และ p คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ, n_i คือ ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก แล้วความน่าจะเป็นหรือภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอน หรือโฮล (electron/hole cross section: $\gamma_{n/p}$) จะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์

$$\gamma_{n/p} = 1/[s_{n/p}(1 + \Gamma)] \tag{2.89}$$

หรือ

$$\gamma_{n/p} = \frac{\tau_{n/p}}{1 + \Gamma}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $S_{n/p}$ คือ ความเร็วในการรวมตัวที่บริเวณผิวรอยต่อของอิเล็กตรอน หรือโฮล, $\tau_{n/p}$ คือ ค่าชีวิตของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ส่วน Γ คือ แฟกเตอร์แก้ (correction factor) ของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะที่เนื้อสาร จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\Gamma = 2(3\pi)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left(\frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left[\left(\frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left(\frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right] \quad (2.90)$$

การโค้งงอของแถบพลังงาน สามารถแสดงได้ด้วยสมการพาราโบลาดังนี้คือ

$$V_b(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (W-x)^2 = \frac{\epsilon_s}{2qN_A} |F(x)|^2 \quad (2.91)$$

เมื่อ $F(x)$ คือ สนามไฟฟ้าท้องถิ่น (local electrical field) ที่ตำแหน่งกับดักประจุ

W คือ ความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะที่อยู่ในเนื้อสารของตัวดักกลืนแสง

จากแนวความคิดของ วอลเตอร์ และผู้ร่วมงาน การกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลของศูนย์กลางการรวมตัวจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$dN_T(\eta) = (kT^*)^{-1} \exp\left(\frac{-\eta}{kT^*}\right) d\eta \quad (2.92)$$

เมื่อ kT^* คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของการกระจายตัวของกับดักประจุ และ $\eta = E_v - \frac{E_T}{\eta}$ หรือ

$$\eta = E_T - E_c$$

โดยที่ความหนาแน่นของกับดักประจุจะมีค่าสูงสุด เมื่ออยู่ชิดกับขอบของแถบวาเลนซ์ หรือชิดกับขอบของแถบนำ จากการอินทิเกรตสมการ (2.87) ร่วมกับสมการ (2.92) จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดักกลืนแสงดังนี้คือ

$$J = J_{00} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.93)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง J_{00} จะมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ส่วนแฟกเตอร์อุทกคติของไดโอด (n) จะมีค่าดังนี้

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_{00}^2}{3(kT)^2} + \frac{T}{T^*} \right) \quad (2.94)$$

จากสมการที่ (2.94) นี้ใช้แสดงค่าแฟกเตอร์อุทกคติของไดโอด (n) ของกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดูดกลืนแสงที่มีกับตัวกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล พิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดกล่าวคือ $T^* \rightarrow \infty$ กลไกการนำกระแสจะกลายเป็นการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัวของพาหะโดยผ่านกับตัวกระจายระดับพลังงานเล็ก ซึ่งมีระดับพลังงานอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน แต่ถ้ากรณี $E_{00} \rightarrow 0$ จะได้ว่า $\frac{1}{n} = (1 + \frac{T}{T^*})/2$ ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการรวมตัวของพาหะตามทฤษฎีของ ซอกค์เลย์-รีด-ฮอลล์ โดยผ่านกับตัวกระจายที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งหมายความว่าปรากฏการณ์การชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะไม่มีส่วนร่วมในการนำกระแส นอกจากนั้นยังได้ว่าภายใต้การฉายแสงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์ แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) สามารถจะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$V_{oc} \approx \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) = \frac{E_a}{q} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{sc}}\right) \quad (2.95)$$

เมื่อ J_{sc} คือ ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ถ้าประมาณว่าทั้ง n , J_{sc} และ J_{00} ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง V_{oc} และ T ควรจะเป็นเส้นตรงโดยมีความชันคือ $-\frac{nk}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{sc}}\right)$ และจุดตัดแกน V_{oc} (เมื่อ $T = 0$ เคลวิน) คือค่า E_a/q ในกรณีของการรวมตัวกันของพาหะโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อโดยไม่มีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้องและความสูงของกำแพงศักย์ยังขึ้นกับความแรงของสนามไฟฟ้าจะได้ว่า $E_a = \phi_b^p$ ซึ่ง ϕ_b^p ก็คือ ϕ_b^p นั่นเองเมื่อ ϕ_b^p คือ กำแพงศักย์ของแถบพลังงานแบนราบ (flat band barrier) ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาค่าช่องว่างพลังงานของตัวดูดกลืนแสงได้จากการเขียนกราฟระหว่าง V_{oc} กับ T ซึ่ง V_{oc} นี้จะต้องเป็นไปตามกลไกการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะของทฤษฎี ซอกค์เลย์-รีด-ฮอลล์

อย่างไรก็ตามเมื่อมีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้อง แฟกเตอร์อุทกคติของไดโอดจะขึ้นกับอุณหภูมิ ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{oc} กับ T ในสมการ (2.95) ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องใช้สมการ (2.84) ในการหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน

2.16.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม [11-15,17-18,20-25,31,35,41]

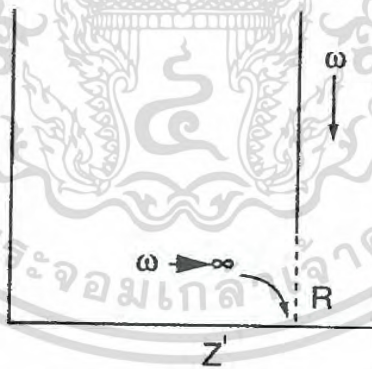
มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกัน อิมพีแดนซ์ลัพท์จะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน (Z_R) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Z_C) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.96)$$

อย่างไรก็ตามค่า Z_C จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นจำเป็นต้องเขียนค่าของ Z_C ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่ $j = \sqrt{-1}$ ดังนั้น $Z_C = 1/j\omega C = -j/\omega C$ และ $Z_R = R_S$ แล้วจะได้ว่า

$$Z_{RC} = R_S - j/\omega C \quad (2.97)$$

โดยที่ R_S เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ส่วน $1/\omega C$ เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เมื่อความถี่เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี C มีค่าใหญ่มาก แล้วจะได้ว่า Z_{RC} เข้าสู่อิมพีแดนซ์ R_S จากกราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน Z' จะเป็นค่าของ Z_R ดังรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.35 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

2.16.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

ในกรณี Z_R กับ Z_C ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.33 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

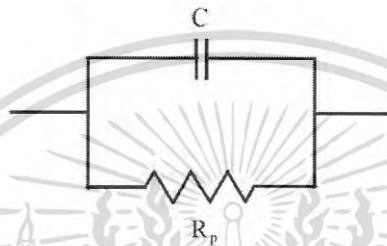
$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.98)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีนี้ให้ $Z_R = R_p$ ดังรูปที่ 2.33 ดังนั้นสมการ (2.98) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C \quad (2.99)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.100)$$



รูปที่ 2.36 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกัน จำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต $1 - j\omega R_p C$ คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการ (2.100) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_{RC}} &= \frac{(j\omega R_p C + 1)(j\omega R_p C - 1)}{R_p(j\omega R_p C - 1)} \\ &= \left[\frac{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}{R_p(j\omega R_p C - 1)} \right] \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$Z_{RC} = \left[\frac{j\omega R_p^2 C - R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right] \quad (2.101)$$

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

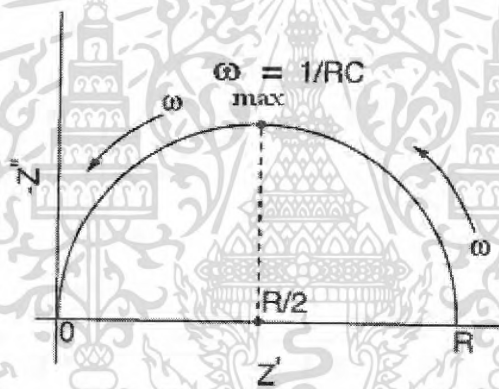
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่
$$Z' = \frac{R_P}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} = \frac{R_P}{(\omega\tau)^2 + 1} \quad (2.102)$$

และ
$$Z'' = \frac{\omega R_P^2 C}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} = R_P \left[\frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.103)$$

เมื่อ $\tau = R_P C =$ ค่าคงตัวเวลา (time constant)

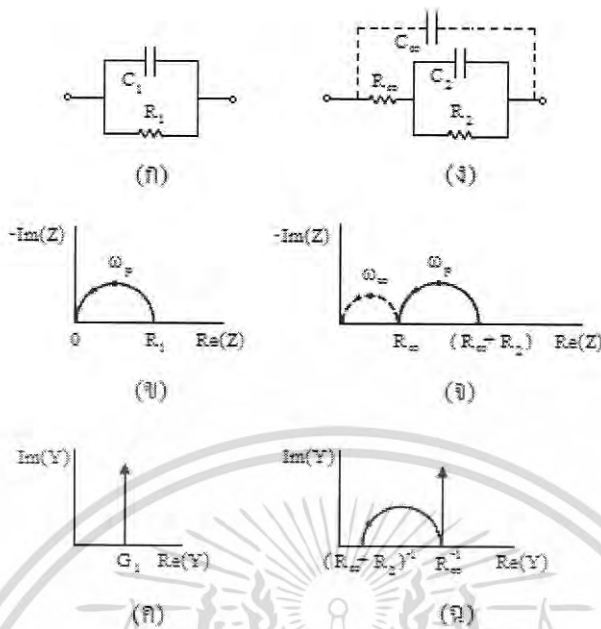
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ Z'' จะเรียกว่า กราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์ สเปกโทรสโกปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.38 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) และ แอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ)

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance : C_{geo}) ซึ่งก็คือ C_{∞} หรือ C_1 ในรูปที่ 2.38 ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance: R_b) ตัวอย่าง ซึ่งก็คือ R_{∞} หรือ R_1 แล้วค่าคงตัวเวลา $\tau = R_{\infty}C_{\infty} = R_1C_1$ ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก (τ_D) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม (ω) ที่ทำให้ Z'' มีค่าสูงสุด คือ ω_p และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.38(ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข $\omega_p \tau_D = 1$ โดยทั่วไป $\tau_D < 10^{-7}$ วินาที ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด (ω_{max}) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max} \tau_D \leq 1$ มักจะไม่ปรากฏค่า Z'' ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว τ_D จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ(arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max} \tau_D \geq 1$ แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี กล่าวคือ กราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน Z'

นอกจากกรณีนี้ที่ $R_1 = R_{\infty}$ และ $C_1 = C_{\infty}$ ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้ $R_1 = R_R$ และ $C_1 = C_R$ เมื่อ R_R คือความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน C_R คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาริเซชัน (polarization region) ในสารละลาย ที่อยู่ติดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.35(ง) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้กำหนดให้ $R_2 = R_R$ และ $C_2 = C_R$ ส่วนรูปที่ 2.23(จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงตัว เวลาคือ $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$ และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก R_∞ และ C_∞ จะแสดงจุดไข่วางรูปที่ 2.38(จ) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-\text{Im}(Z)$ กับ $\text{Re}(Z)$ มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Im}(Z)$ กับ $\text{Re}(Z)$ เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแดรนต์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น $Z^* = Z' - jZ''$ และเขียน $\text{Im}(Z^*)$ แทน $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรดังรูปที่ 2.38(ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัพท์คือผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน (G_1) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (ωC_1) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.104)$$

กราฟของสมการที่ (2.104) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.38(ค) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรรูปที่ 2.38(ง) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{[1 + j\omega R_2 C_2]}{[(R_2 + R_\infty) + j\omega C_2 R_2 R_\infty]} \quad (2.105)$$

ซึ่งกราฟของสมการ (2.105) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.38(ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของรูปที่ 2.38(ข), (ค), (จ) และ (ฉ) ไม่แสดงตัวแปรค่าความถี่เอาไว้ ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมาคือแกน $\log f$ เพื่อให้เป็น 3 มิติ

ในกรณีทั่วไปทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นกับ C และ R ซึ่งทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นอยู่กับความถี่ และพบว่า Z' กับ Z'' มีความสัมพันธ์ต่อกันดังนี้คือ

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.106)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.107)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ $R/2$ ดังปรากฏในรูปที่ 2.38 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม (R_S)

ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน Z' จะอยู่ที่ 0 และ R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16.3 กราฟของโบด (Bode plot)

อิมพีแดนซ์ $Z = Z' + jZ''$ สามารถจะเขียนอยู่ในแบบพิกัดตั้งฉาก (rectangular coordinate) และพิกัดเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.29 ดังนี้คือ

$$\text{Re}(Z) \equiv Z' = |Z| \cos \phi$$

และ

$$\text{Im}(Z) \equiv Z'' = |Z| \sin \phi$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Z''}{Z'} \right) \quad (2.108)$$

โดยที่โมดูลัสคือ

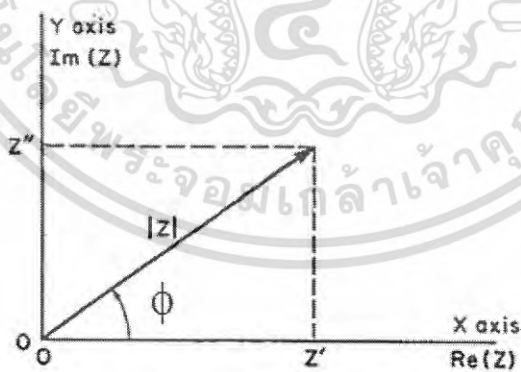
$$|Z| = \left[(Z')^2 + (Z'')^2 \right]^{1/2} \quad (2.109)$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

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

ดังนั้น

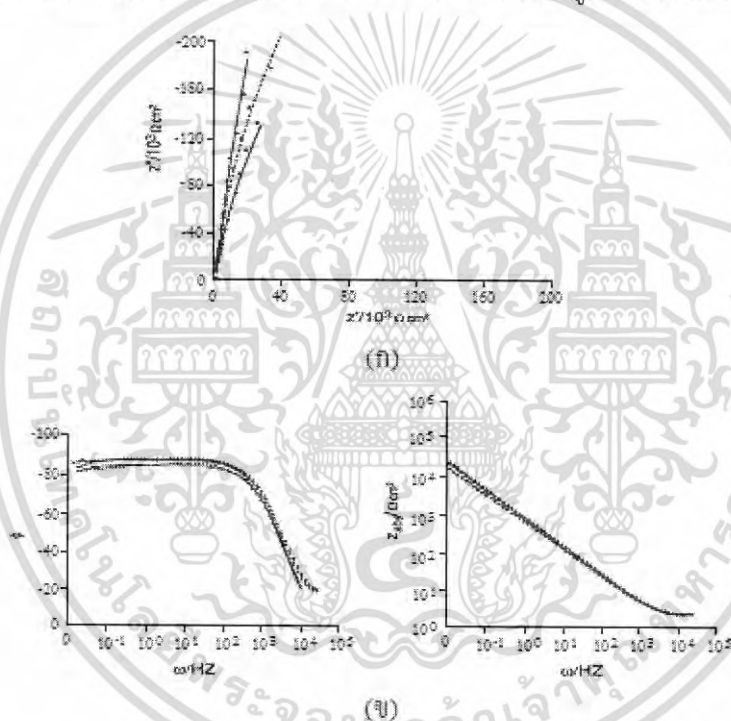
$$Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.110)$$



รูปที่ 2.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว มุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ Z' และ Z'' จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้งานในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟของโบดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $|z|$ กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่ โดยแกนความถี่จะเป็นสเกลลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบดคือ น้ำหนัก(weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของไนควิสต์ ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ความถี่เชิงมุม $\omega \rightarrow 0$ แล้วมุมเฟส $\phi = -90$ องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะมีแนวโน้มไปจากมุม -90 องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอีลิเมนต์เฟสคงตัว (constant phase element: CPE) ตัวอย่างของกราฟโบดสำหรับอิมพีแดนซ์(Z) และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.29 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่นความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.40 แสดงกราฟไนควิสต์ (ก) และกราฟของโบด (ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

ค่าอิมพีแดนซ์ของ CPE จะนิยามโดยค่าของ P และ n เมื่อ P คือ ค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ส่วน n เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วยและมีค่าอยู่ระหว่าง $0 \leq n \leq 1$ แต่โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.99 จำนวนจริงของ $Z(\text{CPE})$ จะเกี่ยวข้องกับความต้านทาน และแปรตาม ω^{-n} ส่วนจำนวนจินตภาพจะเกี่ยวกับค่าความจุไฟฟ้า และแปรตาม ω^{-n} ด้วยเหมือนกัน ซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z(\text{CPE}) = \frac{1}{P(i\omega)^n} \quad (2.111)$$

ส่วนความจุสองชั้น (double-layer capacitance: C_{dl}) เนื่องจากบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรดจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{dl} = \sqrt[n]{\frac{P}{R_s(n-1)}} \quad (2.112)$$

พารามิเตอร์ P จะสัมพันธ์กับมุมเฟส ϕ ดังนี้คือ $\phi = n\left(\frac{\pi}{2}\right)$ ถ้ามุมเฟส ϕ เข้าใกล้ 1 ก็จะประพฤติตัวเป็นตัวเก็บประจุสมบูรณ์โดยที่มุมเฟสมีหน่วยเป็นเรเดียน

2.1.6.4 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีกับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ [12,28,33-34]

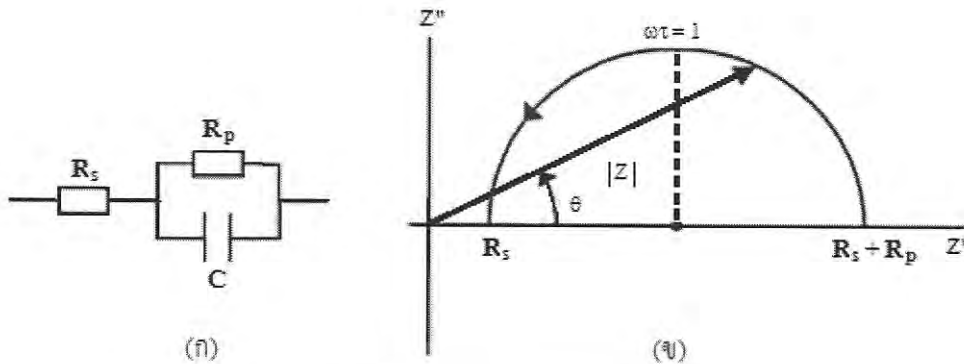
พารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ความจุของรอยต่อความต้านทานชั้นพี และความต้านทานอนุกรมสามารถหาคำนวณได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ขณะที่ทำการวัดจะต้องป้อนแรงดันไฟสลับขนาดเล็ก (small ac signal) แล้วทำการบันทึกว่าค่ากระแสสลับ จากนั้นอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} Z &= \frac{V \sin \omega t}{I \sin (\omega t + \phi)} = Z' - jZ'' \\ &= \frac{1}{G} - j\left(\frac{1}{\omega C}\right) \end{aligned} \quad (2.113)$$

เมื่อ $Z' = \frac{1}{G}$ และ $Z'' = \frac{1}{\omega C}$

G คือความนำไฟฟ้า (conductance) ซึ่ง $G = \frac{1}{R}$ และ ϕ คือมุมเฟสระหว่างแรงดันไบแอสกับกระแสสลับ วงจรสมมูลแบบง่ายสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ จะแสดงดังรูปที่ 2.41 โดยที่ R_p คือความต้านทานชั้นพีหรือความต้านทานขนาน (parallel resistor), C คือ ความจุของรอยต่อและ R_s คือความต้านอนุกรมของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.41 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) และกราฟของไนควิสต์ (ข) ที่สอดคล้องกับวงจรสมมูลดังกล่าว

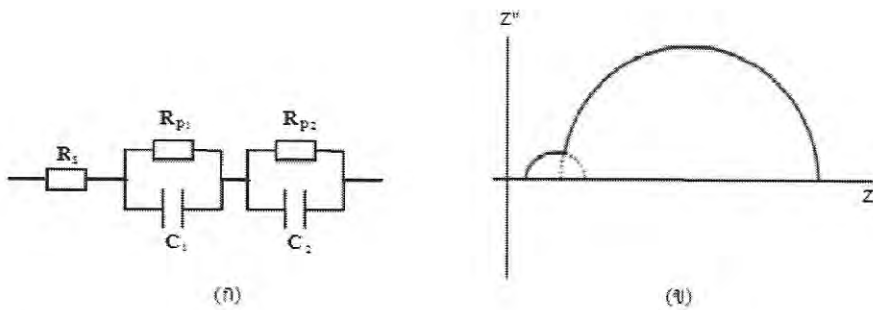
จากกราฟของไนควิสต์จะได้จุดศูนย์กลางของครึ่งวงกลมจะอยู่บนแกน Z' โดยมีรัศมีเท่ากับ $\frac{R_p}{2}$ จุดตัดแกน Z' จะอยู่ที่ R_s และ $R_s + R_p$ ส่วน Z'' จะมีค่าสูงสุดเมื่อ

$$Z'' = R_p = \frac{1}{\omega_{\max} C} \quad (2.114)$$

ค่าความจุ C สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.114) จากวงจรสมมูลจะมีส่วนของ RC ที่ต่อขนานกัน 1 ชุด ส่งผลให้ได้รูปครึ่งวงกลมซึ่งจะมีค่าคงตัวเวลา 1 ค่า ดังสมการ

$$\omega_{\max} = \tau^{-1} = (R_p C)^{-1} \quad (2.115)$$

แบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (two diode model) ต่อกันเหมาะสำหรับการอธิบายกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ CdTe วงจรสมมูลของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.42(ก) ส่วนสเปกตรัมของอิมพีแดนซ์ที่มีค่าคงตัวเวลา 2 ค่า จะแสดงใน รูปที่ 2.42(ข) รูปครึ่งวงกลมใดเด่นกว่ากันก็ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของค่าคงตัวเวลาทั้งสองนั้น ซึ่งมีค่าคงตัวเวลาที่เด่นจะเห็นเป็นรูปครึ่งวงกลมอันเดียวอย่างชัดเจน ส่วนรูปครึ่งวงกลมอีกอันหนึ่งจะมองเห็น แต่บางครั้งจะปรากฏรูปครึ่งวงกลมที่บิดเบี้ยวยากที่แยกออกเป็นครึ่งวงกลมซ้อนกัน 2 วง



รูปที่ 2.42 แสดงวงจรอนุกรมของแบบจำลองชนิดไดโอด 2 ตัว (ก) และกราฟของไนควิสต์ (ข)

แบบจำลองอิลีเมนต์เฟสคงตัวจะเป็นแบบจำลองชนิดที่ 3 ในการศึกษา ซึ่งจะเป็นวงจรที่มีโครงสร้างคล้ายกับวงจร RC ต่อแบบขนาน เพียงแต่เปลี่ยนจากตัวเก็บประจุสมบูร์นที่ตอบสนองต่อความถี่ปกติไปเป็นตัวเก็บประจุที่ขึ้นกับความถี่ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal frequency dependent capacitor) ซึ่งเรียกตัวเก็บประจุชนิดนี้ว่าอิลีเมนต์เฟสคงตัว พฤติกรรมตอบสนองต่อความถี่ไม่อุดมคตินี้เกิดจากเนื้อสารที่ไม่สม่ำเสมอ เช่นเกรนและขอบของเกรนเป็นต้น จุดศูนย์กลางของครึ่งวงกลมที่ถูกกดให้อยู่ต่ำกว่าแกน Z' (ดังรูปที่ 2.43(ข)) จะมีการแจกแจงบริเวณค่าเฉลี่ย $\tau_{\max} = \omega_{\max}^{-1}$ ซึ่งอิมพีแดนซ์ของอิลีเมนต์เฟสคงตัวจะแสดงในสมการ(2.116) ดังนี้คือ

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

อิลีเมนต์เฟสคงตัวไม่สามารถที่จะแสดงอยู่ในรูปของ R, C หรือ L ตัวใดตัวหนึ่งได้อย่างเด่นชัดซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า n และ P ดังนั้นคือ

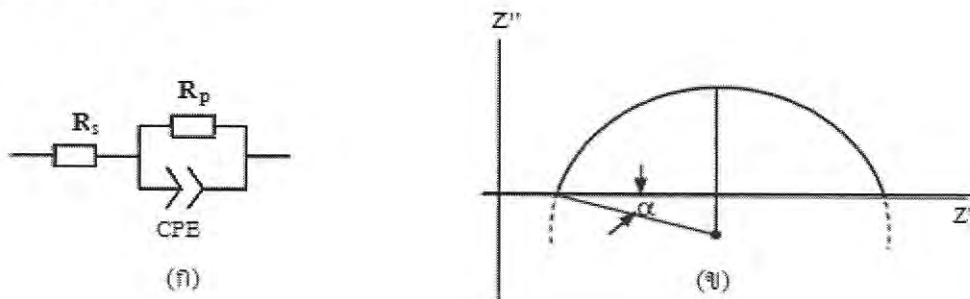
$$P = C^n (R_s^{-1} + R_p^{-1})^{1-n} \quad (2.116)$$

ถ้า $n = 1$ แล้ว $Z(\text{CPE})$ จะประพฤติเป็นตัวเก็บประจุในอุดมคติ แต่ถ้า $n = 0$ แล้ว $Z(\text{CPE})$ จะเท่ากับ $R_s^{-1} + R_p^{-1}$ ซึ่งถ้า n มีค่าแตกต่างไปจาก 1 มากๆ แสดงว่าตัวเก็บประจุมีพฤติกรรมเบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติมาก ส่วนมุมกด (depression angle: α) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ α มีหน่วยเป็นเรเดียน



รูปที่ 2.43 แสดงแบบจำลองอีลีเมนต์เฟสคงตัว

(ก) กราฟไนควิสต์ของแบบจำลองอีลีเมนต์

(ข) เฟสคงตัว

2.16.5 แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี [12-15,20-26,28,33-34]

แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีเกี่ยวข้องกับการวัดกระแสของสิ่งประดิษฐ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไฟสลับขนาดเล็ก ที่มีความถี่ ω ดังนั้นแอดมิตแตนซ์จึงเป็นปริมาณเชิงซ้อนซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$Y(\omega) = G(\omega) + i\omega C(\omega) \quad (2.117)$$

เมื่อ $G(\omega)$ คือความนำไฟฟ้า และ $C(\omega)$ คือความจุไฟฟ้า ทั้งค่าจำนวนจริง $G(\omega)$ และจำนวนจินตภาพ $\omega C(\omega)$ จะเกี่ยวข้องกันตามความสัมพันธ์ของ เครมเมอร์-โครนิก (Kramers-Kronig relation)

ในกรณีรอยต่อ พี-เอ็น ซึ่งคิดกรณีเฉพาะที่มีแต่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level) และระดับพลังงานของอะตอมผู้รับอยู่ในระดับเดิม ค่าความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะเกิดจากพาหะข้างมากที่สามารถตอบสนองต่อความถี่ที่วัดได้ ซึ่งการตอบสนองต่อความถี่ของพาหะข้างมากนี้ถูกจำกัดด้วยเวลาผ่อนคลายไดโอิเล็กทริกดังสมการ

$$\tau_D = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad (2.118)$$

เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้าและ ϵ คือค่าคงที่ไดโอิเล็กทริก แต่ถ้าความถี่สูงกว่าค่า $\frac{1}{\tau_D}$ แล้วพาหะข้างมากจะไม่ตอบสนองต่อความถี่และถ้าความถี่ยิ่งสูงขึ้นไปอีก สารกึ่งตัวนำนี้จะประพฤติตัวเป็นฉนวนไฟฟ้า และ C จะมีค่าลดลงจนกลายเป็นความจุของตัวเก็บประจุที่มีค่าขึ้นกับรูปทรงของสารตัวอย่างซึ่งเรียกว่า ความจุเรขาคณิต ความถี่การผ่อนคลายไดโอิเล็กทริก (dielectric relaxation frequency) ของความจุเรขาคณิตนี้ จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสารตัวอย่างได้ถ้า σ เปลี่ยนตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ อย่างไรก็ตามในสารตัวอย่างที่เป็นสารพหุพันธ์ (polycrystalline materials) พลังงานการกระตุ้น (activation energy) จะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากกลไกการเคลื่อนย้ายพาหะอิสระซึ่งถูกจำกัดโดยกำแพงศักย์ที่อยู่ภายในเกรนหรือที่บริเวณรอยต่อเกรน (grain-boundaries)

รอยต่อขอตตก็ก็เป็นรอยต่อที่ง่ายสุด ความจุของรอยต่อนี้เกิดขึ้นที่บริเวณพร่องพาหะส่วนรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe จะประมาณว่าเป็นรอยต่อ n⁺-p โดยความจุของรอยต่อนี้จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{SCR} = \frac{\epsilon_s}{W} = \left(\frac{\epsilon_s q N_a}{2V_{bi}} \right)^2 \frac{1}{\omega} \quad (2.119)$$

เมื่อ W คือความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ, N_a คือความหนาแน่นของผู้รับ, ε_s คือคงที่ไดอิเล็กทริก และ V_{bi} คือแรงดันในตัว (built-in voltage) กับดักประจุที่อยู่ในบริเวณพร่องพาหะก็มีผลต่อความจุของรอยต่อด้วยกล่าวคือกับดักประจุที่มีพลังงานเท่ากับระดับเฟอร์มิของอิเล็กตรอน (E_Fⁿ) หรือของโฮล (E_F^p) กับดักประจุนั้นจะมีการให้ประจุและมีการคายประจุ (charging and discharging) สำหรับกับดักประจุนิดเดียว (single trap) จะส่งผลทำให้ความจรวมเป็นดังนี้คือ

$$C(\omega) = C_{SCR} + \frac{C_{if} - C_{SCR}}{1 + \omega^2 \tau^{*2}} \quad (2.120)$$

เมื่อ C_{if} คือค่าความจุที่ความถี่ต่ำซึ่งจะขึ้นกับความหนาแน่นกับดักประจุ (trap density : N_T) และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_A) ส่วน τ* คือค่าคงตัวเวลา ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ N_T, N_a และ W ของบริเวณพร่องพาหะในกรณี N_T << N_a ค่าคงตัวเวลา τ* จะมีค่าเข้าใกล้ค่า τ* = τ₀ = $\frac{1}{\omega_0}$

เมื่อ ω₀ คือความถี่ของจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$\omega_0 = 2N_V v_{th} \sigma_p \exp\left(-\frac{E_T - E_V}{kT}\right) \quad (2.121)$$

โดยที่ N_V คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของโฮลในแถบพลังงานวาเลนซ์, v_{th} คือ ความเร็วของโฮลเนื่องจากพลังงานความร้อน, E_T คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุ และ σ_p คือ ความน่าจะเป็นหรือ ภาคตัดขวางของการจับโฮล (capture cross section of hole) แต่เนื่องจาก N_V และ v_{th} ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้น สมการ (2.121) จะเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.122)$$

เมื่อ $E_T = E_V = E_A$ ซึ่งก็คือขนาดของระดับพลังงานกับดักประจุเมื่อเทียบกับขอบของแถบวาเลนซ์และนิยามเรียก E_a ว่าพลังงานกระตุ้น ดังนั้นกับดักประจุจะสามารถจับประจุหรือคายประจุได้ก็ต่อเมื่อความถี่ของการวัด ω มีค่าน้อยกว่า ω_0 นั่นคือ ω_0 จะสัมพันธ์กับอัตราการคายประจุของกับดักประจุนั่นเอง ส่วน ξ_0 เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการคายโฮลออกจากกับดักประจุซึ่ง ξ_0 จะเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม ξ_0 คงยังขึ้นกับ E_a ดังความสัมพันธ์

$$\xi_0 = \xi_{00} \exp\left(\frac{E_a}{E_{00}}\right) \quad (2.123)$$

เมื่อ ξ_{00} และ E_{00} คือค่าคงที่ของกลไกการขุดอิมโงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ [28,33-34]

ในกรณีที่กับดักประจุไม่เป็นกับดักประจุชนิดเดียว แต่จะเป็นกับดักประจุชนิดที่มีระดับพลังงานจำนวนมาก การแจกแจง (distribution of trap) กับดักประจุ (N_T) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ [33-34]

$$N_T(\omega) = c(E_\omega) \frac{\omega}{kT} \frac{dC(\omega)}{d \ln \omega} = \frac{c(E) dC(\omega)}{kT d \ln \omega} \quad (2.124)$$

ฟังก์ชัน $C(E_\omega)$ จะครอบคลุมการแจกแจงความหนาแน่นของกับดักประจุ ซึ่งจะขึ้นกับตำแหน่งของระดับพลังงานของกับดักประจุ ถ้าแทนสมการ (2.123) ลงในสมการ (2.122) และเปลี่ยนตัวแปร E_a เป็น E_ω จะได้ว่า

$$E_\omega = \frac{kTE_{00}}{E_{00} - kT} \ln\left(\frac{\xi_{00} T^2}{\omega}\right) \quad (2.125)$$

ซึ่ง E_ω ของสมการที่ (2.125) จะเป็นสถานะทางพลังงานต่อเนื่อง (energetically continuous state) ส่วน E_a จะสอดคล้องกับระดับพลังงานของกับดักประจุที่เป็นสถานะพลังงานไม่ต่อเนื่อง (discrete state) โดยปกติสถานะผิวเชื่อมต่อ (interface state) มักจะมีส่วนร่วมในการจับประจุและคายประจุเสมอ ดังนั้นค่าคงที่เวลาของการจับประจุและคายประจุที่ระดับเฟอร์มิ (E_F^n) หรือ (E_F^p) จะหาได้จากความถี่ของจุดเปลี่ยนโค้ง ω_0 สำหรับสเปกตรัมของค่าความจุ $C(\omega)$ ค่าพลังงานกระตุ้นของ ω_0 จะขึ้นกับแรงดันไบอัสโดยที่แรงดันไบอัสจะเป็นตัวกำหนดระดับเฟอร์มิ (E_F^n) หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(E_f^p) เว้นเสียแต่ระดับเฟอร์มิจะถูกตรึงที่รอยต่อเนื่องจากความหนาแน่นของสถานะ พลังงานระหว่างผิวรอยต่อที่สูงมาก จากแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีที่แรงดันค่าต่างๆจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่รอยต่อที่เป็นรอยต่อที่เป็นฟังก์ชันกับพลังงานที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากสมการ (2.117) ความถี่เชิงมุม ω_D ที่สอดคล้องกับ τ_D จะแสดงได้ดังสมการ

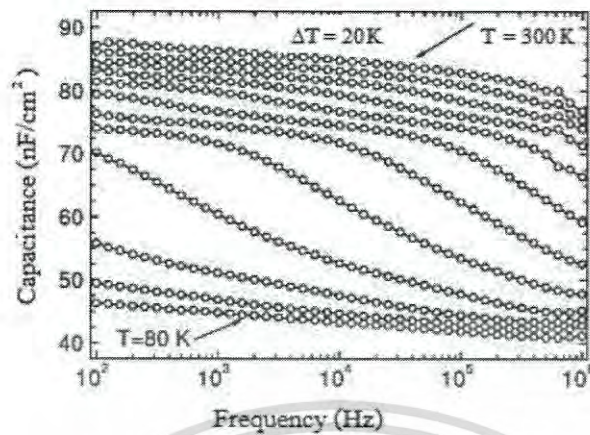
$$\omega_D = \frac{1}{\tau_D} = \frac{\sigma}{\epsilon_s}$$

พิจารณาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิตั้ง ในกรณีที่ความถี่เชิงมุม ω ที่ใช้ในการวัด ω มีค่ามากกว่า ω_D ($\omega > \omega_D$) พหุคูณจะไม่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลับได้ทัน ตัวเก็บประจุเรขาคณิตคือ

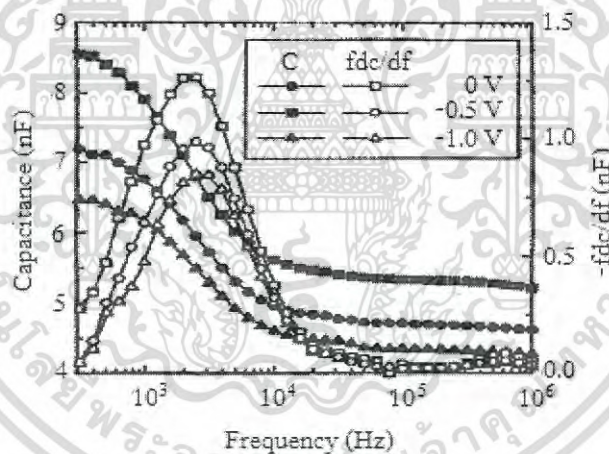
$$C_{geo} = \frac{\epsilon_s}{d} \quad (2.126)$$

เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม ความถี่เชิงมุม ω_D จะมีค่าสูงกว่า ω และถ้ามีกับดักประจุอยู่ในสารกึ่งตัวนำที่สอดคล้องกับความถี่เบี่ยงเบน ω_0 สถานการณ์ใดสถานการณ์หนึ่งต่อไปนี้จะเกิดขึ้น [28,33-34]

1. สำหรับ $\omega_0 > \omega > \omega_D$ เราจะวัดได้ค่า C_{SCR} แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200 เคลวิน ไปเป็น 300 เคลวิน การทรานซิชันครั้งที่ 2 ของความจุเกิดขึ้นโดยเปลี่ยนจาก C_{SCR} ไปเป็น C_{if} ที่ความถี่เชิงมุม $\omega = \omega_0$ ตามสมการ (2.120) การทรานซิชันของความจุครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.34 ส่วนรูปที่ 2.35 จะแสดงค่า C ที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แรงดันไบอัสกลับจะทำให้ความจุของบริเวณเขตปลอดพาหะมีค่าลดลง การทรานซิชันของค่าความจุจากช่วงความถี่ต่ำไปยังช่วงความถี่สูงจะแสดงได้ด้วยกราฟ $\frac{fdC}{df}$ ซึ่งพิกัดของกราฟ $\frac{fdC}{df}$ จะแสดงระดับพลังงานของกับดักประจุที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 2.44 แสดงสเปกตรัมของความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe_2 ความจุในช่วงอุณหภูมิต่ำ 80-100 เคลวิน คือ ค่า C_{SCR} แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 เคลวิน กับศักย์ประจุที่มีระดับพลังงาน 2 ค่าแตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความจุรวม



รูปที่ 2.45 แสดงความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/Cu(InGa)Se_2 ที่ขึ้นกับความถี่ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆรวมทั้งแสดงพีคของกราฟ $-\frac{fdC}{df}$ ที่แรงดันไบอัสค่าหนึ่ง

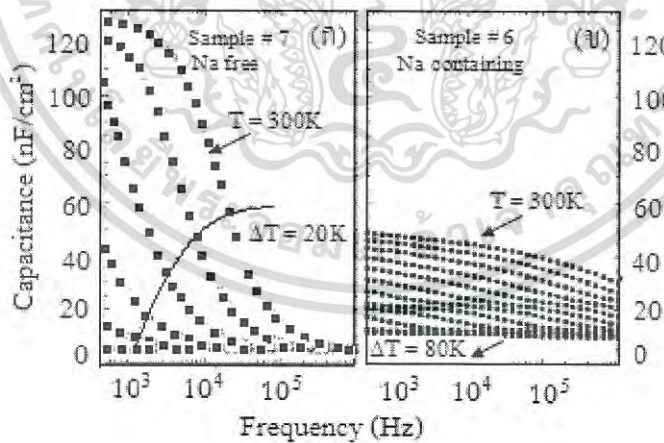
2. สำหรับ $\omega_D > \omega > \omega_0$ ในแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีจะเห็นการทรานซิชันเพียงหนึ่งเดียวซึ่งเกิดจากความจุเรซาคณิต (C_{geo}) ที่ความถี่สูงไปเป็นค่าความจุที่ความถี่ต่ำ (C_H) ซึ่งการทรานซิชันนี้เกิดขึ้นที่ $\omega = \omega_D$ พฤติกรรมชนิดนี้จะพบในสารกึ่งตัวนำที่มีสภาพนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากกลไกการเคลื่อนย้ายของพาหะอิสระข้ามรอยต่อโอห์มิกที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (back contact) เข้าสู่ย่านปลอดพาหะจะเกิดร่วมกับกลไกการจับพาหะ และการคายพาหะของกับดักประจุในบริเวณเขตปลอด

พาหะรูปที่ 2.47 แสดงการทรานซิชันเพียงหนึ่งเดียวจากความจุเรซาคณิต (C_{geo}) ซึ่งมีค่าประมาณ 6 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญู ให้นำไปเผยแพร่บนการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนฟารัดต่อตารางเซนติเมตร ไปยังค่าความจุที่อุณหภูมิสูง/ความถี่ต่ำ โดยมีค่าประมาณ 13 นาโนฟารัดต่อตารางเซนติเมตร การที่ค่าความจุเปลี่ยนแปลงอย่างมากแบบขั้นบันได เกิดจากสภาพนำไฟฟ้าที่เป็นกลางของเนื้อสาร (neutral bulk) ของสารกึ่งตัวนำ CuGaSe_2 ดังนั้นจึงเชื่อได้ว่าการทรานซิชันที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องกับเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริก (τ_D) ของเนื้อสาร ความถี่ทรานซิชันที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 16 กิโลเฮิร์ตซ์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ความหนาแน่นของโฮลอิสระสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\omega_D = \frac{1}{\tau_D} = \frac{\sigma}{\epsilon_s} = \frac{q\mu_p p}{\epsilon_s} = \frac{qN_V \mu_p}{\epsilon_s} \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (2.126)$$

ถ้าทราบค่า μ_p และ ϵ_s ก็สามารถหาค่าความหนาแน่นของโฮล (p) ได้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า C_{if} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากกับดักประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะจะถูกไอออไนซ์ซึ่งก็คือมีการจับประจุและการคายประจุในอัตราที่เพิ่มขึ้น ส่วนกับดักประจุที่อยู่นอกบริเวณเขตปลอดพาหะจะเป็นกลางทางไฟฟ้า การทรานซิชันในรูป 2.46(ก) เกิดขึ้นเพียง 1 ครั้ง เนื่องจากเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริกค่อนข้างสูงอยู่ในราว $\tau_D = 10^{-5}$ s (ที่ 300 เคลวิน) ซึ่งส่งผลให้ $\omega_D = \omega_0$ ดังนั้นจากการวัดแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีจึงไม่เห็นความถี่เบี่ยงเบน (ω_0) ของกับดักประจุนั้นคือไม่สามารถตรวจวัดระดับพลังงานของกับดักประจุได้

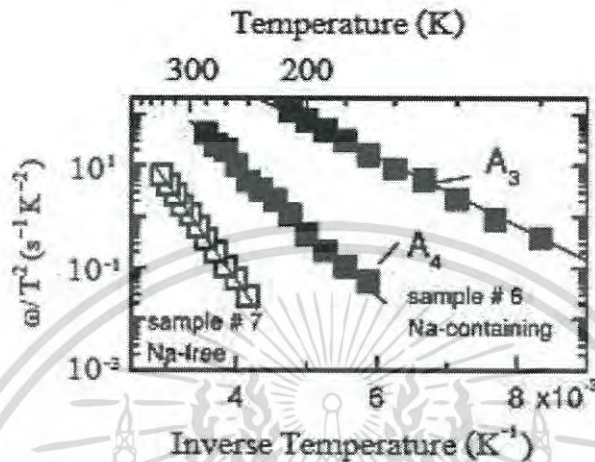


รูปที่ 2.46 แสดงสเปกตรัมความจุของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuGaSe_2 ที่ความถี่ค่าต่าง ๆ

- ก. กรณีที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na
- ข. กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Na

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.47 แสดงกราฟหาพลังงานกระตุ้นจากการวัดสเปกตรัมความจุที่ปรากฏในรูปที่ 2.46 พลังงานกระตุ้นค่า 381 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ ได้จากสารกึ่งตัวนำ CuGaSe_2 ที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอม Na ส่วน CuGaSe_2 ที่เจือด้วย Na จะมีพลังงานกระตุ้น 2 ค่า



รูปที่ 2.47 แสดงกราฟอาร์เรเนียส (Arrhenius plot) ในการหาพลังงานกระตุ้นของกับดักประจุในสารกึ่งตัวนำ CuGaSe_2

2.17 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ [12-16,20-21]

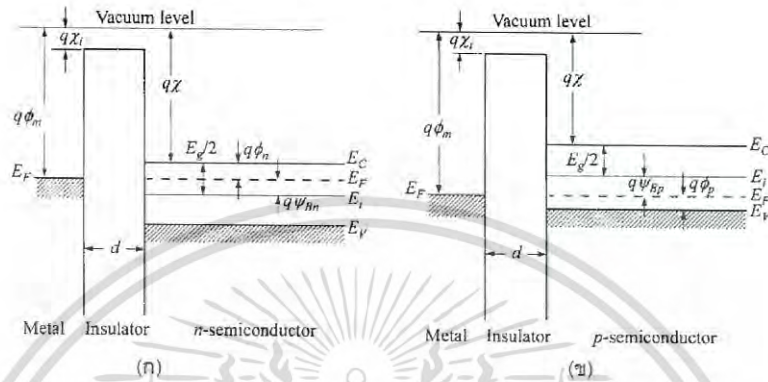
โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (MIS) ในอุดมคติของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็นและทั้งชนิดพีขณะที่ยังไม่มีการไบแอสกระแสแสดงรูปที่ 2.48 ค่าความจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติเกิดจากประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณที่เชื่อมต่อกับชั้นฉนวนภายใต้การไบแอสหรือไม่มีการไบแอส ประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำนี้จะมีปริมาณเท่ากับประจุที่ผิวหน้าของขั้วโลหะที่ตรงบริเวณเชื่อมต่อกับชั้นฉนวนแต่ชนิดของประจุจะตรงกันข้าม ซึ่งจะถือว่าไม่มีสถานะผิวเชื่อมต่อหรือประจุใดๆปรากฏในชั้นฉนวน อีกทั้งถือว่าภายใต้แรงดันไบแอสจะไม่มีพาหะใดๆไหลข้ามชั้นฉนวนได้ซึ่งจะประมาณว่าชั้นฉนวนมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์ เพื่อให้ง่ายจะประมาณได้ว่าผลต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นศูนย์จากรูปที่ 2.48 จะเขียนออกเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (2.127ก.)}$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (2.127ข.)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ X, X_i คือ อิเล็กตรอนอัฟฟินิตี้ของสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน
- ψ_{Bn}, ψ_{Bp} คือ แรงดันเฟอร์มิที่อ้างอิงจากระดับกึ่งกลางของแถบช่องว่างพลังงาน
- ϕ_n, ϕ_p คือ แรงดันเฟอร์มิที่อ้างอิงจากระดับขอบแถบพลังงาน

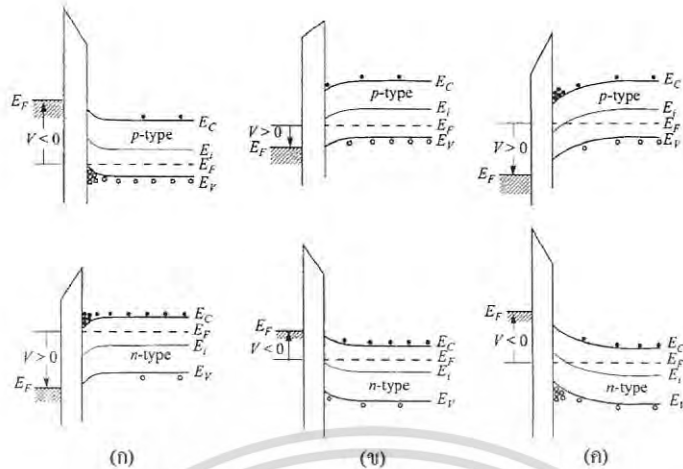


รูปที่ 2.48 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่ภาวะสมดุล ($V=0$)

- ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น
- ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุแบบ MIS พาหะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำและฉนวนจะเกิดการเปลี่ยนขึ้นโดยแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.49 โดยกรณีแรกตามรูปที่ 2.49(ก.) เมื่อทำการจ่ายแรงดันโพลบให้กับขั้วโลหะ ($V < 0$) จะทำให้พาหะข้างมากหรือโฮลจะถูกเหนี่ยวนำจนเกิดการขมขมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของด้านโลหะเลื่อนสูงขึ้นจากสภาวะสมดุล ซึ่งจะส่งผลให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอขึ้นเนื่องจากการขมขมของโฮลที่บริเวณผิวเชื่อมต่อโดยกรณีนี้จะเรียกว่าช่วงขมขมพาหะ (accumulation case) ส่วนในกรณีที่สองถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วโลหะเป็นโพลบวก ($V > 0$) จะส่งผลให้พาหะข้างน้อยหรืออิเล็กตรอนถูกเหนี่ยวนำให้มาขมขมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อแทนที่โฮลซึ่งจะมีความหนาแน่นลดลง ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโค้งตัวลง จนระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรินสิค (E_i) เข้าใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของสารกึ่งตัวนำมากขึ้นซึ่งจะเรียกว่าช่วงพร่องพาหะ (depletion case) ดังรูปที่ 2.49(ข.) และสุดท้ายถ้าทำการจ่ายแรงดันโพลบวกให้กับขั้วโลหะมากขึ้นไปอีก แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะโค้งงอลงมากขึ้น จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิชนิดอินทรินสิค (E_i) เลื่อนลงจนอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของสารกึ่งตัวนำ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนขมขมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อมากขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.49(ค.) ซึ่งจะทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น โดยบริเวณดังกล่าวนี้ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของสารเจือเลย แต่เกิดการกลับกลาย (inversion) จากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยจะเรียกกรณีนี้ว่าช่วงกลับกลาย (inversion case)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

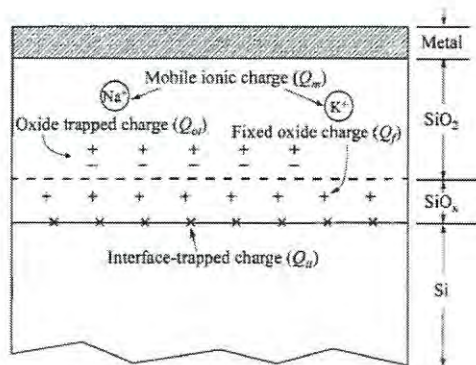


รูปที่ 2.49 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอส เพื่อให้ให้เกิด

- ก. ช่วงขุมนุพพาหะ
- ข. ช่วงพร่องพาหะ
- ค. ช่วงกลับกลาย

2.18 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิคอน [12-16,20-21]

ความเป็นตัวเก็บประจุในรอยต่อของ โลหะ-ออกไซด์-ซิลิคอน (MOS) สามารถอธิบายได้ผ่านทางแบบจำลองของกัณฑ์และพาหะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.37 ความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) และประจุค้างภายในกัณฑ์ (Q_{it}) ที่อยู่ในบริเวณผิวสัมผัสของ Si-SiO₂ โดยพาหะได้มีการย้ายที่อยู่ไปยังระดับพลังงานต่างๆ ที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นระยะเวลาสั้นๆ ประจุ Q_{it} จะถูกกำหนดจากระดับพลังงานเฟอร์มิที่ขึ้นกับการไบแอสแรงดัน กัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นอาจเกิดได้จากอะตอมซิลิคอนส่วนเกินที่ได้จากการสลายพันธะระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจน รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินและสารเจือ ประจุที่ตรึงอยู่ในชั้นออกไซด์ (Q_f) จะพบมากในบริเวณที่ใกล้กับผิวเชื่อมต่อและสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้า ประจุค้างที่เป็นผลมาจากกัณฑ์ในชั้นออกไซด์ (Q_{ox}) ถูกสร้างขึ้นมาจากการแผ่รังสีของรังสีเอ็กซ์ หรือการฉีดอิเล็กตรอนร้อนซึ่งกัณฑ์ประจุเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งบริเวณของชั้นออกไซด์



รูปที่ 2.50 แสดงพาหะที่เกิดการออกซีไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน

2.19 กับดักประจุที่ผิวเชื่อมเชื่อมต่อ [12-16,20-21]

กับดักที่ผิวเชื่อมต่อจะแสดงลักษณะถึงความเป็นผู้ให้ (donor) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นประจุบวก (+) โดยการปล่อยอิเล็กตรอนออกไป และเช่นเดียวกับลักษณะของผู้รับ (accepter) จะมีการรับเอาอิเล็กตรอนเข้ามาจนเปลี่ยนลักษณะทางไฟฟ้าจากเป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นประจุลบ (-) ฟังก์ชันการแจกแจงของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อสามารถเขียนได้ 2 กรณี ได้แก่

สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบผู้ให้

$$F_{SD}(E_t) = \left[1 - \frac{1}{1 + (1/g_D) \exp[(E_t - E_F)/kT]} \right]$$

$$= \frac{1}{1 + g_D \exp[(E_F - E_t)/(kT)]} \quad (2.128 \text{ ก.})$$

สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบผู้รับ

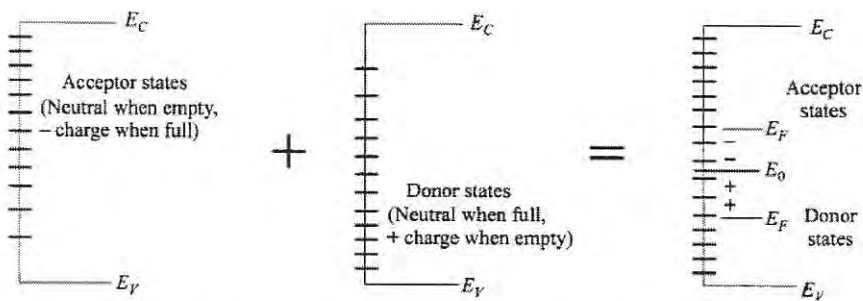
$$F_{SA}(E_t) = \frac{1}{1 + g_A \exp[(E_t - E_F)/kT]} \quad (2.128 \text{ ข.})$$

เมื่อ E_t คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

g_D คือ สภาวะข้อนสถานะของสถานะพื้นของผู้ให้

g_A คือ สภาวะข้อนสถานะของสถานะพื้นของผู้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.51 แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ

จากรูปที่ 2.51 ได้แสดงถึงแผนภาพอย่างง่ายของความหนาแน่นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อทั้งในกรณีแบบที่เป็นผู้ให้และผู้รับและระดับพลังงานที่เป็นกลางทางไฟฟ้าคือ E_0

ในการคำนวณความหนาแน่นประจุกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อภายใต้อุณหภูมิห้อง โอกาสการจับประจุของกับดักประจุจะมีค่าเป็น 0 และ 1 เมื่อระดับพลังงานของกับดักประจุอยู่สูงกว่าและอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

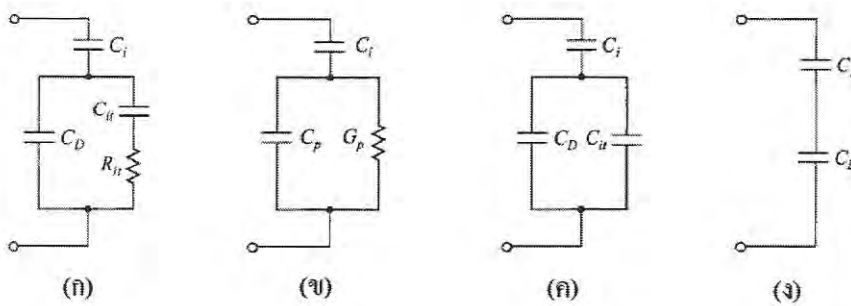
$$\begin{aligned}
 Q_{it} &= -q \int_{E_0}^{E_F} D_{it} dE && \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่สูงกว่า } E_0 \\
 &= +q \int_{E_F}^{E_0} D_{it} dE && \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่ต่ำกว่า } E_0
 \end{aligned}
 \tag{2.129}$$

ซึ่งความหนาแน่นของประจุสุทธิดังกล่าวจะมีหน่วยเป็น คุลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นมีการกระจายตัวพาดผ่านแถบช่องว่างพลังงาน โดยจะศึกษาได้จากสมการการกระจายตัวของความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

$$D_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE}
 \tag{2.130}$$

สมการที่ (2.130) นี้ใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อโดยการวัด Q_{it} ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) หรือ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (Ψ_s) ที่เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.52 ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี C_{it} และ R_{it} ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อยู่ด้วย
 ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ
 ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง

เมื่อมีการจ่ายแรงดันให้กับรอยต่อระดับพลังงานเฟอร์มิจะเลื่อนขึ้นหรือลงเมื่อเทียบกับระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุของระดับพลังงานของกับดักประจุนี้จะส่งส่งผลให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเก็บประจุกับแรงดัน (C-V) ของ MIS แตกต่างไปจากอุดมคติ วงจรสมมูลพื้นฐานนี้มีกับดักประจู่เชื่อมต่อยู่ด้วยจะแสดงดังรูปที่ 2.49ก. โดยที่ C_i และ C_D เป็นความจุของชั้นฉนวน และความจุของชั้นพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำ ส่วน C_{it} และ R_{it} คือค่าความจุและความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับกับดักประจุซึ่งกับดักประจุนี้จะเป็นฟังก์ชันกับพลังงาน ผลคูณของ C_{it} R_{it} จะนิยามว่าเป็นช่วงชีวิตของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ (τ_{it}) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของกับดักประจุ เนื่องจาก C_p และ G_p จะต่อขนานกันทั้ง C_p และ G_p จะขึ้นกับความถี่ด้วยเช่นเดียวกัน โดยที่

เมื่อ

$$C_p = C_D + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.131)$$

และ

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \omega \tau_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.132)$$

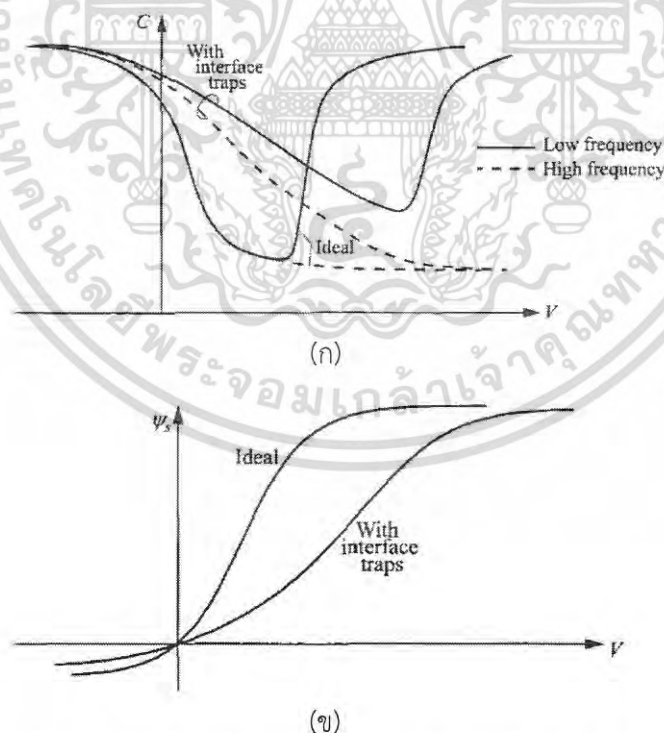
สิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือในช่วงความถี่ต่ำ R_{it} ของวงจรสมมูลในรูปที่ 2.51ก. จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ แล้ว C_D จะขนานกับ C_{it} ส่วนในช่วงความถี่สูงจะสามารถตัด C_{it} และ R_{it} ออกไปได้ หรือพิจารณาว่าเป็นวงจรเปิด ซึ่งจะบอกเป็นนัยว่ากับดักประจุนั้นไม่มีความสามารถในการตอบสนองที่ความถี่สูงๆได้ โดยสมการผลรวมของค่าความจุในตอนท้ายจะเขียนได้สองลักษณะได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่ต่ำ (C}_{LF}\text{)} \quad C_{LF} = \frac{C_i(C_D + C_{it})}{C_i + C_D + C_{it}} \quad (2.133)$$

$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่สูง (C}_{HF}\text{)} \quad C_{HF} = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad (2.134)$$

รูปที่ 2.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุ (C) กับแรงดัน (V) ที่ความถี่สูง และที่ความถี่ต่ำทั้งที่มีกับดักประจุและไม่มีกับดักประจุ กับดักประจุจะส่งผลให้กราฟ C-V ยืดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีประจุส่วนเกินที่ถูกจับอยู่ภายในกับดักประจุ ดังนั้นจะต้องใช้แรงดันที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (Ψ_s) เหมือนกับกรณีที่ไม่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า Ψ_s ในรูปที่ 2.53ข. จะยืดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Psi_s - V$ สามารถนำไปคำนวณหา D_{it} ได้ อีกทั้งยังเห็นได้ว่าเป็นกรณีที่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อจะเกิดผลต่างระหว่างค่า C ของความถี่สูงกับความถี่ต่ำที่บริเวณแรงดันก่อนเกิดเป็นชั้นกลับกลายอย่างแรง (strong inversion) ซึ่งผลต่างของ C นี้จะแปรตรงกับปริมาณของ D_{it}



รูปที่ 2.53 ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS

ข. แสดงการยืดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ Ψ_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ

วิธีการนี้มีจุดเด่นคือไม่จำเป็นต้องใช้การคำนวณในเชิงทฤษฎีที่ยุ่งยากและใช้ได้กับการเจือสารอย่างไม่สม่ำเสมอ จากสมการค่าความจุที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำในสมการที่ (2.133) และสมการที่ (2.134) จะเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} C_{it} &= \left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - C_D \\ &= \left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (2.135)$$

โดยกำหนดให้ ผลต่างของค่าความจุทางไฟฟ้า $\Delta C \equiv C_{LF} - C_{HF}$ และเมื่อใช้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ $D_{it} = C_{it} / q^2$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} D_{it} &= \frac{C_i}{q^2} \left[\left(\frac{1}{\Delta C / C_i + C_{HF} / C_i} - 1 \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF} / C_i} - 1 \right)^{-1} \right] \\ &= \frac{\Delta C}{q^2} \left[\left(1 - \frac{C_{HF} + \Delta C}{C_i} \right)^{-1} - \left(1 - \frac{C_{HF}}{C_i} \right)^{-1} \right] \end{aligned} \quad (2.136)$$

ในสมการนี้ได้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกับดักประจุนั้นแปรผันตามผลต่างของค่าความจุทางไฟฟ้า (ΔC) ถ้าสามารถหาค่าสเปกตรัมทางพลังงานของ D_{it} ได้ก็สามารถที่จะหาค่า Ψ_i ได้จากการอินทิเกรตค่าความจุไฟฟ้าทั้งที่ความถี่ต่ำหรือที่ความถี่สูงอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโตรสโคปี [12-15,20-21]

เนื่องจากอิทธิพลของตัวเก็บประจุภายในชั้นออกไซด์ส่งผลให้การศึกษาสมบัติเฉพาะของผิวเชื่อมต่อนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องด้วยค่าความจุและค่าความเหนี่ยวนำต่างก็เป็นฟังก์ชันของความถี่และแรงดันซึ่งเกี่ยวข้องกับกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ความแตกต่างของของค่าความจุที่วัดได้ในย่านความถี่ที่ต่างกัันนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อนำมาคำนวณแล้วจะทำให้มีโอกาสผิดพลาดสูงจึงเป็นการยากที่จะนำมาใช้คำนวณหาค่ากับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ แต่ผลที่ได้จากการวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากกว่า ในรูปที่ 2.53 ได้แสดงผลที่ได้จากการวัดค่าความจุและความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ 5 และ 100 กิโลเฮิร์ต พบว่าค่าความจุกระจายตัวสูงสุดอยู่เพียงแค่ 14 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพีคค่าความเหนี่ยวนำนั้นเปลี่ยนแปลงมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนในช่วงความถี่เดียวกัน

จากภาพวงจรสมมูลในรูปที่ 2.52ก. ความจุของฉนวน C_i ที่ได้จากการวัดในช่วงที่มีการชุมนุมพาหะอย่างมาก ค่าความต้านทานจินตภาพของความจุ (capacitive reactance) ของชั้นฉนวนจะถูกนำเอาไปหักออกจากค่าอิมพีแดนซ์ สุดท้ายแล้ววงจรสมมูลจะเป็น C_D ต่อขนานกันกับ R_{it} C_{it} สำหรับค่า $\frac{G_p}{\omega}$ ในสมการที่ (2.132) จะไม่มีพจน์ C_D ปรากฏอยู่นั้นคือ $\frac{G_p}{\omega}$ จะสัมพันธ์กับกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อโดยตรง การเปลี่ยนค่าแอดมิตแตนซ์ที่วัดได้ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อให้เป็นค่าคอนดักแตนซ์จะแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega C_i^2 G_{in}}{G_{in}^2 + \omega^2 (C_i + C_{in})^2} = \frac{C_{it} \omega \tau_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.137)$$

เมื่อทำการไบแอสแรงดันจะสามารถวัดค่า $\frac{G_p}{\omega}$ ที่สัมพันธ์กับความถี่ได้ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{G_p}{\omega}$ และ ω จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $\omega \tau_{it} = 1$ จุดที่ค่า $\frac{G_p}{\omega}$ สูงสุดจะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของ C_{it} ดังนั้นจากวงจรสมมูลได้มีการแก้ไขโดยการหักค่า C_i ออกไปจะได้ C_{it} และ $\tau_{it} (= R_{it} C_{it})$ เมื่อรู้ค่า C_{it} แล้วจะสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อได้มาจากการใช้ความสัมพันธ์ $D_{it} = C_{it} / q^2$ แล้วจะได้ว่า

$$D_{it} = \frac{2}{q} \left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (2.138)$$

โดยที่ $\frac{G_p}{\omega}$ จะมีหน่วยเป็นฟารัดต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมการที่ (2.138) นี้ เป็นการหาค่าความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานเดี่ยว (single trap) แต่โดยทั่วไปแล้วกับดักประจุมักมีระดับพลังงานจำนวนมากกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน (continuum of interface traps) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{q D_{it}}{2 \omega \tau_{it}} \ln(1 + \omega^2 \tau_{it}^2) \quad (2.139)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

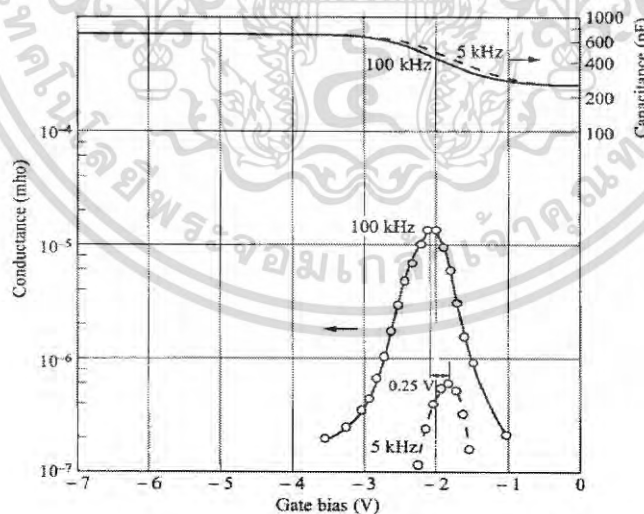
ซึ่ง $\frac{G_p}{\omega}$ จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $\omega\tau_{it}=1.98$ และจากความสัมพันธ์ $D_{it} = C_{it}/q^2$ จะได้ว่า

$$D_{it} = \frac{\left(\frac{G_p}{\omega}\right)_{\max}}{0.402q}$$

$$\approx \frac{2.5}{q} \left(\frac{G_p}{\omega}\right)_{\max} \quad (2.140)$$

และ
$$\tau_{it} = (\sigma_T v_{th} N_{C,V})^{-1} \exp\left(\frac{E_T}{kT}\right) \quad (2.141)$$

เมื่อ σ_T คือพื้นที่ภาคตัดขวางของการจับประจุของกับดักประจุมีค่าประมาณ 10^{-15} ต่อตารางเซนติเมตร ส่วน v_{th} คือความเร็วเฉลี่ยของพาหะอิสระเนื่องจากความร้อน มีค่าประมาณ 10^7 เซนติเมตรต่อวินาที และ $N_{C,V}$ คือค่าคงที่ผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบนำหรือแถบวาเลนซ์ สำหรับ E_T คือระดับพลังงานของกับดักประจุเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแล้ว τ_{it} จะมีค่าลดลง ดังนั้นความถี่ในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดัก (ω) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ $\omega\tau_{it}=1.98$ เมื่อกับดักประจุเป็นชนิดที่มีพลังงานต่อเนื่องกัน



รูปที่ 2.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.20 สายละลายที่ใช้ในการกัดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน

2.20.1 โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์

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



รูปที่ 2.55 แสดงสารโพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์

2.20.2 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 เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการทำความสะอาดบางครั้งอาจเรียกว่า แอลกอฮอล์เช็ดทำความสะอาด

2.21 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [42]

2.21.1 การสร้างสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของ p-ZnSeNWs/n-Si และการประยุกต์ใช้ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (ZnSe nanowire/Si p-n heterojunctions device construction and optoelectronic applications)

ปัจจุบัน Nano-heterojunctions มีบทบาทสำคัญด้าน nano-electronic และ nano-optoelectronic เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามการนำเส้นลวดนาโน(nanowire) มาพัฒนาเพื่อใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพนั้น นักวิจัยต้องเข้าใจโครงสร้างภายในเป็นอย่างดีเสียก่อน ภายหลังจากได้มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัฒนาโดยการสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดพีเอ็น (ZnSeNW)/silicon โดยการเคลือบ p-ZnSeNWs ลงบนฐานรองรับที่เป็น SiO₂/Si โดยกำหนดให้ Si เป็นชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ เส้นลวดนาโน (NWs) และฐานรองรับ Si ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) ทำให้เกิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ การวัดสมบัติทางไฟฟ้าบนรอยต่อวิวิธพันธุ์นั้นเผยให้เห็นถึงลักษณะของไดโอดได้อย่างยอดเยี่ยม ด้วยจุดเด่นของค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (ideality factor) ~1.95 และมีอัตราการนำกระแสสูงถึง 10⁶ และมีค่าแรงดันในการเปิด (Turn-on Voltage) ต่ำ ~0.9V นอกเหนือจากนี้ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field effect transistors , FET) สามารถสร้างได้จากรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-ZnSeNWs และมีประสิทธิภาพที่ดีมาก เมื่อเทียบกับโครงสร้างของมอสเฟต (Metal oxide semiconductor field effect transistor ,MOSFET) การที่จะทำให้อรอยต่อวิวิธพันธุ์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นนั้นเนื่องจากเส้นลวดนาโน (NW) เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีของการสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์นี้เมื่อนำไปทดสอบภายใต้การฉายแสง AM 1.5 G ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างเห็นได้ชัดจากค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้า (Energy conversion efficiency, η) ~1.8% จากผลการทดลองทำให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-ZnSeNW/n-Si เป็นสิ่งประดิษฐ์ระดับนาโนที่มีคุณภาพสูง

ในที่นี้ได้มีการพัฒนาวิธีการสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์นาโน โดยสร้างสารกึ่งตัวนำของธาตุหมู่ 2-6 เส้นลวดนาโน (nanowire) ลงบนแผ่นซิลิกอน รอยต่อวิวิธพันธุ์หมู่ 2-6 และซิลิกอน มีคุณสมบัติที่ดี เช่น มีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้าง และเป็นช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง มีคุณสมบัติของ optoelectronic ที่ดี มีสภาพคล่องพาหะสูง สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก แสดงถึงความมีศักยภาพสูงของ สิ่งประดิษฐ์ optoelectronic ที่มาจากซิลิกอน จุดเด่นโครงสร้างนาโนของธาตุหมู่ 2-6 คือ ซิงค์ซีลีไนด์ เส้นลวดนาโน (ZnSeNWs) ที่มีช่องว่างแถบพลังงาน ~2.7 eV ที่อุณหภูมิห้อง การศึกษาการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดพีโดยใช้ แอมโมเนีย (NH₃) เป็นสารเจือไนโตรเจน ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (thermal evaporation method) รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดพีเอ็น ZnSeNW/Si ถูกสร้างขึ้นโดยการเคลือบ สารกึ่งตัวนำชนิดพี ZnSeNWs ลงบนฐานรองรับ SiO₂/Si กำหนดให้ Si เป็นชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้แล้ว สิ่งประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field effect transistors , FET) และสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic ,PV) ล้วนขึ้นอยู่กับรอยต่อวิวิธพันธุ์ทั้งสิ้น และคาดว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงระดับนาโน ที่ได้จากรอยต่อวิวิธพันธุ์ ZnSeNW/Si จะสามารถประยุกต์ใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

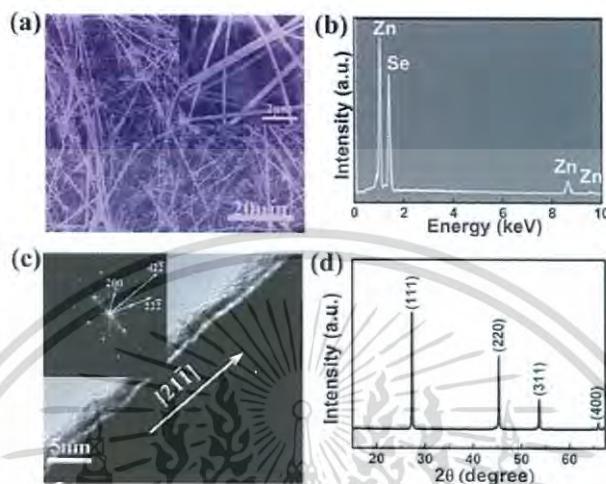
p- ZnSeNWs ถูกสังเคราะห์โดยผงซิงค์ซีลีไนด์ (ZnSe) (99.999%) ภายใต้สภาวะก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) และก๊าซไนโตรเจนเป็นสารเจือ ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (thermal evaporation method) โดยทั่วไปผง ZnSe ปริมาณ 0.3กรัม จะถูกใส่ใน

alumina boat และนำไปไว้ตรงกลางของเตา ฐานรองรับซิลิกอน ถูกเคลือบด้วย ด้วยทอง (Au) มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนา 10 nm เพื่อทำให้น้ำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ซึ่งระยะของผงซิงค์ซีลีไนด์ กับฐานรองรับซิลิกอน ห่างกัน ~ 10 cm หลังจากนั้นเมื่อความดัน 5×10^{-3} Pa ภายใต้บรรยากาศ H_2/Ar (H_2 , 5%) และ NH_3 รวมกัน ที่อัตราการไหลคงที่ 96 sccm และ 4 sccm ตามลำดับ ต่อมาที่ความดัน 360 Torr ผง ZnSe ถูกให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 1040 °C ภายในระยะเวลา 60 นาที และคงอุณหภูมิไว้เช่นนั้น 90 นาที อุณหภูมิสำหรับฐานรองรับซิลิกอน มีอุณหภูมิ 700 °C ตลอดการทดลอง ชั้นของ ZnSe ที่อยู่บนผิวหน้าของ Si จะมีลักษณะที่เป็นสีเหลือง หลังจากนั้นรอให้อุณหภูมิเย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง ลักษณะและโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง (FESEM, SIRION 200 FEG), โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD, Rigaku D/Max-rB) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง (HRTEM, JEOL JEM-2010, at 200 kV) ส่วนการวิเคราะห์ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุวัดได้โดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) ที่ทำงานร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทำให้การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีความละเอียดและได้ข้อมูลที่สมบูรณ์มากขึ้น และการวิเคราะห์โครงสร้างผิวของวัสดุด้วยเครื่องวิเคราะห์วัสดุ (XPS, KratosAXIS UltraDLD)

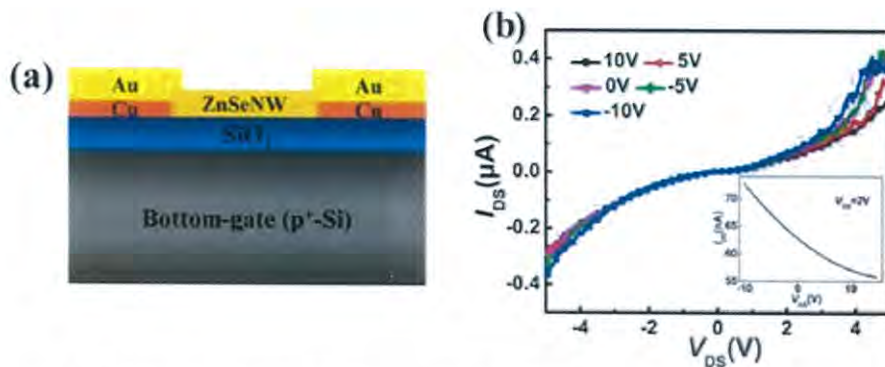
ในการวิเคราะห์ผลคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ ZnSeNWs (ที่มีการเจือสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นลงไป) bottom-gate ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ (MOSFETs) ถูกสร้างขึ้นอยู่กับ ZnSeNWs เพียงอย่างเดียว เริ่มจาก NWs ที่แพร่ลงบนฐานรองรับที่เป็น SiO_2 (300 nm)/ p^+ -Si ด้วยความหนาที่กำหนดไว้ โดยให้ Cu (4 nm)/Au (50 nm) เป็นขั้วไฟฟ้า source และ drain ความล่ำดับ แสดงให้เห็นรอยต่อโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ZnSeNWs ซึ่งถูกกำหนดไว้แล้วโดยกระบวนการสร้างลวดลายวงจรถลงบนแผ่นเวเฟอร์ (photolithography) ขั้วไฟฟ้า bottom-gate ใน MOSFETs เกิดการเสื่อมสภาพเมื่อเจือสารลงบนฐานรองรับที่เป็นซิลิกอน ในการสร้างรอยต่ออวิวิธพันธ์ n-ZnSeNW/Si กระบวนการสร้างลวดลายวงจรถลงบนแผ่นเวเฟอร์ และวิธีการทำความสะอาดผิวหน้าด้วยวิธี buffered oxide etch (BOE) solution ขั้นตอนแรกกำหนดให้ Si เป็นชั้นรับแสงใน SiO_2 (300 nm)/n-Si (สภาพต้านทางไฟฟ้า $\sim 0.02 \Omega \text{ cm}$, ความหนา $\sim 400 \mu\text{m}$) ที่ฐานรองรับ n-Si) จากนั้น p- ZnSeNWs จะแพร่ไปยัง SiO_2/Si ที่เป็นฐานรองรับ ความหนาแน่นของ NW บนฐานรองรับสามารถควบคุมได้ด้วยความดันที่ให้แก่ฐานรองรับ เส้นลวดนาโน (NWs) และฐานรองรับ Si ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) จากนั้นสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธ์ชนิดพีเอ็น ZnSeNW/Si เมื่อถูกสร้างขึ้นแล้วจะถูกเคลือบด้วย Cu (4 nm)/Au (50 nm) ลงบนขอบทั้งสองด้านเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า โดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ (Electron-Beam Evaporator System) ทำให้เกิดรอยต่อโอห์มมิกบริเวณ NWs ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ HJFETs ทำได้โดยการป้อนไฟเลี้ยง source และ drain จับที่ขั้วไฟฟ้า Cu/Au ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าถูกนำมาจ่ายให้กับฐานรองรับที่เป็น n-Si โดยใช้เครื่อง Keithley เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4200-SCS รอยต่อวิธีพินช์เซลล์แสงอาทิตย์ ค่าประสิทธิภาพจะถูกวัดและคำนวณด้วยเครื่อง Super solar simulator ซึ่งติดตั้งฟิลเตอร์ AM 1.5 และความเข้มแสงได้ถูกปรับเทียบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐาน (Reference cell) ให้มีความเข้มแสงที่ 100 mW/cm^2



รูปที่ 2.56 (a) แสดงโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง
(b) แสดงการวิเคราะห์ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของ
(c) แสดงการวิเคราะห์ของ HRTEM และ Fourier transform (FFT)
(d) แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

รูปที่ 2.56 (a) แสดงให้เห็นถึงลักษณะทั่วไปของโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่สร้างจาก n-ZnSeNWs ทำให้เห็นว่า NWs มีลักษณะเป็นเส้น มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 100-500 nm รูปที่ 2.56 (b) จากการวิเคราะห์ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุวัดได้โดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) พบว่าอัตราส่วนของ Zn:Se เท่ากับ 49:51 ซึ่งใกล้เคียงกับสัดส่วนทางเคมีของ ZnSe อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) ไม่ปรากฏพีคของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เนื่องจากมีปริมาณที่น้อยมากใน NWs เราได้มีการบันทึกผลที่คล้ายกันในการวิเคราะห์ผิววัสดุ (XPS) การวิเคราะห์ของ HRTEM และ Fourier transform (FFT) ของ ZnSeNW แสดงในรูปที่ 2.56 (c) พบว่า NWs มีโครงสร้างผลึกเดี่ยว มีระนาบที่โดดเด่นคือ [211] การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงในรูปที่ 2.56 (d) แสดงให้เห็นพีค และโครงสร้างผลึกแบบ zinc blende ของ ZnSe นั้นหมายถึงว่าสิ่งประดิษฐ์มีความบริสุทธิ์มาก



รูปที่ 2.57 (a) แสดงภาพ bottom-gate MOSFET

(b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I_{DS} - V_{GS})

เราสังเกตเห็นว่าการทำให้เป็น ZnSeNWs เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น นั้นไม่ได้ทำให้โครง และส่วนประกอบของ NWs เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากมีปริมาณไนโตรเจนที่ต่ำ การวัดสมบัติทาง ไฟฟ้าของ NWs เพื่อดูว่ามีผลกระทบต่อทำให้เป็น ZnSeNWs เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือไม่ รูปที่ 2.57 (a) แสดงภาพ bottom-gate MOSFET ที่ถูกสร้างขึ้นโดยการทำให้เป็น ZnSeNWs เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วงการไหลของ กระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อพี-เอ็น พบว่า I_{DS} และ V_{DS} มีสภาพการนำไฟฟ้าของ NW ลดลง (เพิ่มขึ้น) อย่างสม่ำเสมอ และ V_{GS} มีการเพิ่มขึ้น (ลดลง) ซึ่งสอดคล้องกับ MOSFET ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยทั่วไปแล้ว n-ZnSeNWs มีสภาพการนำไฟฟ้าประมาณ 1.05 S cm^{-1} ในทางตรงกันข้าม ZnSeNWs ที่ไม่ได้ผ่านการเจือให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีค่าน้อยมาก $3.05 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ นอกเหนือจากนี้ สภาพคล่องพาหะ (mobility, μ_n) ของโฮล และ ความเข้มข้นของโฮล (concentration, η_h) ของ ZnSeNWs ที่ผ่านการเจือให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีค่าลดลง $\sim 0.13 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ และ $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ

ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$\mu_h = g_m \frac{\ln(4h/d)L}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{\text{SiO}_2} V_{DS}} \quad (2.142)$$

$$\eta_h = \sigma / \mu_h e \quad (2.143)$$

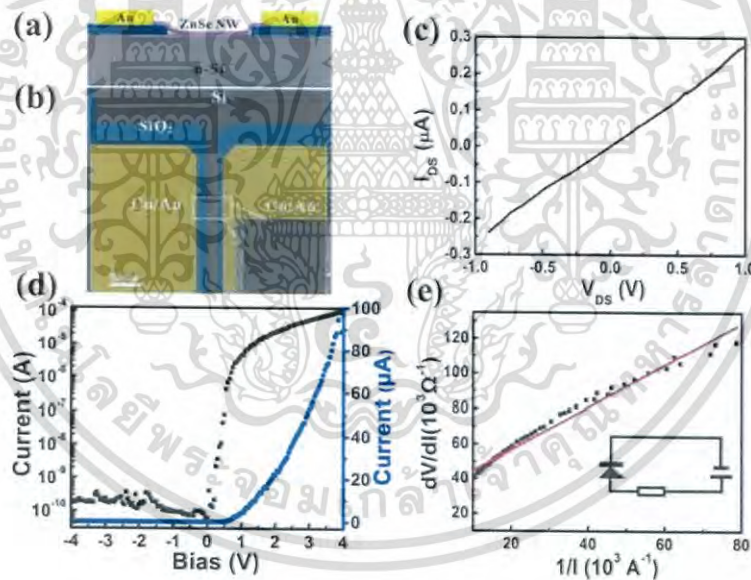
เมื่อ สภาพการนำไฟฟ้า $g_m = 0.97 \text{ nS}$ นั้นมาจากส่วนโค้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I_{DS} - V_{GS}) ในรูปที่ 2.57 (b) ตามความสัมพันธ์ $g_m = dI_{DS}/dV_{GS}$ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϵSiO_2 เป็นค่าคงที่ของ SiO_2 (3.9) L , h และ d แทน ความยาว (8 μm), ความหนา (~ 300 nm) ,มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (~ 200 nm) ของ NW ตามลำดับ สังเกตเห็นว่า p-ZnSeNW based bottom-gate MOSFET มีประสิทธิภาพที่ต่ำเนื่องจากแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage, V_{th}) อยู่ที่ 10 โวลต์

นอกจากนี้ subthreshold swing (S_{th}) แสดงให้เห็นถึงอัตราการเพิ่มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ($I_{DS}-V_{GS}$) แต่ subthreshold swing (S_{th}) น้อยจะทำให้มีการสลับเปลี่ยนกระแสไฟอย่างรวดเร็ว (on & off) ของ FET เนื่องจากเราต้องการสิ่งประดิษฐ์ที่ต้องรับสัญญาณ และแยกสัญญาณที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อยหรือมีความต่างศักย์ต่ำ ซึ่งสามารถหา subthreshold swing (S_{th}) ได้จากสมการ $S_{th} = (dV_{GS}/dI_{DS})\ln 10$

นอกจากนี้อัตราส่วนของ I_{on}/I_{off} มีค่าน้อยมาก ~ 1.2 และค่า V_{GS} อยู่ในช่วง ± 10 V คาดกันว่าชั้นความหนา และขนาดที่เล็ก มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, ϵ) ของ SiO_2 มีส่วนทำให้ประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์ต่ำลง



รูปที่ 2.58 (a) แผนภาพ ภาพตัดขวางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-ZnSeNW/n-Si

(b) มุมมองด้านบนของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-ZnSeNW/n-Si

(c) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะไม่ฉายแสง

(d) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและ semi-logarithmic

(e) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dV/dI กับ $1/I$ และรูปแบบวงจรสมมูลของไดโอด

ประกอบด้วย ไดโอดต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดพีเอ็น (ZnSeNW)/silicon ถูกสร้างขึ้นโดยการเคลือบ p-ZnSeNWs ลงบนฐานรองรับที่เป็น Si โดยกำหนดให้ Si เป็นชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงในรูปที่ 2.58 (a) โดยการควบคุมความหนาของ NW ที่บริเวณฐานรองรับ ซึ่งมีโอกาสสูงที่ NW จะสัมผัสกับ Si ทำให้เกิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ การสร้างสิ่งประดิษฐ์นี้ถูกทำขึ้นพร้อมกันนับร้อยชิ้น ด้วยกระบวนการสร้าง ลวดลายวงจรลงบนแผ่นเวเฟอร์ (photolithography) และกว่า 30 % ของชิ้นงานทั้งหมดไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจาก NWs ขาด แต่ก็มีหลายชิ้นงานที่สามารถใช้งานได้ตามปกติ แม้ว่าสิ่งประดิษฐ์นี้ จะไม่สามารถรับรองได้ 100 % ว่าจะมีประสิทธิภาพที่ดี แต่วิธีนี้ก็เป็นวิธีที่สามารถลดขั้นตอน ความซับซ้อนของการสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ NW ลงได้ และวิธีนี้ก็เหมาะกับการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต้นแบบ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ดังนั้นวิธีจึงมีศักยภาพมากพอที่จะสร้างสารกึ่งตัวนำ NW ลงบน Si รูปที่ 2.58 (b) แสดงโครงสร้างจำลองของสิ่งประดิษฐ์ ซึ่งเกิดจากรอยต่อโอห์มมิกระหว่าง Cu/Au กับ p-ZnSeNW ด้านบน และ n-Si ในส่วนกลางของ NW การออกแบบในลักษณะนี้สามารถศึกษา สมบัติทางไฟฟ้าของ ZnSeNW และการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันของรอยต่อวิวิธพันธุ์ได้ พร้อมกัน

รูปที่ 2.58 (c) แสดงให้เห็นกระแสเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันจากรูปของ ZnSeNW ในการวัดค่าระหว่างสองขั้วไฟฟ้า Cu/Au จากรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แสดงให้เห็นถึงความเป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดีของขั้วไฟฟ้า Cu/Au ด้วย NW แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อ วัดบนขั้วไฟฟ้า Cu/Au ที่มีฐานรองรับเป็น Si จะเห็นพฤติกรรมการนำกระแสได้อย่างชัดเจน จากรูป ที่ 2.58 (d) และเผยให้เห็นอัตราส่วนของ $I_{on}/I_{off} \sim 10^6$ ของแรงดันในช่วง ± 4 V และมีค่าแรงดันในการเปิด (Turn-on Voltage, V_t) ที่ต่ำ ~ 0.9 V ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ เป็นการไบอัสตรง (forward bias)

ได้จากความสัมพันธ์

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.144)$$

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.145)$$

เมื่อ I คือ กระแสอิมิตวย้อนกลับ

n คือ แฟคเตอร์อุดมคติ

T คือ อุณหภูมิ

k คือ ค่าคงที่โบลทซ์มันน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการจะได้ $n=1.95$ ซึ่งถือว่าสูงเมื่อเทียบกับแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดเล็กน้อย ($n=1$) เราคาดว่าเกิดการออกซิเดชันโดยทั่วไปของ Si ที่เป็นชั้นหน้าต่าง และ SiO_2 ชั้นบางๆ ที่สัมผัสบริเวณผิวหน้าของ NW/Si มีส่วนที่ทำให้ค่าเบี่ยงเบนไป ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ สามารถวิเคราะห์ได้โดยรูปแบบของวงจรสมมูลที่ประกอบไปด้วยไดโอด และตัวต้านทาน ดังสมการ

$$V = IR_S + n\phi_B + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.146)$$

เมื่อ I คือ กระแสที่มีตัวย้อนกลับที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

ความแตกต่างของสมการที่ (2.146) กับอัตราการไหลของกระแส จะให้ความต้านทานที่แตกต่างกัน

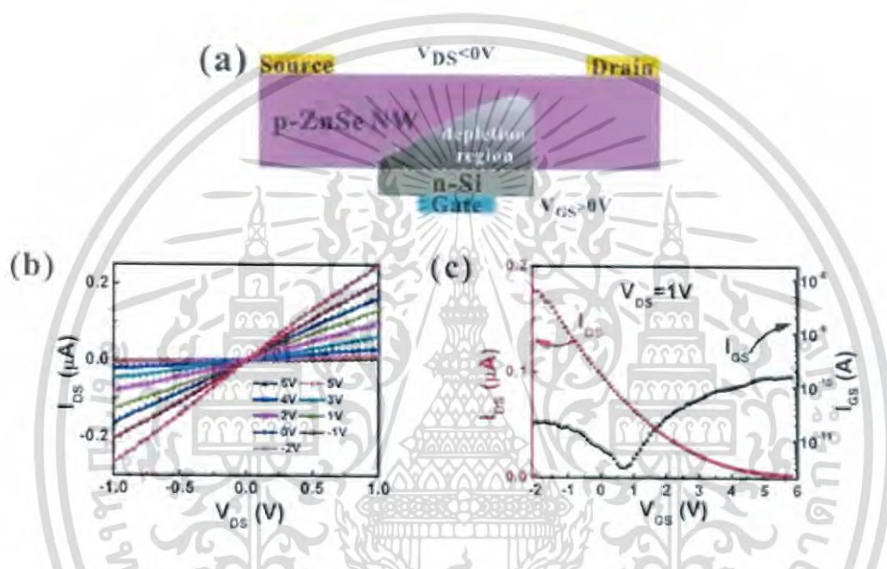
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_S \quad (2.147)$$

ความต้านทานอนุกรม (R) ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ มีค่า $\sim 87 \text{ k}\Omega$ แสดงในรูปที่ 2.58 (e) ซึ่งต่ำกว่าที่ทำการทดลองของ Nano-heterojunctions ตัวอย่างเช่น $n\text{-ZnO}/p^+\text{-Si} \sim 170 \text{ k}\Omega$, $n\text{-SnO}_2\text{NW}/p^+\text{-Si} \sim 94.6 \text{ k}\Omega$, $\text{SWCNT}/\text{SnO}_2 \sim 19 \text{ M}\Omega$ แสดงให้เห็นว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ $p\text{-ZnSeNW}/n\text{-Si}$ เป็นไดโอดที่ดีและมีคุณภาพสูง แม้ว่าจะถูกประดิษฐ์ด้วยวิธีที่เรียบง่ายก็ตาม

รอยต่อวิวิธพันธุ์ที่ลักษณะการนำไฟฟ้าที่ดีของ สามารถสร้าง FET ชนิดใหม่ได้ คือ HJFET ที่ขึ้นอยู่กับ $p\text{-ZnSeNW}$ รูปที่ 2.59 (a) แสดงให้เห็นถึงกลไกการทำงาน HJFET เมื่อ NW เชื่อมติดกับฐานรองรับที่เป็น Si จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion regions) ระหว่าง ZnSeNW และ Si เนื่องจากการแพร่ของพาหะข้างมากภายในบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งทำให้เกิดการนำไฟฟ้าลดลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียประจุ โดยปกติแล้วความกว้างของบริเวณปลอดพาหะสำหรับรอยต่อพี-เอ็น นั้น อยู่ในช่วงประมาณหลายร้อยนาโนเมตร ซึ่งเทียบได้กับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของ ZnSeNW นั้นหมายความว่าบริเวณปลอดพาหะสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องแคบๆ ของ NW ได้นอกเหนือจากนี้ บริเวณปลอดพาหะอยู่ภายใต้แรงดันไฟฟ้า (V_{GS}) ที่จ่ายให้กับฐานรองรับที่เป็น Si เมื่อจ่ายแรงดันไฟบวก ($V_{GS} > 0 \text{ V}$) บริเวณปลอดพาหะจะแยกเข้าไปใน NW ทำบริเวณปลอดพาหะกว้างขึ้นเมื่อ V_{GS} เพิ่มขึ้น แถบนำ (conduction band) ยังสามารถถูกบีบให้ใกล้ขาออกของกระแส (Drain) ได้อีก เพราะฉะนั้น ขาเข้า และขาออกของกระแส (source-drain current) จะถูกปิด ซึ่งหมายความว่ากระแสจะหยุดไหล ในทางตรงกันข้ามเมื่อจ่ายแรงดันไฟลบ ($V_{GS} < 0 \text{ V}$) บริเวณปลอดพาหะจะแคบลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะจะแคบกว่า $V_{GS} = 0$ V แถบนำจะขยายกว้างขึ้น ซึ่งกระแสจะสามารถไหลได้ และสามารถทำงานได้ปกติ อย่างไรก็ตามเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจากฐานรองรับ Si ไปยัง ZnSeNW V_{GS} ไม่สามารถมีค่าต่ำเกินไป โดยจากลักษณะของ HJFET มักจะใช้สำหรับทรานซิสเตอร์โหมดดีพลีชัน (Depletion Mode Transistor) ในการเปรียบเทียบ MOSFET แบบเดิมในโครงสร้างของ HJFET ค่อนข้างจะไม่ซับซ้อน เนื่องจากไม่มีชั้นของ dielectric oxide มากไปกว่านั้น ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีผลต่อ V_{GS} และสามารถปรับ V_{GS} ให้มีค่าน้อยลง ทำให้ HJFET ทำงานในช่วงแรงดันต่ำได้



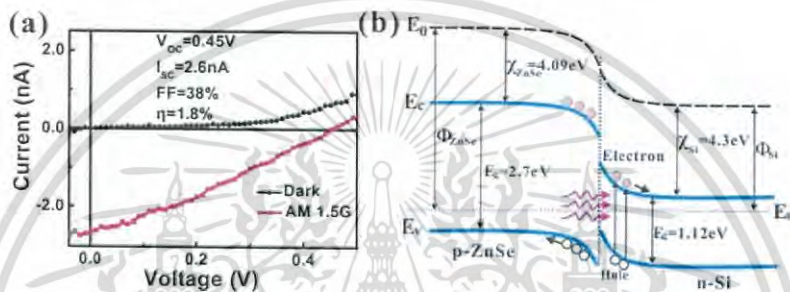
รูปที่ 2.59 (a) แสดงแผนผังแสดงให้เห็นถึงกลไกการทำงานของ HJFET

(b) แสดงลักษณะกราฟของ HJFET ที่แรงดันต่างกัน

(c) แสดงลักษณะกราฟของ HJFET วัดที่ $V_{DS} = 1$ V

รูปที่ 2.59 (b) และ (c) แสดงลักษณะเส้นโค้งของกราฟ และการเปลี่ยนแปลงกราฟเส้นโค้งของ HJFET ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเห็นได้ว่า I_{DS} ลดลง และ V_{GS} เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก MOSFET แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ bottom-gate MOSFET แล้ว HJFET มีการแสดงผลลัพธ์ที่โดดเด่นกว่าในสารกึ่งตัวนำชนิดพี สิ่งประดิษฐ์นี้จะเปลี่ยนระหว่างการเปิดทำงาน และหยุดทำงานในช่วงที่มีแรงดันต่ำ โดยทั่วไปของการศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของ NW สภาพการนำไฟฟ้าสามารถลดลงจาก 270 ถึง 0.9 nS ดังนั้นแรงดันไฟฟ้า V_{GS} จะเปลี่ยนจาก -2 ไปถึง +6 V ด้วยการเพิ่มขึ้นทีละ +1 V ทำให้อัตราส่วนของ $I_{on}/I_{off} \sim 3 \times 10^2$ สำหรับ HJFET แต่ในทางกลับกัน S_{th} ของ HJFET มีค่าลดลง 1.12 V/dec ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของ bottom-gate MOSFET (~ 154 V/dec) มาก V_{th} ของ MOSFET มีค่าลดลงหลายสิบลวัตต์ ไปจนถึง ~ 2 V ของ HJFET สิ่งประดิษฐ์ p-ZnSeNW ที่มาจาก HJFET สามารถที่จะพัฒนาประสิทธิภาพ และมีโครงสร้างให้ดียิ่งขึ้นได้ การสัมผัสกันโดยตรงของ p-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปเผยแพร่บนการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ZnSeNW ด้วย n-Si ทำให้เกิดช่องทางการเชื่อมต่อของรอยต่อวิวิธพันธุ์ กับแถบนำของNWที่กว้างมาก จากผลที่ได้ สามารถปรับเปลี่ยนค่าแถบนำของ NW เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับการทำเป็นชั้นดูดกลืนแสงเพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้ ยิ่งไปกว่านั้นการที่ไม่กำจัด oxide ออกไปจากชั้น dielectric จะทำให้เกิดปัญหาหาบริเวณผิวหน้าที่สัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ ซึ่งควรกำจัด oxide ออกหากทำได้ เป็นที่น่าสงสัยว่าการรั่วไหลของกระแส (IGS) จะมีค่าต่ำเมื่อ VGS เปลี่ยนจาก -2 ไปถึง +6 V การเกิดกระแสไหลน้อย มีผลมาจากลักษณะของรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่ดี ซึ่งพบว่ามีการรั่วไหลน้อยมาก ($\sim 10^{-10}$ A แสดงในรูปที่ 2.59 3(d)) ที่ไบอัสย้อนกลับ



รูปที่ 2.60 (a) ลักษณะปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-ZnSeNW/n-Si (b) แผนภาพแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ p-ZnSeNW/n-Si ภายใต้การฉายแสง simulator ซึ่งติดตั้งฟิลเตอร์ AM 1.5 ความเข้มแสงที่ 100 mW/cm^2

รอยต่อวิวิธพันธุ์ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ ที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ในแต่ละจุดของรอยต่อวิวิธพันธุ์สามารถดูดกลืนแสงได้ในบางความยาวคลื่นเท่านั้น ทำให้มีการดูดกลืนแสงมากขึ้น และทำให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น รอยต่อวิวิธพันธุ์ p-ZnSeNW/n-Si นั้น ZnSeNW ส่วนใหญ่จะดูดกลืนแสงในช่วงที่มีความยาวคลื่นสั้น ในขณะที่ Si จะดูดกลืนแสงในช่วงที่มีความยาวคลื่นมาก จากผลการทดลองนี้มีการดูดกลืนทั้งในย่านที่ตามองเห็น (Visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้ ดีกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเดิมนั้นคือการดูดกลืนแสงในอย่างจำกัดในช่วงความยาวคลื่นสั้น รูปที่ 2.60 (a) แสดงลักษณะของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปที่ถูกวัดและคำนวณด้วยเครื่อง Super solar simulator ซึ่งติดตั้งฟิลเตอร์ AM 1.5 และความเข้มแสงได้ถูกปรับเทียบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐาน (Reference cell) ให้มีความเข้มแสงที่ 100 mW/cm^2 พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage, V_{oc}) มีค่า 0.45 V, ค่าของกระแสลัด (short circuit current, I_{sc}) มีค่า 2.6 nA (เท่ากับ ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(short circuit current density, J_{sc}) $\sim 10.5 \text{ mA cm}^{-2}$) และฟิลแฟคเตอร์ (fill factor, FF) มีค่า 0.38, ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (power conversion efficiency, η) มีค่า 1.8 % ซึ่งอยู่ในช่วงของค่าพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่แล้ว

มันเป็นเรื่องที่ดีที่ประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์นี้จะดีกว่าการทดลองที่ผ่านมาในก่อนหน้านี้ของธาตุหมู่ 2-6 NW/nanoribbon (NR) ตามแบบของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น CdSe NR/Au เป็นรอยต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบ ซอทท์ก็ ($\eta=1.22 \%$), CdS NW/Au/graphene ($\eta=1.05 \%$) และ CdS NR/CNT_s ($\eta=0.59 \%$) ในทางกลับกันลักษณะของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ (แสดงในรูปที่ 2.60 (b)) สามารถอธิบายได้จากที่ค้นคว้ามา การดูดกลืนแสงที่ตกกระทบทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ทั้งใน ZnSeNW และ Si เมื่อคู่อิเล็กตรอน-โฮล แพร่ไปยังบริเวณผิวหน้าของรอยต่อพวกมันจะถูกแยกออกโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของการเจือให้ ZnSeNW เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ภายใต้สภาวะก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) และก๊าซไนโตรเจนเป็นสารเจือ ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (thermal evaporation method) ที่ความเข้มข้น $\sim 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดพีเอ็น (ZnSeNW)/Si โดยการเคลือบ p-ZnSeNWs ลงบนฐานรองรับที่เป็น SiO₂/Si โดยกำหนดให้ Si เป็นชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ รอยต่อวิวิธพันธุ์นี้ถูกสร้างขึ้นโดยวิธีการสัมผัสให้เกิดรอยต่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่ดีในแง่ของค่าแฟคเตอร์อุดมคติที่น้อย อัตราของกระแส on/off สูง และมีค่าแรงดันในการเปิด (Turn-on Voltage) ต่ำ

เป็นที่น่าสนใจ FET ชนิดใหม่ คือ HJFET สามารถสร้างได้จากรอยต่อวิวิธพันธุ์ จากที่ได้เปรียบเทียบกับ MOSFET กับ HJFET แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการดูดกลืนแสง จะทำให้การนำไปใช้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเช่นกัน จากผลที่ได้ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงาน $\sim 1.8 \%$ ซึ่งถือว่าประสบความสำเร็จใน แต่ยังไม่ดีที่สุดสำหรับสิ่งประดิษฐ์นี้ งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ สารกึ่งตัวนำของธาตุหมู่ 2-6 โครงสร้างระดับนาโน/ซิลิกอน สำหรับการใช้งาน nano-electronic และ nano-optoelectronic ในอนาคต

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

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

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย [20-25]

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100)

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร
2. แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร
3. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
4. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
5. เครื่องเป่าลมร้อน
6. แก๊สไนโตรเจน
7. นาฬิกาจับเวลา
8. ปากคืบ
9. เตาอบ
 - 10.1 น้ำยาล้างจาน
 - 10.2 น้ำปลอตประจุ
 - 10.3 อะซิโตน
 - 10.4 เอทานอล
 - 10.5 เมทานอล
 - 10.6 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
 - 10.7 โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์
11. เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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. เตาเผาสาร

3.2 ขั้นตอนในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si(100) และแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

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 น้ำปอลดประจุ 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) ด้วยน้ำปอลดประจุ 5 ครั้ง
7. ทำการเป่าแห้งแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ให้แห้งด้วยก๊าซ

ไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

1. ตัดแผ่นกระจกสไลด์ให้มีขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร ไปแช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปilotประจุ
4. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในอะซีโตนเป็นเวลา 10 นาที
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
6. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปilotประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
7. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
8. ทำการล้างด้วยน้ำปilotประจุเป็นเวลา 10 นาที ตามขั้นตอนในข้อ 2-7 และจะนำปิกเจอร์ไปใส่ในเครื่องสัด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
9. ทำการเป่าแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อนและนำแผ่นสไลด์ไปอบแห้งเป็นเวลา 30 นาที

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

1. ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยทำการขจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่นด้วยอะซีโตนและเมทานอล
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) ซึ่งทำ

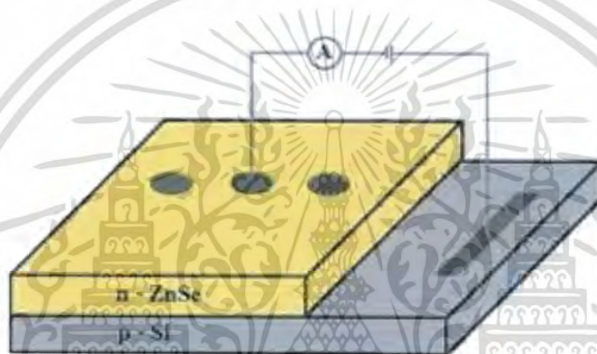
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบ และ ขนาดที่ต้องการหลังจากนั้น ปิดห้องสุญญากาศ (ภาชนะสุญญากาศ) ให้เรียบร้อย

5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศ เข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออกจนได้ความดัน ประมาณ 9×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบจนได้ความดันตามต้องการ ในการทดลองนี้ใช้ความดันช่วง 5×10^{-5} ถึง 2×10^{-6} มิลลิบาร์
7. ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย (shutter) แล้วเริ่มทำการระเหยสารเคมีโดยมี แผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับโดยการเปิดสวิทซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า อย่างช้าๆจนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์ แล้วรอสัก ประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มกระแส ต่อไปอย่างช้าๆจนถึง 100-130 แอมแปร์ จนได้ความหนาของฟิล์มบาง ประมาณ 500 ถึง 800 นาโนเมตร ซึ่งรวมแล้วทั้งหมดจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที
8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้วให้ปิดแผ่นกั้นการระเหยและทำการปิดวาล์วแอคโดยค่อยๆลดกระแสลงอย่างช้าๆจนกระทั่งเป็นศูนย์
9. ต่อจากนั้นรอให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของ ห้องสุญญากาศลดลงแล้วจึงปิดปั๊มเทอร์โบจากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีก ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วปิดวาล์วสุบอากาศและปั๊มกลโรตารี
10. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลา ประมาณ 15 นาที
11. นำแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ ZnSe เป็นที่เรียบร้อยแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศนำไป ตรวจสอบสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์
12. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ ทำการศึกษา โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ ดิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance โดยใช้ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ในย่าน 1.5406 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และ ความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์, ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของ LEO รุ่น LEO1450VP ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับ อุณหภูมิในช่วง 20 - 300 เคลวิน โดยการทำให้ขั้วอิเล็กโทรดด้วยการป้ายกาวย เงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2 เซนติเมตร ทางด้านที่เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) แล้วจาก นั้นจึงนำไปศึกษาด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า กระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง และ ที่อุณหภูมิต่ำ แล้ว ต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดัน ไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพโครงสร้างของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่ง ตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลง บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธี การระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของ สารกึ่งตัวนำ p-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสาร เคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ และที่เป็นไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

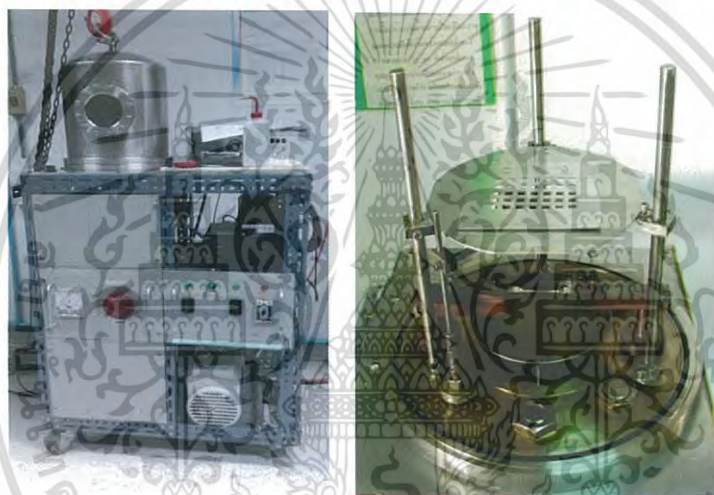
3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำ 20 - 300 เคลวิน ได้แก่ นำไปศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

3.3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษารูปความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

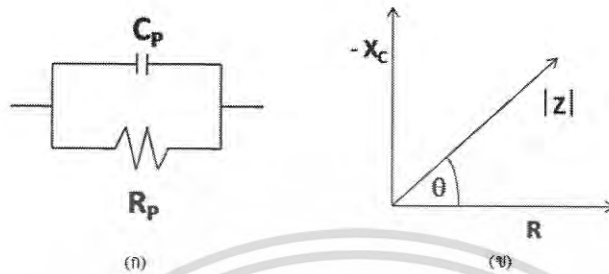


รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัด ค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์การวัดค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน [7,20-25]

วงจรสมมูลที่เหมาะสมในการอธิบายสมบัติของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z) ของรอยต่อพี-เอ็น คือ ความต้านทาน R_p ต่อขนานกับความจุ C_p ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรสมมูล R_p กับ C_p และแผนภาพแสดงเฟสของค่า $-X_c$ กับ R

ก. แสดงวงจรสมมูล R_p กับ C_p ต่อขนานกัน

ข. แสดงค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน

ค่าจินตภาพแห่งความจุ (capacitive reactance, X_c) คือ

$$X_c = \frac{1}{\omega C_p} \quad (3.1)$$

มุมเฟส θ จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$\tan\theta = \frac{|X_c|}{R_p} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (3.2)$$

การสูญเสียพลังงานไปในวงจรจะแสดงผ่านทางแฟกเตอร์สูญเสีย (dissipation factor, D) คือ

$$D = \tan\theta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (3.3)$$

จะเห็นว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแล้วแฟกเตอร์สูญเสียจะมีค่าลดลง

และแฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor, Q) คือ

$$Q = \frac{1}{D} = \omega R_p C_p \quad (3.4)$$

ในทางปฏิบัติฟังก์ชันที่ควรวัด คือ C_p - D , C_p - Q , C_p - G และ C_p - R_p โดยที่ G คือ ความนำไฟฟ้า ซึ่ง

$$G = \frac{1}{R_p} \quad (3.5)$$

โดยทั่วไปที่ความถี่ใดๆ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน Z^* จะเป็นดังสมการ

$$Z^* = Z' - jZ'' \quad (3.6)$$

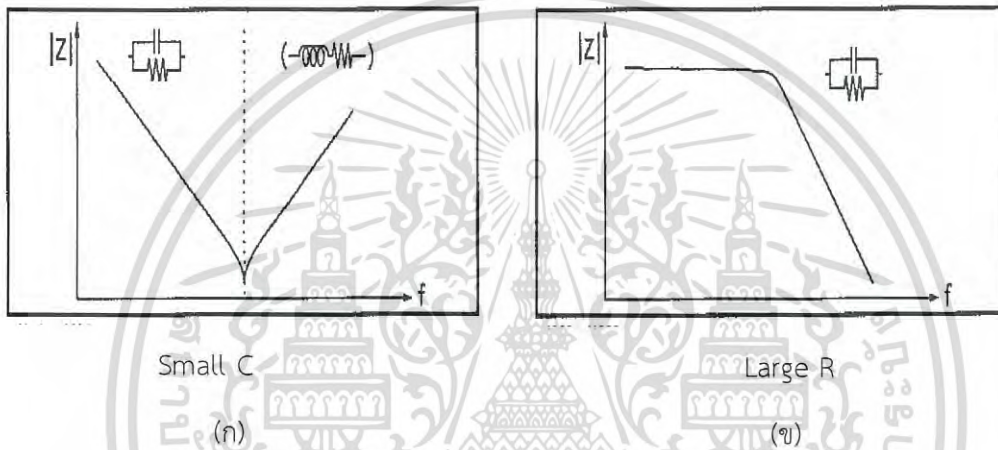
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ
$$D = \frac{Z'}{Z''} \tag{3.7}$$

เมื่อ
$$Z' = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \tag{3.8}$$

$$Z'' = \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \tag{3.9}$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับ ความถี่ จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่
 ก. ในกรณีที่ความจุ (C) มีค่าต่ำ
 ข. ในกรณีที่ความต้านทาน (R) มีค่าต่ำมาก

โดยปกติสภาพนำไฟฟ้ากระแสสลับจะสอดคล้องกับสมการของจอนเซอร์ (Jonscher expression) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^n \tag{3.10}$$

เมื่อ n คือเลขยกกำลัง

จำนวนจริง (Z') และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน คือ

$$Z' = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}$$

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

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่า R_p จะคำนวณได้จากจุดตัดแกน Z' ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ $-Z''$ ส่วนค่าความจุ C_p จะคำนวณได้จากความถี่ที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลม (semi-circular) ในกรณีอุดมคติ ที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลมคือ $Z' = -Z''$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{R_p}{1+\omega^2 C_p^2 R_p^2} = \frac{\omega C_p R_p^2}{1+\omega^2 C_p^2 R_p^2}$$

จะได้ว่า

$$C_p = \frac{1}{\omega R_p} \quad (3.11)$$

ในทำนองเดียวกันเวลาผ่อนคลาย (relaxation time, τ) จะคำนวณได้จากความถี่สูงสุดของครึ่งวงกลม

$$\tau = \frac{1}{\omega_{\max}} = C_p R_p$$

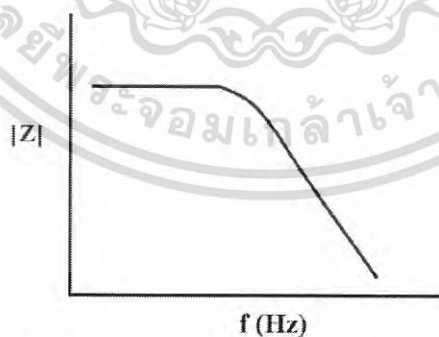
หรือ

$$\omega_{\max} C_p R_p = 1 \quad (3.12)$$

จากค่า Z' และ $-Z''$ จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) จะได้ว่า

$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (3.13)$$

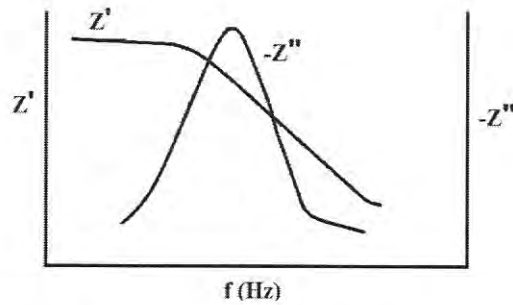
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับ f จะเขียนได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($|Z|$) กับความถี่ (f)

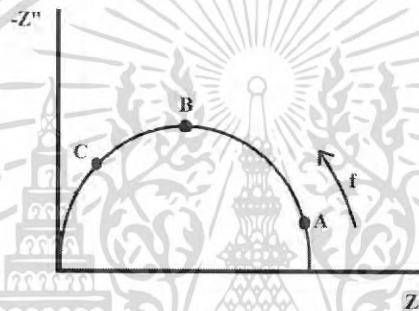
แต่ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับความถี่ (f) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$) กับ ความถี่ (f) จะได้กราฟดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



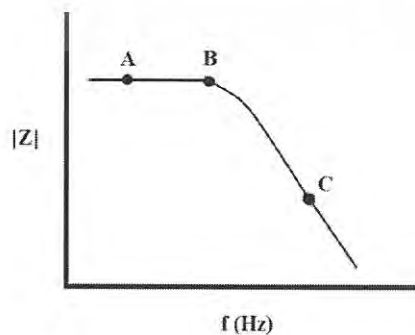
รูปที่ 3.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับความถี่ (f) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$) กับ ความถี่ (f)

และถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ $-Z''$ จะได้กราฟดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$)

- ที่ความถี่ต่ำ (ที่บริเวณจุด A) Z' จะมีค่ามาก ส่วน $-Z''$ จะมีค่าน้อย
 - ที่ความถี่ของจุดสูงสุด (ที่บริเวณจุด B) Z' จะมีค่าลดลง ส่วน $-Z''$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นและในกรณีอุดมคติจะได้ว่า $Z' = -Z''$
 - ที่ความถี่สูงขึ้น (ที่บริเวณจุด C) ทั้ง Z' และ $-Z''$ จะมีค่าลดลงอีก
- และถ้านำมาเขียนกราฟ $|Z|$ กับ f จะได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($|Z|$) กับความถี่ (f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) โดยใช้วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และได้ศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ 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 1 โวลต์ โดยใช้ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ แล้วทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และต่อจากนั้นจึงเขียนแผนภาพแสดงโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100)

4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

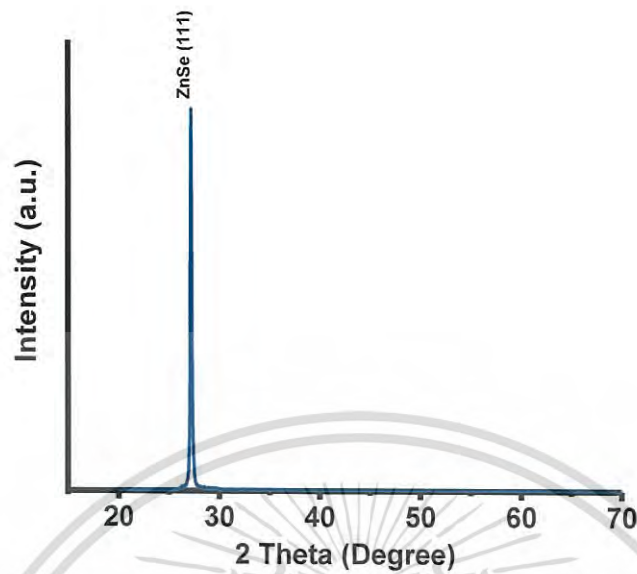


รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

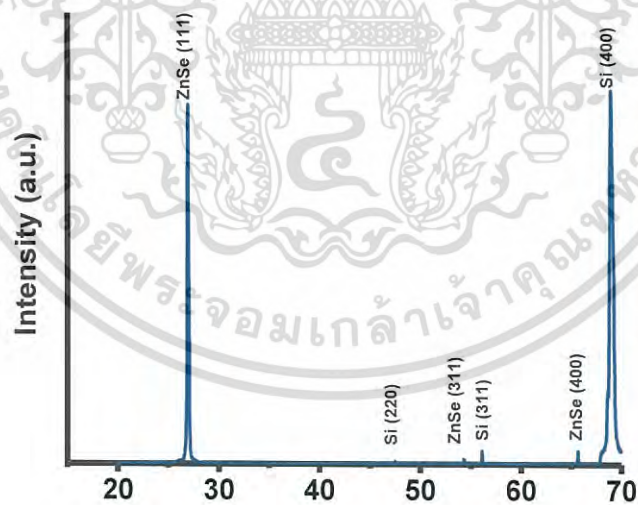
4.1.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



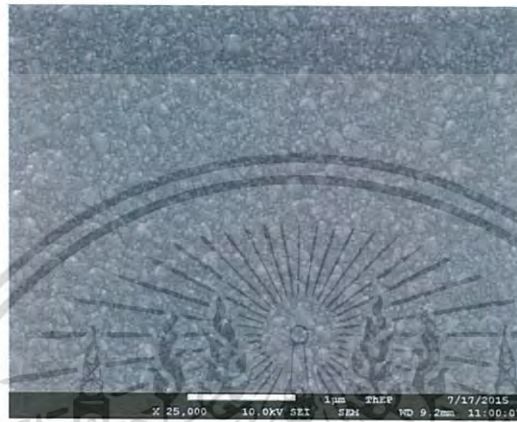
รูปที่ 4.3 แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

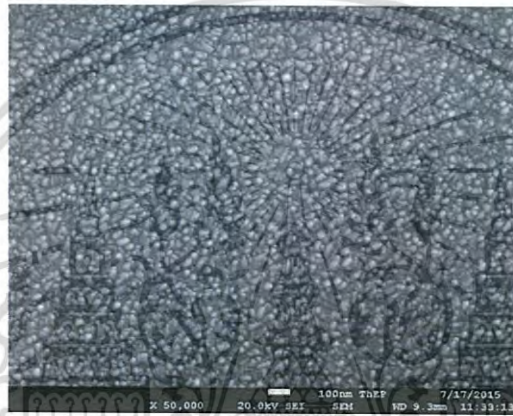
ก. ที่กำลังขยาย 25,000 เท่า

ข. ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า

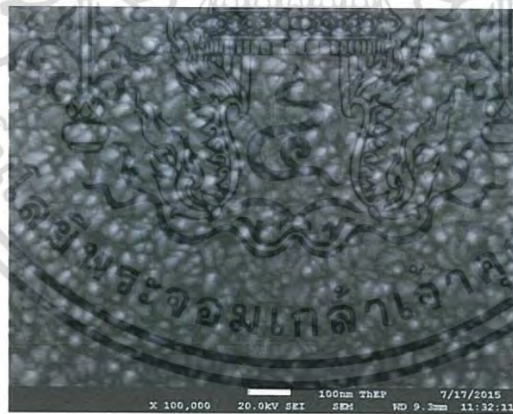
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.)



(ข.)

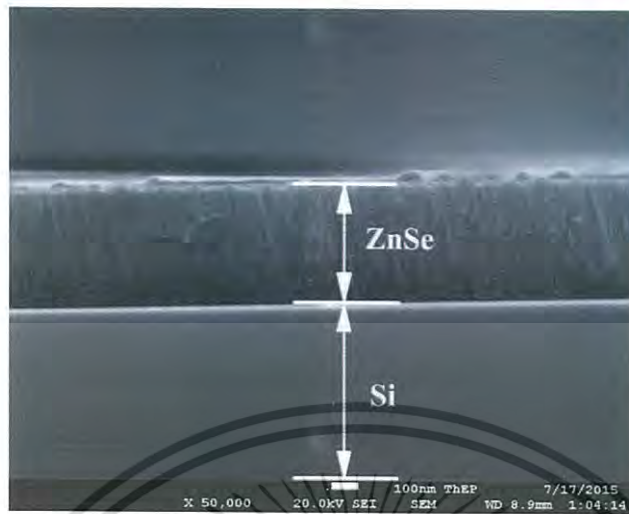


(ค.)

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

- ก. ที่กำลังขยาย 25,000 เท่า
- ข. ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า
- ค. ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

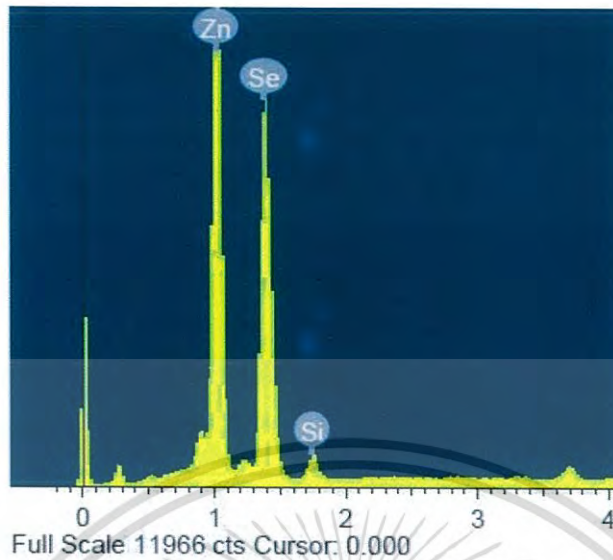


รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

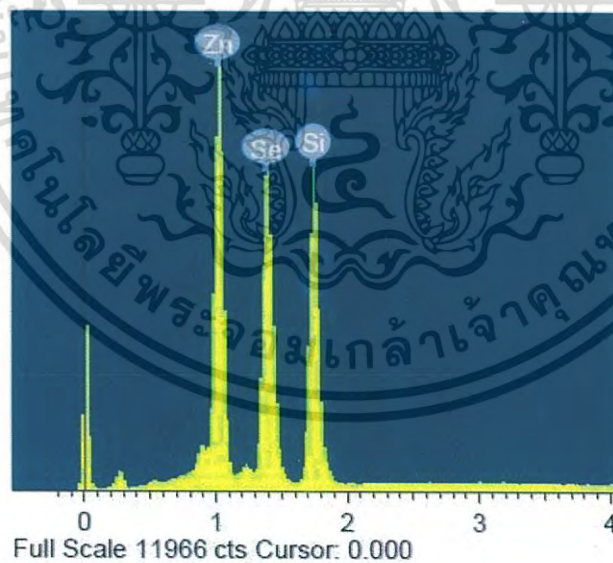
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพด้วยด้วยเทคนิคเอ็นเนอร์ยีดีสเพอร์ซีฟสเปกโทรสโกปี (EDS หรือ EDX) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็น Si โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ สามารถดูได้จากเส้นสเปกตรัมของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ มีพีคหลักๆ สองพีค คือ พีคของอะตอมของธาตุ Zn และพีคอะตอมของธาตุ Se และที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็น Si มีพีคหลักเพิ่มขึ้นมาอีกหนึ่งพีคคือ พีคของ Si แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เตรียมได้ประกอบด้วยสารประกอบ ZnSe จริง ที่ไม่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นเจือปน ส่วนการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณจะแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนอะตอมของธาตุโดยน้ำหนักอะตอมของธาตุ ดังแสดงในตาราง 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆด้วยสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



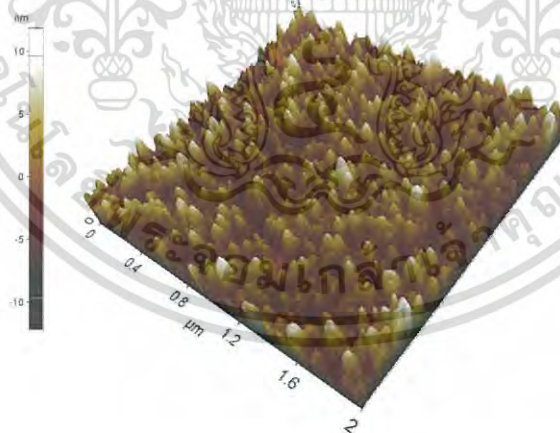
รูปที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆด้วยสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสาร กึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

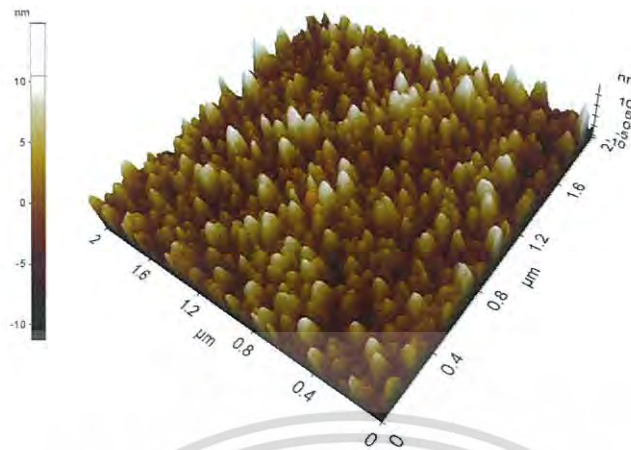
Sample	Elements					
	Zn		Se		Si	
	wt.%	at.%	wt.%	at.%	wt.%	at.%
ZnSe/Slide	38.30	40.60	58.39	51.23	3.31	8.17
ZnSe/Si	29.61	22.12	39.71	24.55	30.68	53.33

4.1.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

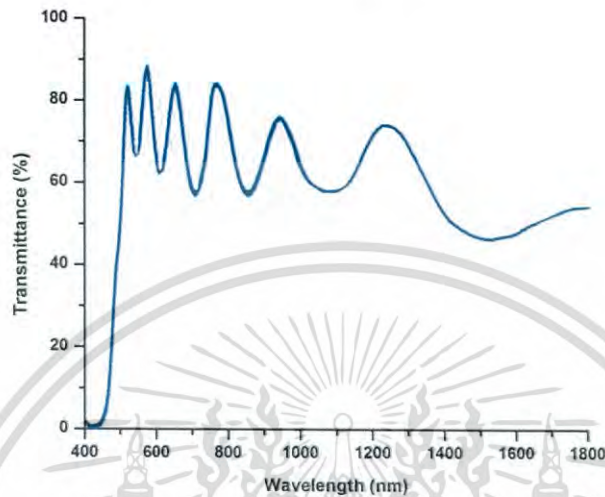


รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสาร กึ่งตัวนำ p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

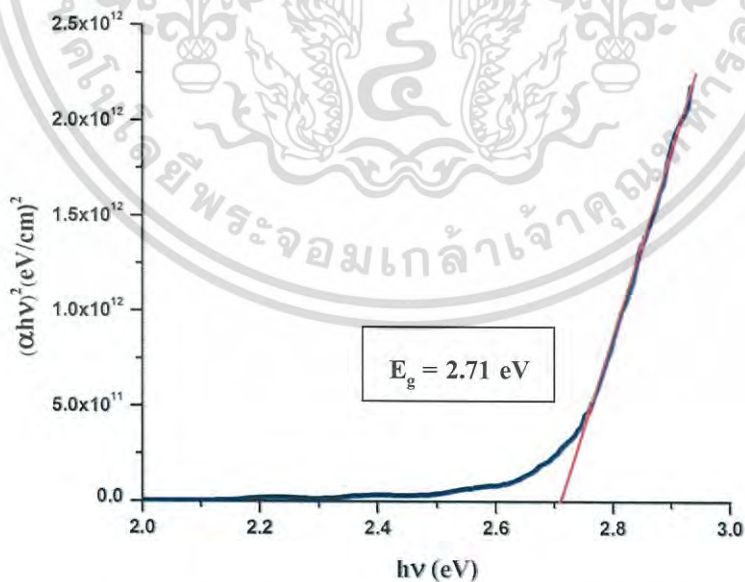
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ มีขนาดของเกรน 74 นาโนเมตร ค่าความขรุขระของพื้นผิว 3.127 นาโนเมตร และที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็น Si ขนาดของเกรน 78 นาโนเมตร ค่าความขรุขระของพื้นผิว 3.812 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่น 400 – 1000 นาโนเมตร



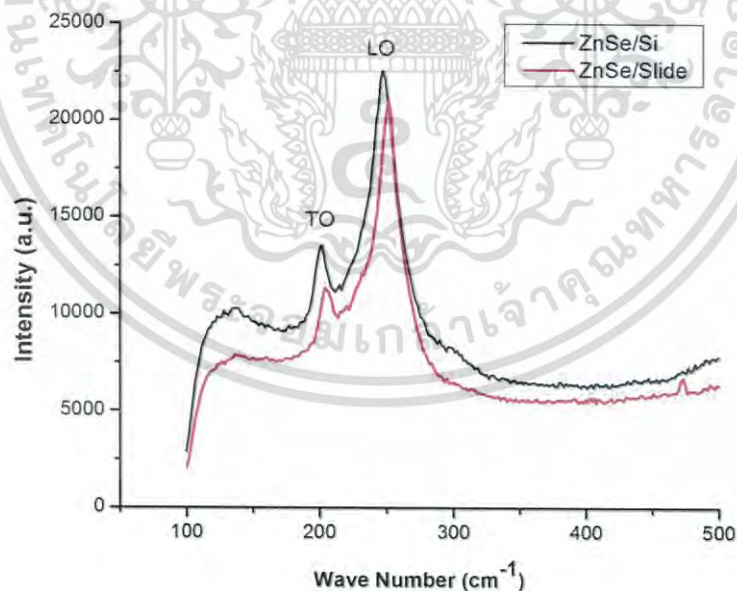
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha hv)^2$ กับ hv เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7 การศึกษาชนิดการสั่นของโครงผลึกด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากสเปกตรัมรามานสเปกโทรสโกปี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศแสดงให้เห็นถึงผลต่างพลังงานของโฟตอนที่กระเจิงเมื่อเทียบกับพลังงานของโฟตอนของเลเซอร์ที่ตกกระทบบนสารตัวอย่างจะสอดคล้องกับพลังงานของการสั่นของพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลในโครงผลึกของสารตัวอย่างซึ่งจะเป็นแบบควอนไตซ์

จากรูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมรามานในช่วงเลขคลื่น 100 - 500 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแสดงสเปกตรัมรามานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงพิกัดเด่นสองพิก คือ ที่เลขคลื่นประมาณ 205 และ 260 ต่อเซนติเมตร



รูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมรามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 20 – 300 เคลวิน และอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ตลอดจนการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้คำนวณหา ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความหนาแน่นของ อะตอมผู้รับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อ เป็นต้น

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

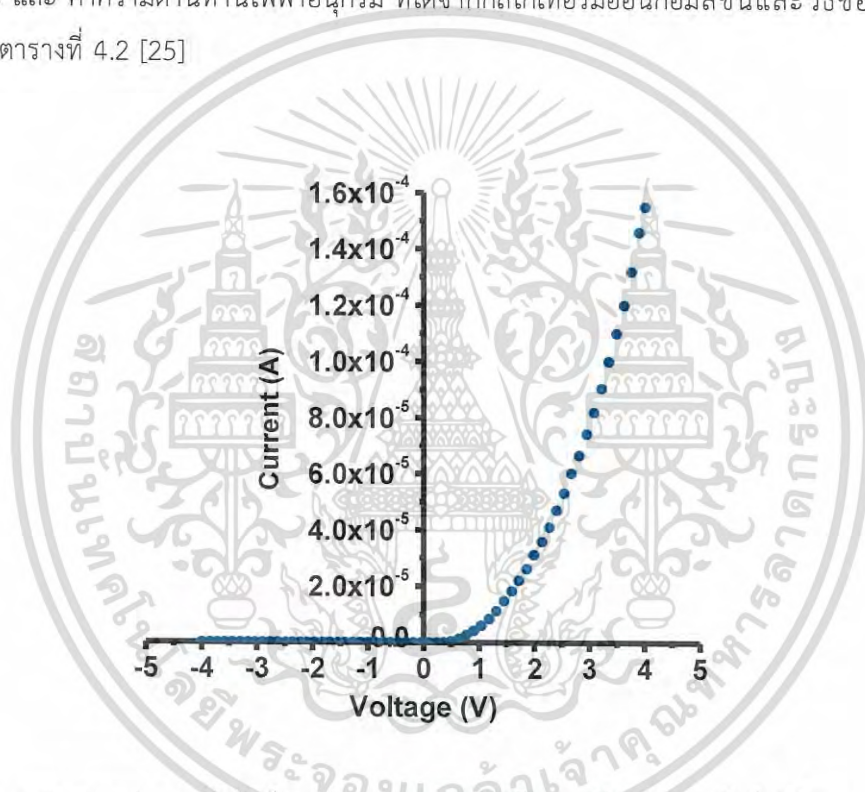
ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ แสดงในรูปที่ 4.15 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอดทั่วไป โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.57 โวลต์

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ในช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ดังรูปที่ 4.16 ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องพบว่า ที่แรงดันไฟฟ้า 0.33 ถึง 0.75 โวลต์ กลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มออิเล็กทริกและ ช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.75 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล จากนั้นเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V ดังรูปที่ 4.17 เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อพี-เอ็น ที่เป็นกลไกเทอร์มออิเล็กทริก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.16 เพื่อใช้

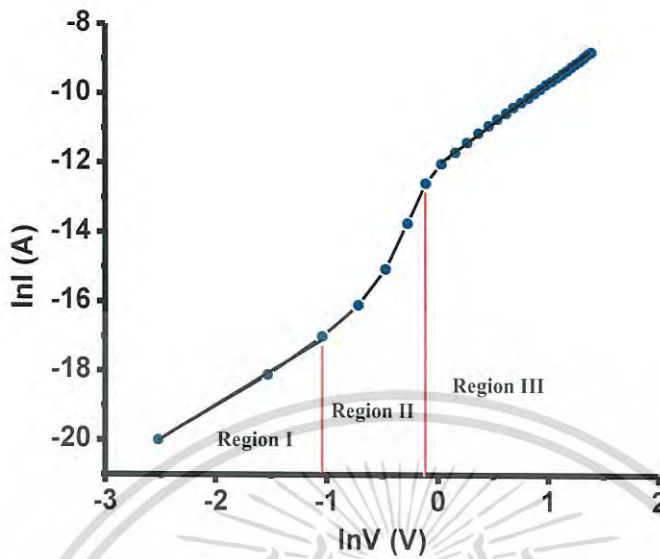
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วยหาค่ากระแสไฟฟ้าอ้อมตัวย้อนกลับ และ ค่าแพกเตอร์อุดมคติให้ถูกต้องยิ่งขึ้นและจากรูปที่ 4.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไบแอสกลับทางและไบแอสไปข้างหน้า ในการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า I

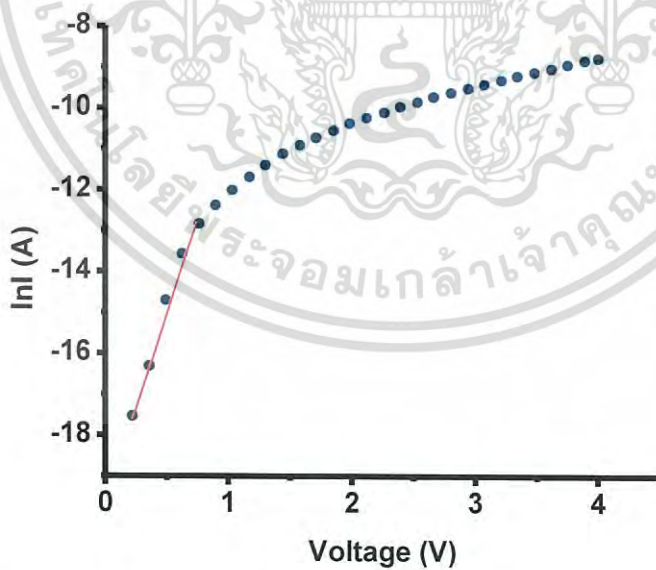
ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งจากราฟนี้จะได้ ค่าแพกเตอร์อุดมคติ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม และจากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I ดังรูปที่ 4.21 จะได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่แรง ดันไบแอสเป็นศูนย์ สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าอ้อมตัวย้อนกลับ ค่าแพกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงจะแสดงในตารางที่ 4.2 [25]



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -4 ถึง 4 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

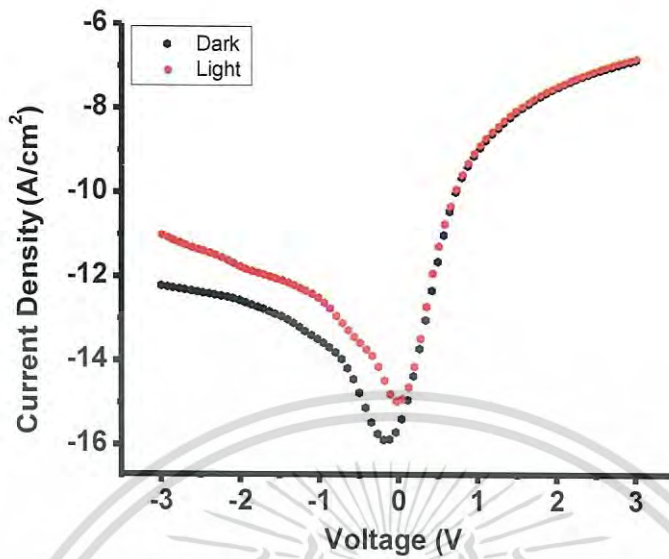


รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

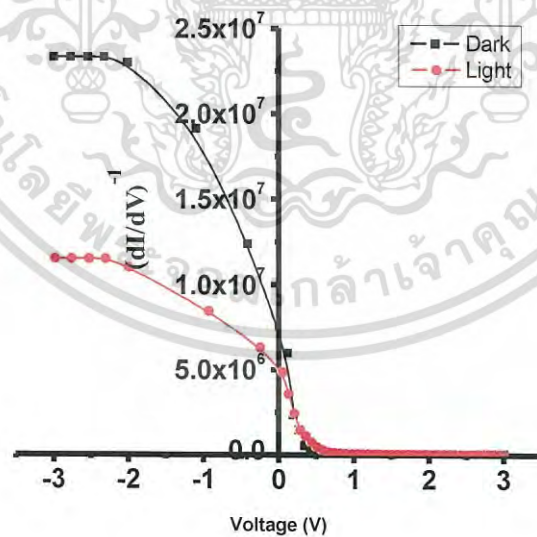


รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส (J) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อฉายแสง และไม่ฉายแสง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อฉายแสง และไม่ฉายแสง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.17 คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของกระแส ($\ln I$) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เพื่อใช้ในการคำนวณหา ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงช่วงที่มีการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชันที่พิจารณาจากช่วงของแรงดันไฟฟ้า จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของกระแส ($\ln I$) กับ ค่าลอการิทึมของแรงดัน ($\ln V$) ดังรูปที่ 4.16 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

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

ค่าความสูงกำแพงศักย์ (ϕ_B) ของสมการที่ (4.3) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิใดๆ และ A^* เท่ากับ 12 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรต่อเคลวินยกกำลังสอง

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหา ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตวย้อนกลับ คือ

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

อาจเขียนสมการที่ (4.5) อีกรูปหนึ่งได้เป็น

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

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวงจ (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

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

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า I ดังรูปที่ 4.20 โดยค่าความชันของกราฟนั้นคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวงจ (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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

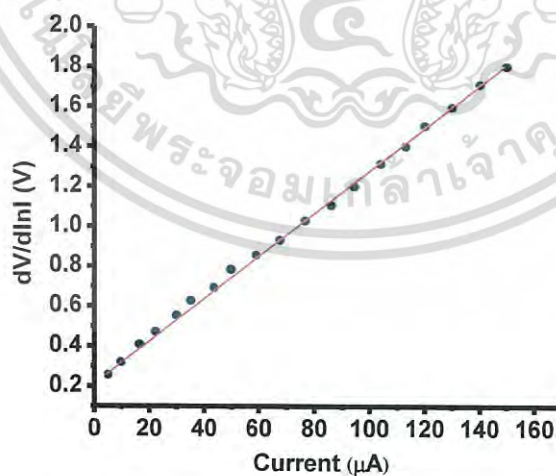
เมื่อทำการคำนวณค่า $H(I)$ จากข้อมูลของ ค่ากระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I ก็จะได้ดังรูปที่ 4.21 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้งของค่า $(n\phi_B)$ ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้ว นอกจากนี้ความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชันของค่า $H(I)$ นั่นก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.9) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

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

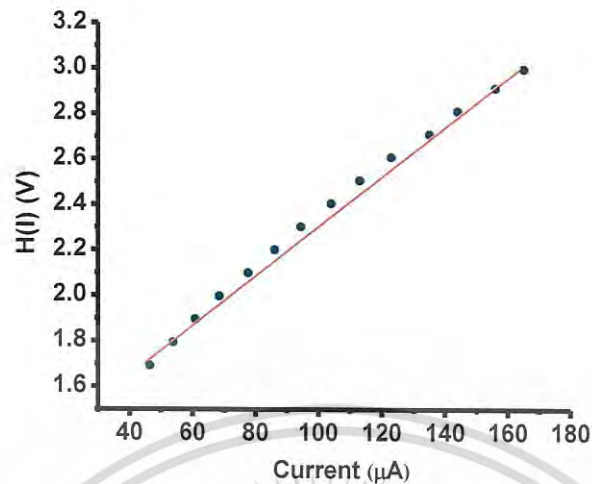
$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.13)$$

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 [33-35]



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

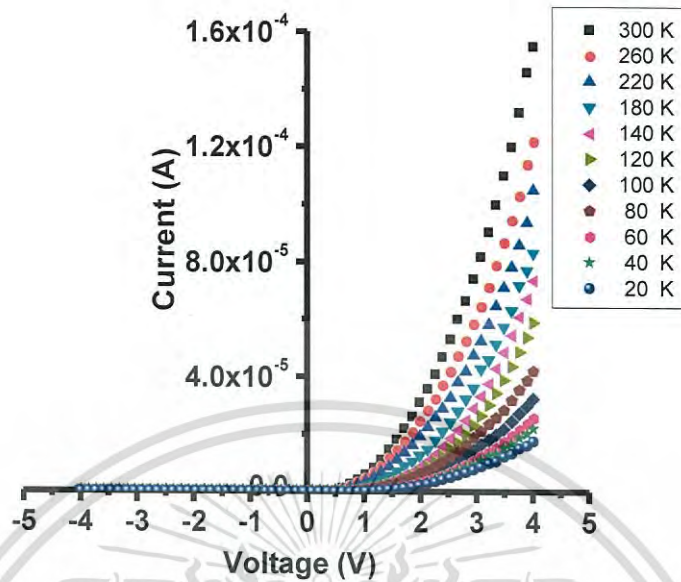
ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_S) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{B0}) และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_S) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Sample	Saturation Current I_S (A)	Ideality Factor n		Barrier Height ϕ_{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	2.91	2.96	0.90	0.73	0.84	0.85

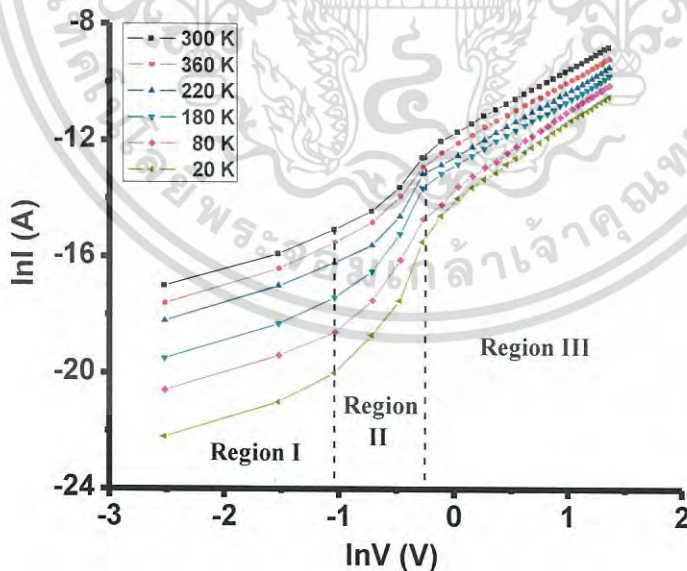
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 -4 ถึง 4 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลง ตามอุณหภูมิที่ลดลงแสดงดังรูปที่ 4.22 และ ค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) สามารถศึกษาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ โดยสามารถแบ่งกลไกการนำไฟฟ้าได้เป็นสองช่วง คือ กลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและสามารถหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V เพื่อนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล และในการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมจะใช้วิธีของชวงโดยค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 ถึง 300 เคลวิน ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงแสดงในตารางที่ 4.3

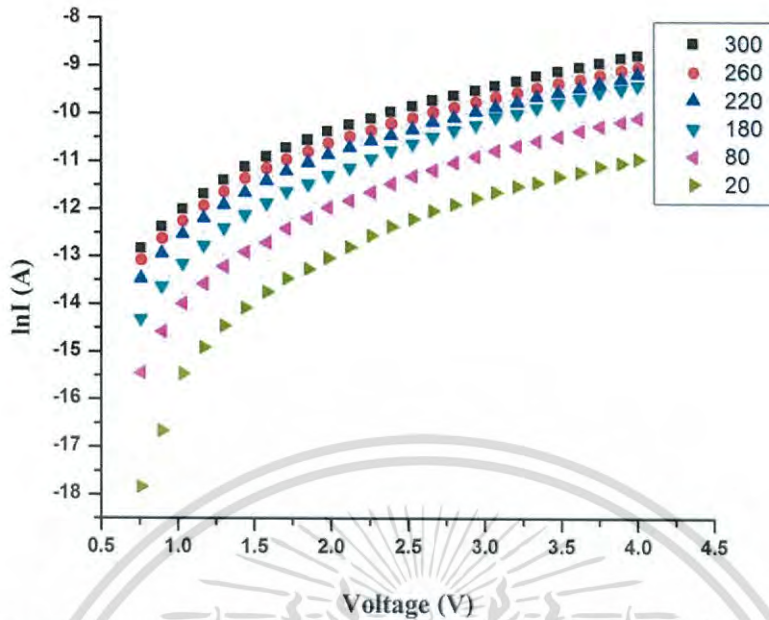


รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

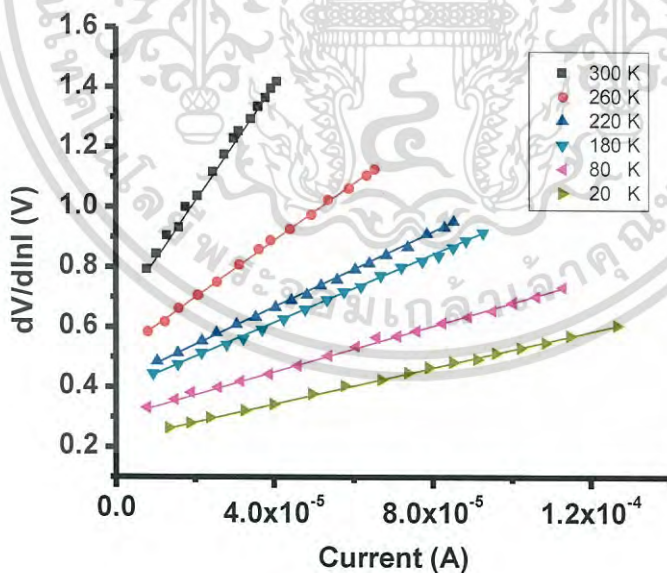


รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

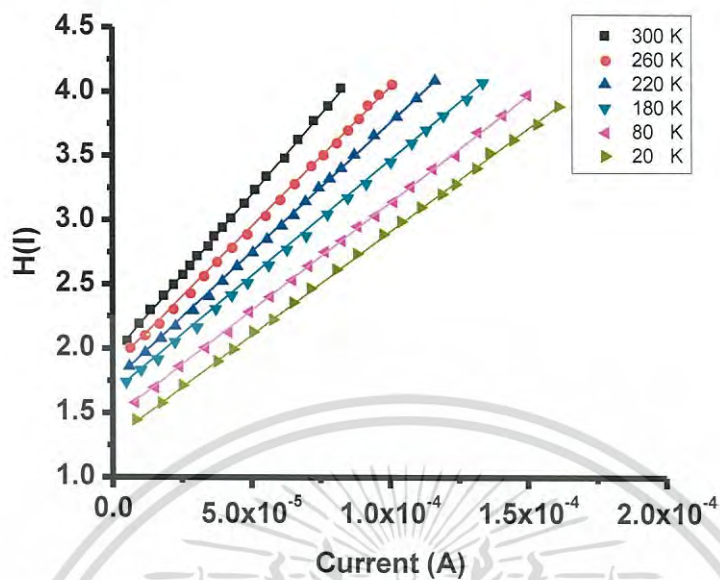


รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า I ที่อธิบายวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I โดยวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Temperature (K)	Saturation Current (I_s)	Ideality Factor (n)		Barrier Height (eV)		Series Resistance ($10^4 \Omega$)		m จาก $\ln I$ กับ $\ln V$
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung	
		I-V	$dV/d(\ln I)-I$	I-V	H(I)-I	H(I)-I	$dV/d(\ln I)-I$	
20	6.54×10^{-13}	92.03	89.39	0.075	0.030	7.137	7.555	3.041
40	2.52×10^{-12}	49.17	54.45	0.108	0.069	6.378	6.713	3.035
60	4.63×10^{-12}	22.16	29.08	0.173	0.120	5.620	5.870	2.939
80	1.92×10^{-11}	15.92	16.77	0.232	0.175	4.861	5.028	2.897
100	7.31×10^{-11}	12.24	12.72	0.290	0.210	4.103	4.185	2.896
120	9.78×10^{-11}	9.95	10.36	0.347	0.266	3.461	3.463	2.759
140	1.94×10^{-10}	8.91	8.99	0.407	0.305	2.937	2.886	2.714
160	5.5×10^{-10}	8.13	8.21	0.455	0.369	2.406	2.340	2.709
180	8.66×10^{-10}	7.61	7.71	0.508	0.421	1.996	1.924	2.697
200	1.47×10^{-9}	7.35	7.01	0.556	0.488	1.712	1.643	2.439
220	2.84×10^{-9}	6.05	6.31	0.614	0.522	1.534	1.492	2.393
240	4.08×10^{-9}	5.53	5.61	0.659	0.576	1.418	1.386	2.357
260	4.83×10^{-9}	5.27	5.18	0.722	0.645	1.303	1.281	2.357
270	6.08×10^{-9}	4.75	4.58	0.745	0.675	1.187	1.175	2.288
280	7.11×10^{-9}	3.71	3.88	0.768	0.709	1.072	1.070	2.252
290	8.14×10^{-9}	3.19	3.31	0.801	0.762	0.956	0.964	2.203
300	9.17×10^{-9}	2.91	2.96	0.832	0.791	0.841	0.859	2.164

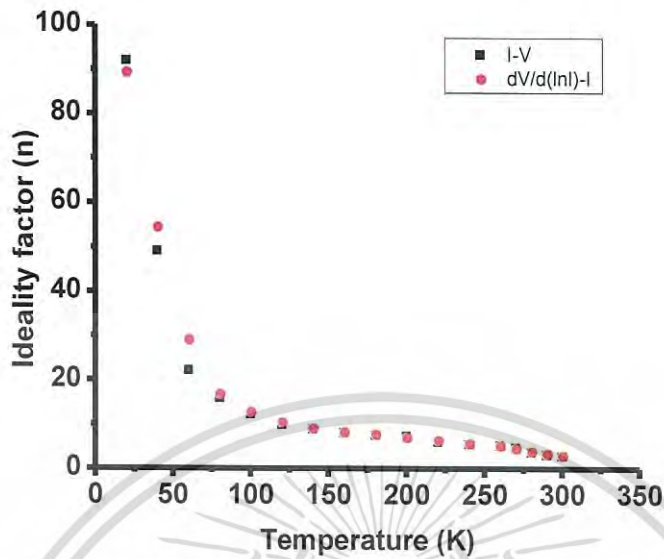
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองตารางที่ 4.3 จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกและวิธีของชวงมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงและมีลักษณะไม่เป็นกราฟเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.27

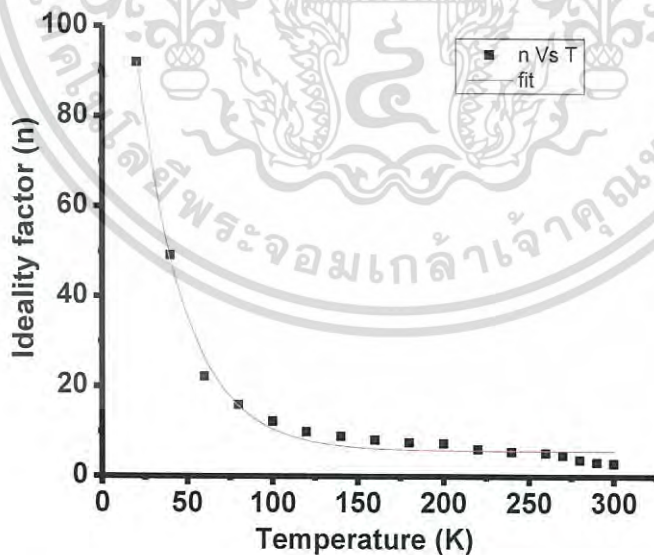
ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกและวิธีของชวงมีค่าลดลงตามค่าอุณหภูมิที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.29 ส่วนค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกับกลไกเทอร์มออิเล็กทริก

การที่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และ ค่าความสูงกำแพงศักย์ ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ขอตักก็มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิมีค่าสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้พาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบอัสไปหน้าหรือพลังงานกระตุ้นจากภายนอกเพียงเล็กน้อย พาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์มีค่ามาก และ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังงานของพาหะอิสระมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อที่พาหะจะไหลข้ามกำแพงศักย์ ซึ่งกำแพงศักย์ที่สามารถข้ามได้นั้นก็เป็นกำแพงศักย์ที่มีค่าน้อยเนื่องจากไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำพบว่า ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าน้อยและค่าแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่ามาก ที่อุณหภูมิสูงพาหะอิสระที่สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าต่ำก็ยังมีอยู่ แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานที่สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้

ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากวิธีของชวง พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.30 การที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงนั้นมีสาเหตุมาจากการที่ค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระลดลง ซึ่งเกิดจากการที่กับดักพาหะได้จับพาหะอิสระเอาไว้ที่บริเวณผิวรอยต่อและการที่พาหะอิสระมีพลังงานน้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดลงจึงทำให้พาหะอิสระอยู่กับที่ (freeze - out - carrier) การที่จะให้พาหะอิสระเคลื่อนที่ข้ามบริเวณรอยต่อ $p+ - n$ ได้นั้นจำเป็นต้องให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

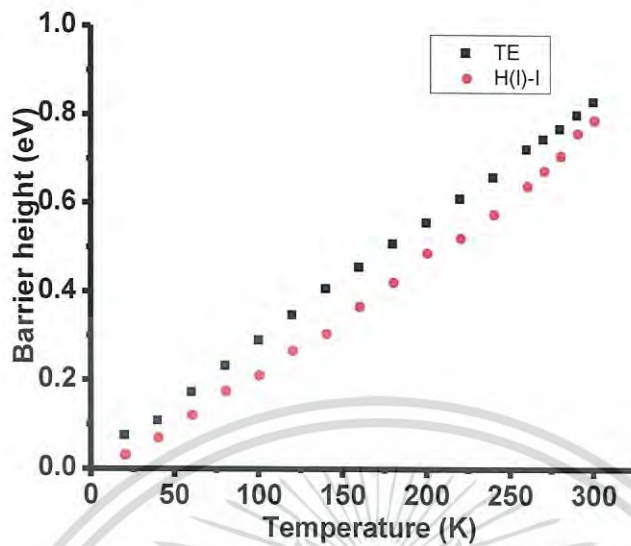


รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการ วัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

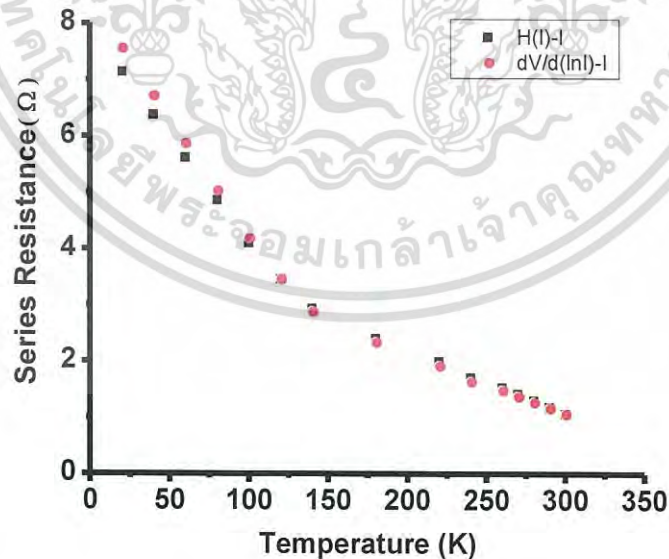


รูปที่ 4.28 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มี รอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



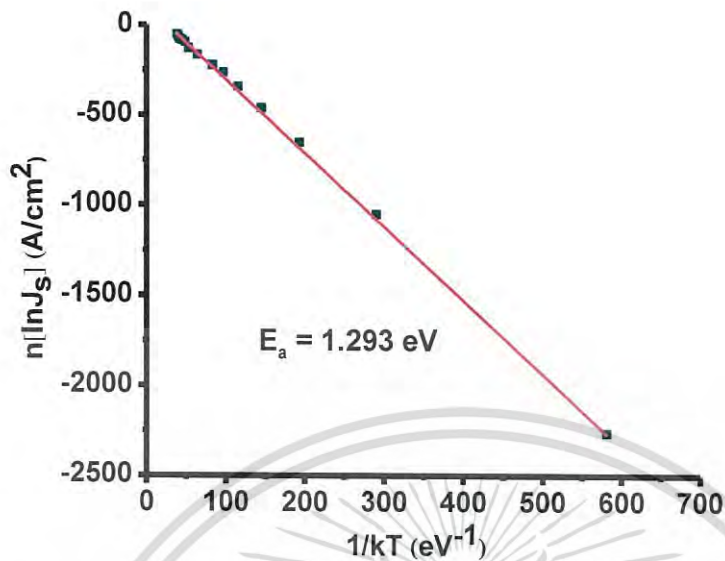
รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่ได้ จากวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100)

ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n \ln |J_s|$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.28 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 ค่าลักษณะเฉพาะของค่าพลังงานการดูดอิม่องค์ทะเลลูผ่านกำแพงศักย์ ที่ได้จากรูปที่ 4.28 จากกลไกเทอร์มियोอนิสมิสชันและวิธีของชวงมีค่าเท่ากับ 0.095 และ 0.096 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.31 สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อ ได้จากสมการที่ (4.14)

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

พลังงานกระตุ้น E_a หาได้จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.24

ดังนั้น

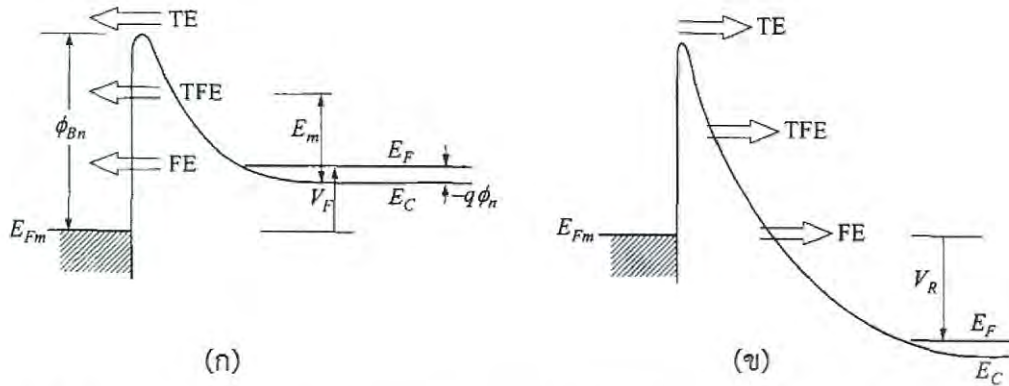
$$\text{ความชัน} = E_a$$

จะได้

$$E_a = 1.293 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

จากค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1.293 อิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

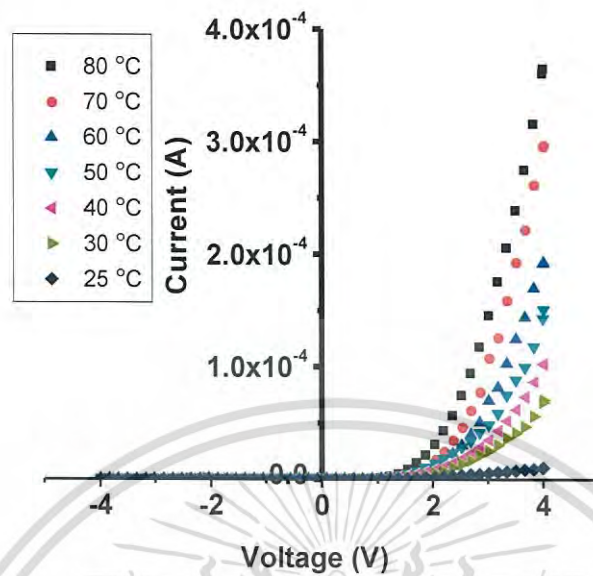


รูปที่ 4.32 แสดงแผนภาพกลไกเทอร์มอไดนามิกส์ (TE) กลไกเทอร์มอไดนามิกส์ฟิล์มอิมิตชัน (TFE) และกลไกฟิล์มอิมิตชัน (FE) ที่บริเวณรอยต่อขดตักที่ภายใต้ไบแอสตรงและไบแอสกลับทาง [12]

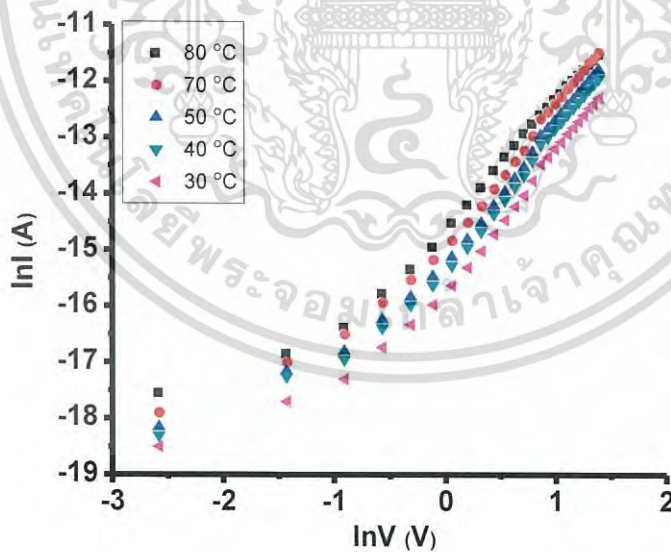
4.2.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธี การระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -4 ถึง 4 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลง ตามอุณหภูมิที่ลดลงแสดงดังรูปที่ 4.33 และ ค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) สามารถศึกษาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ โดยสามารถแบ่งกลไกการนำไฟฟ้าได้เป็นสองช่วง คือ กลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มอไดนามิกส์และกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและสามารถหาค่าแพกเตอร์อุดมคติ และ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตชันย้อนกลับ ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V เพื่อนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล และในการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม จะใช้วิธีของชวงโดยค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตชันย้อนกลับ ค่าแพกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกส์ และวิธีของชวงแสดงในตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

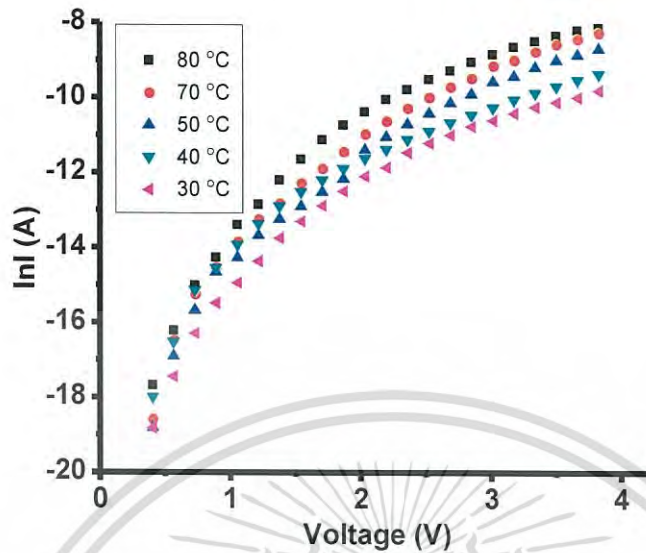


รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

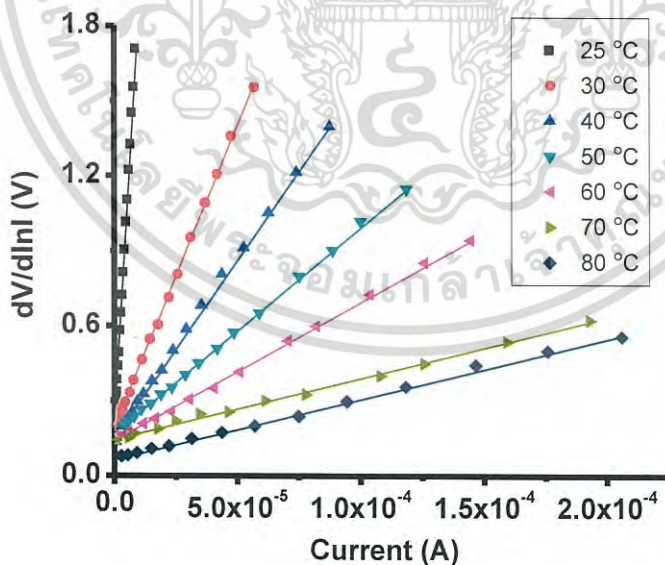


รูปที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

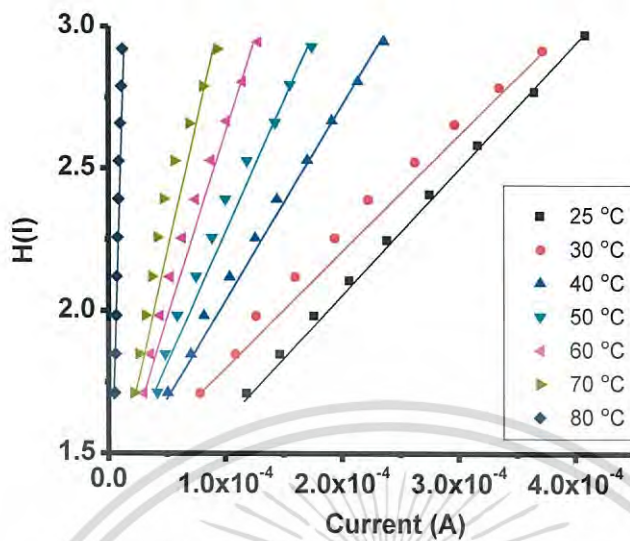


รูปที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า I ที่อธิบายวิธีของชวง (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I โดยวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริสพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแพกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริสพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Temperature (K)	Saturation Current (I_S)	Ideality Factor (n)		Barrier Height (eV)		Series Resistance (Ω)	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	$dV/d(\ln I)-I$	I-V	$H(I)-I$	$H(I)-I$	$dV/d(\ln I)-I$
298	6.88×10^{-10}	16.30	8.93	0.71	0.62	2.57×10^4	2.46×10^4
303	4.47×10^{-10}	7.04	7.75	0.65	0.58	2.10×10^4	1.93×10^4
313	6.49×10^{-9}	7.96	6.06	0.49	0.46	1.47×10^4	1.44×10^4
323	3.02×10^{-9}	5.95	6.08	0.36	0.3	1.07×10^4	8.37×10^3
333	1.79×10^{-9}	4.42	4.93	0.27	0.22	7.89×10^3	5.62×10^3
343	1.64×10^{-9}	4.29	5.03	0.25	0.16	5.64×10^3	2.41×10^3
353	2.94×10^{-8}	4.9	2.35	0.12	0.09	5.10×10^3	2.41×10^3

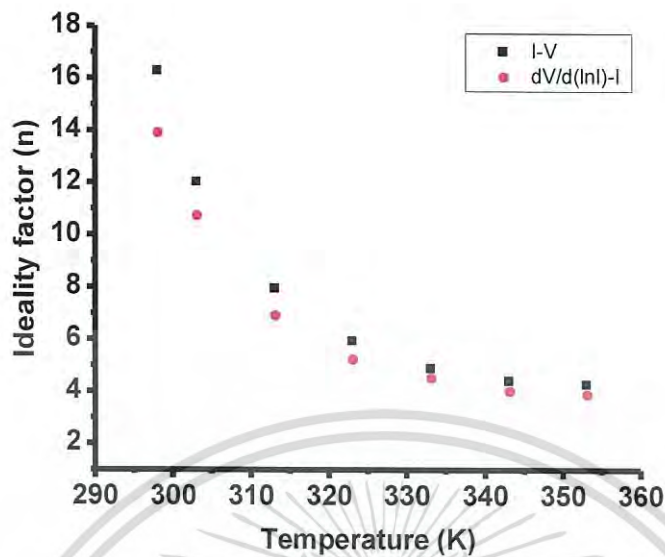
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

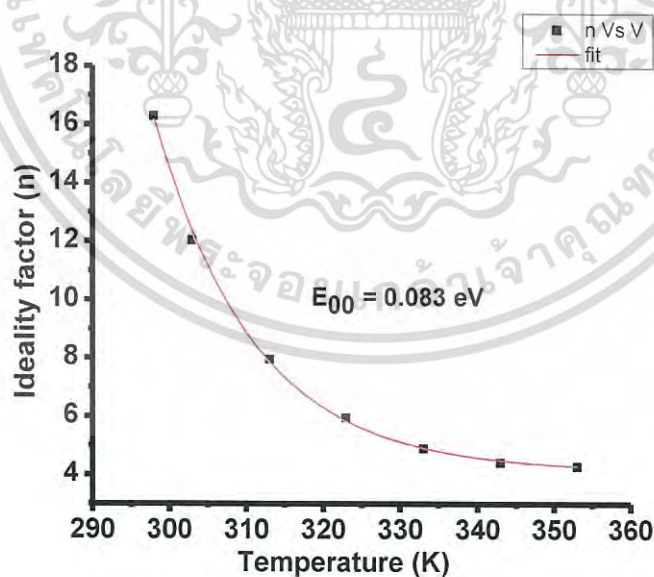
จากผลการทดลองตารางที่ 4.4 จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิมิตด้วยอันกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนค่าแพกเตอร์อุตมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มियोอนิกอิมิตชันและวิธีของชวงมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงและมีลักษณะไม่เป็นกราฟเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.38

ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มियोอนิกอิมิตชันและวิธีของชวงมีค่าลดลงตามค่าอุณหภูมิที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.40 ส่วนค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกับกลไกเทอร์มियोอนิกอิมิตชัน

การที่ค่าแพกเตอร์อุตมคติ และ ค่าความสูงกำแพงศักย์ ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ขอตต์ก็มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิมีค่าสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้พาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไปอัสไปหน้าหรือพลังงานกระตุ้นจากภายนอกเพียงเล็กน้อย พาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์มีค่ามาก และ ค่าแพกเตอร์อุตมคติที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังงานของพาหะอิสระมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อที่พาหะจะไหลข้ามกำแพงศักย์ ซึ่งกำแพงศักย์ที่สามารถข้ามได้นั้นก็เป็นกำแพงศักย์ที่มีค่าน้อยเนื่องจากไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำพบว่า ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าน้อยและค่าแพกเตอร์อุตมคติจะมีค่ามาก ที่อุณหภูมิสูงพาหะอิสระที่สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าต่ำก็ยังมีอยู่ แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานที่สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้

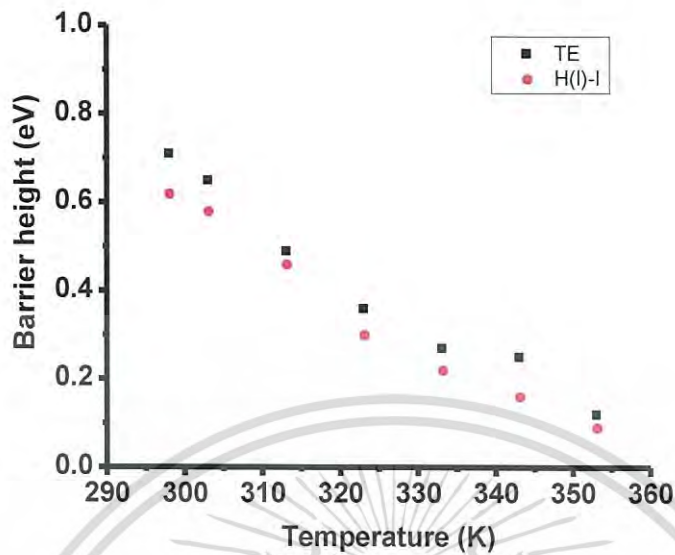


รูปที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอนุกรมที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอนุกรม เมื่อทำการ วัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธ พันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

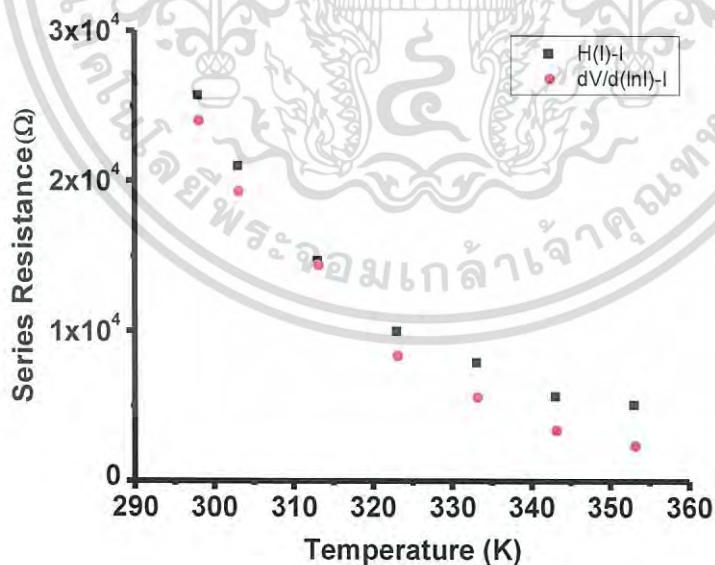


รูปที่ 4.39 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอนุกรม เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่ง เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

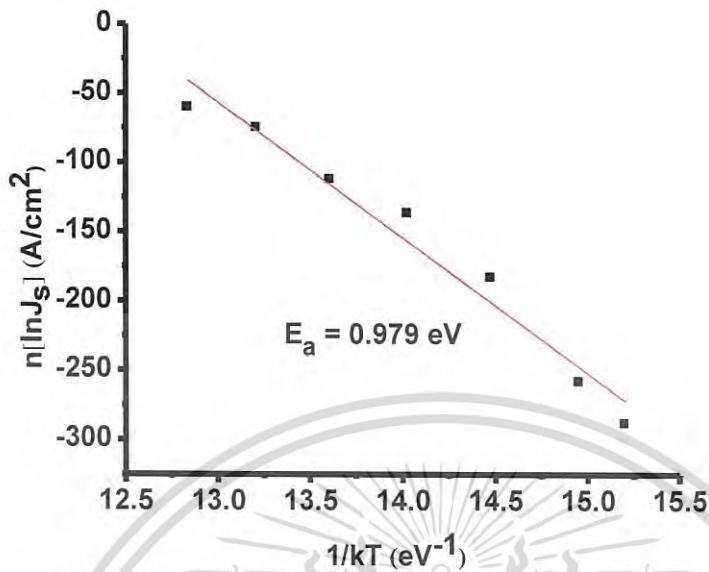


รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่ได้จาก วิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอด ที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n \ln |J_s|$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 25-80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ สามารถนำไปหาค่า E_{00} ได้จากความสัมพันธ์

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

โดย E_{00} คือ ค่าลักษณะเฉพาะของค่าพลังงานการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ที่ได้จากรูปที่ 4.39 จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงมีค่าเท่ากับ 0.083 และ 0.081 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ

จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.42 สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อได้จากสมการที่ (4.14)

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

พลังงานกระตุ้น E_a หาได้จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.41

ดังนั้น

$$\text{ความชัน} = E_a$$

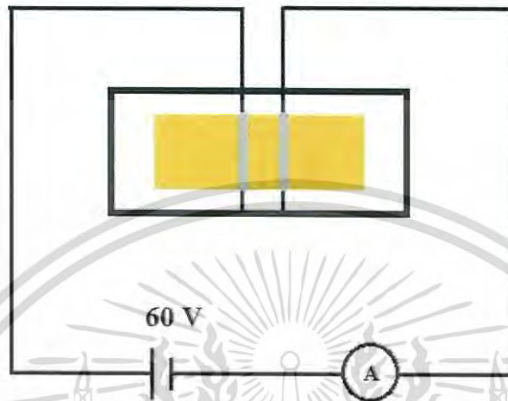
จะได้

$$E_a = 0.979 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

จากค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.979 อิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 4.43 แสดงวงจรที่ใช้ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

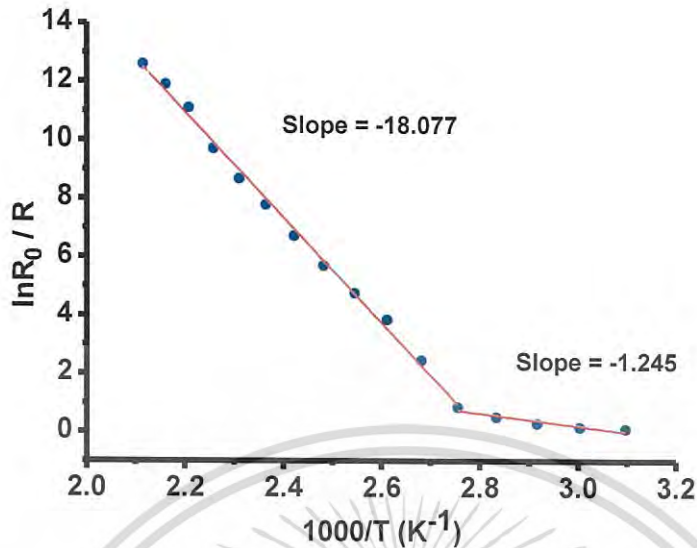
จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าโดยให้ค่าแรงดันไฟฟ้า คงที่ 60 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศแสดงผลการทดลองได้ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ 60 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

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

จากผลการทดลองการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ดังตารางที่ 4.3 สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(R_0/R)$ กับ 1000/T ดังรูปที่ 4.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln R_0/R$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ ในช่วง 25 – 200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบลงบน แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln R_0/R$ กับ $1000/T$ สามารถนำมา คำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ได้จากสมการ

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

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

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

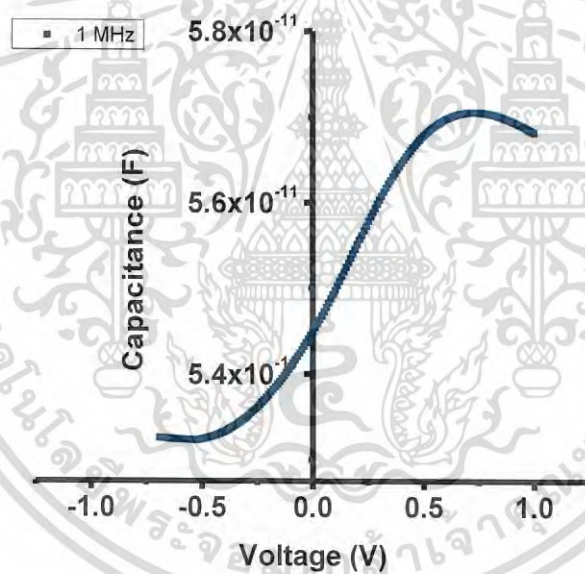
$$E_a = 1.557 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

ดังนั้น ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe มีค่าเท่ากับ 1.557 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 0.107 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

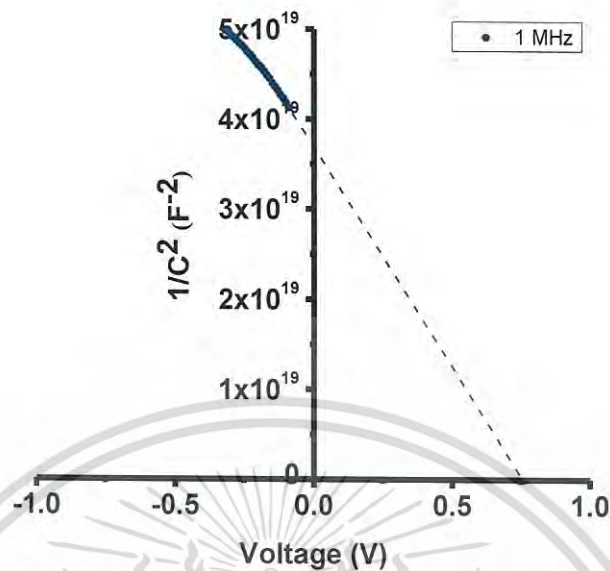
ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) แสดงได้ดังรูปที่ 4.45 พบว่าที่ แรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสย้อนกลับที่มากขึ้น และสำหรับกรณีไบแอสไปข้างหน้า ค่าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะลดลงซึ่งจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเนื่องจากการฉีตพาหะอิสระจำนวนมากผ่านรอยต่อจนเสมือนว่ารอยต่อพี - เอ็น นั้นหายไปชั่วขณะ



รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.45 นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสอง กับ แรงดันไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 4.46 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C^{-2} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบ สูญญากาศ

จากรูปที่ 4.46 เลือกช่วงที่มีความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้นแล้วลากเส้นตรง ลง มาตัดแกนของ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยจุดตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า คือ ซึ่งก็คือค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม ของรอยต่อ (V_j) มีค่าเท่ากับ 0.75 โวลต์ และ ค่าความชันสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.17 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 ϵ_s คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำโดย $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0 = 7.611 \times 10^{-13}$ F/cm โดยที่ ϵ_r คือ ค่าไดอิเล็กตริกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe มีค่า เท่ากับ 8.6 และ ϵ_0 คือค่าเพอิมิตติวิตีของสภาวะสูญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.8540×10^{-14} ฟารัดต่อ เซนติเมตร โดยจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.17 จะเลือกเอาส่วนที่เป็นกราฟเส้นตรง ในช่วงไบแอส ย้อนกลับในช่วง -0.6 ถึง -0.2 โวลต์ จากนั้นทำการลากเส้นตรงลงมาตัดกับแกนนอน หรือแกนของค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะได้ค่า V_j ที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) คือ

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

ส่วนค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้สามารถคำนวณหาได้จากค่าความชันจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าของสมการที่ (4.17) คือ

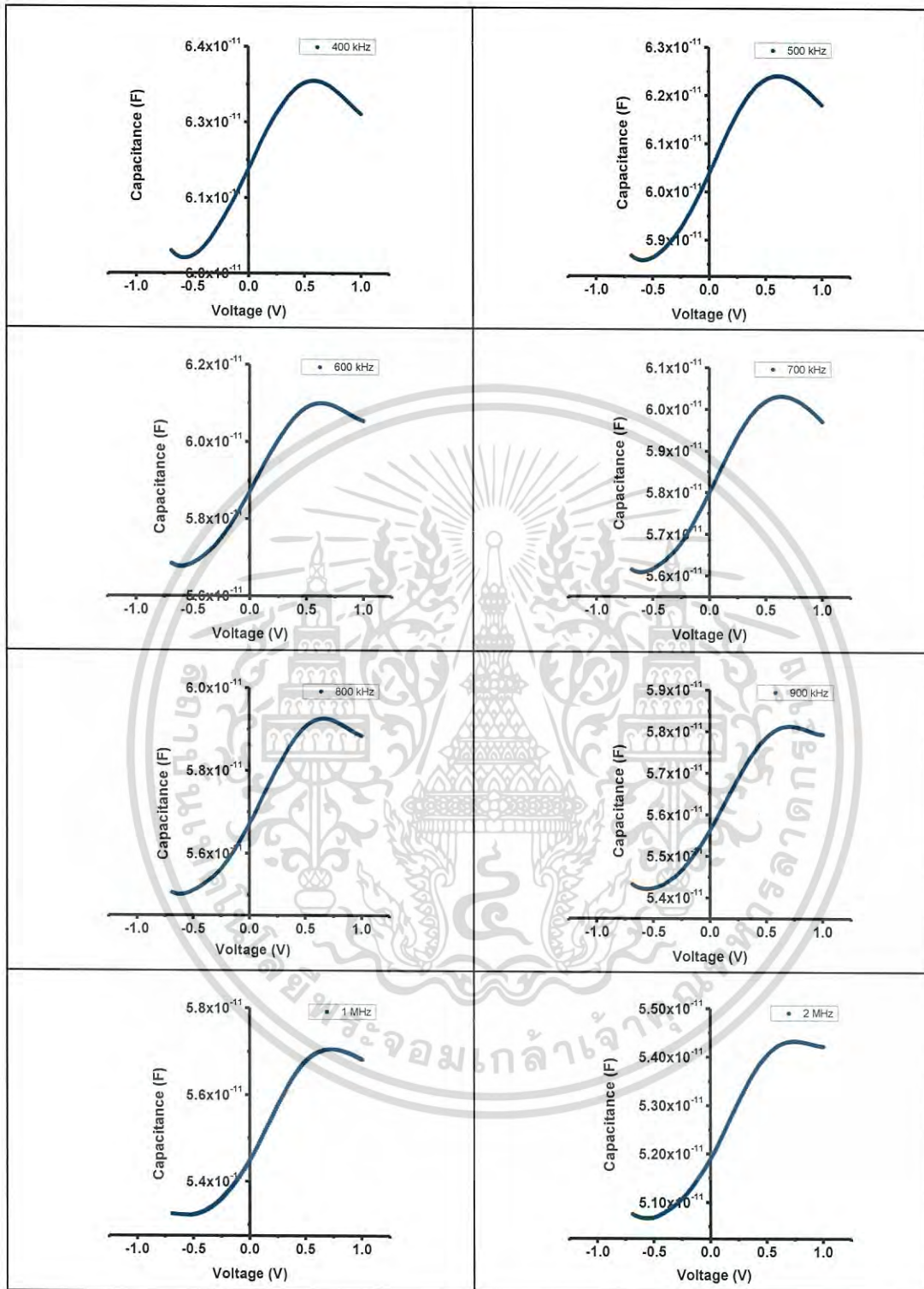
$$\text{ความชัน} = \frac{2}{q\epsilon_s N_d A^2} \quad (4.20)$$

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

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.21 จะได้ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ที่มีค่าเท่ากับ 3.16×10^{13} ลูกบาศก์เซนติเมตร

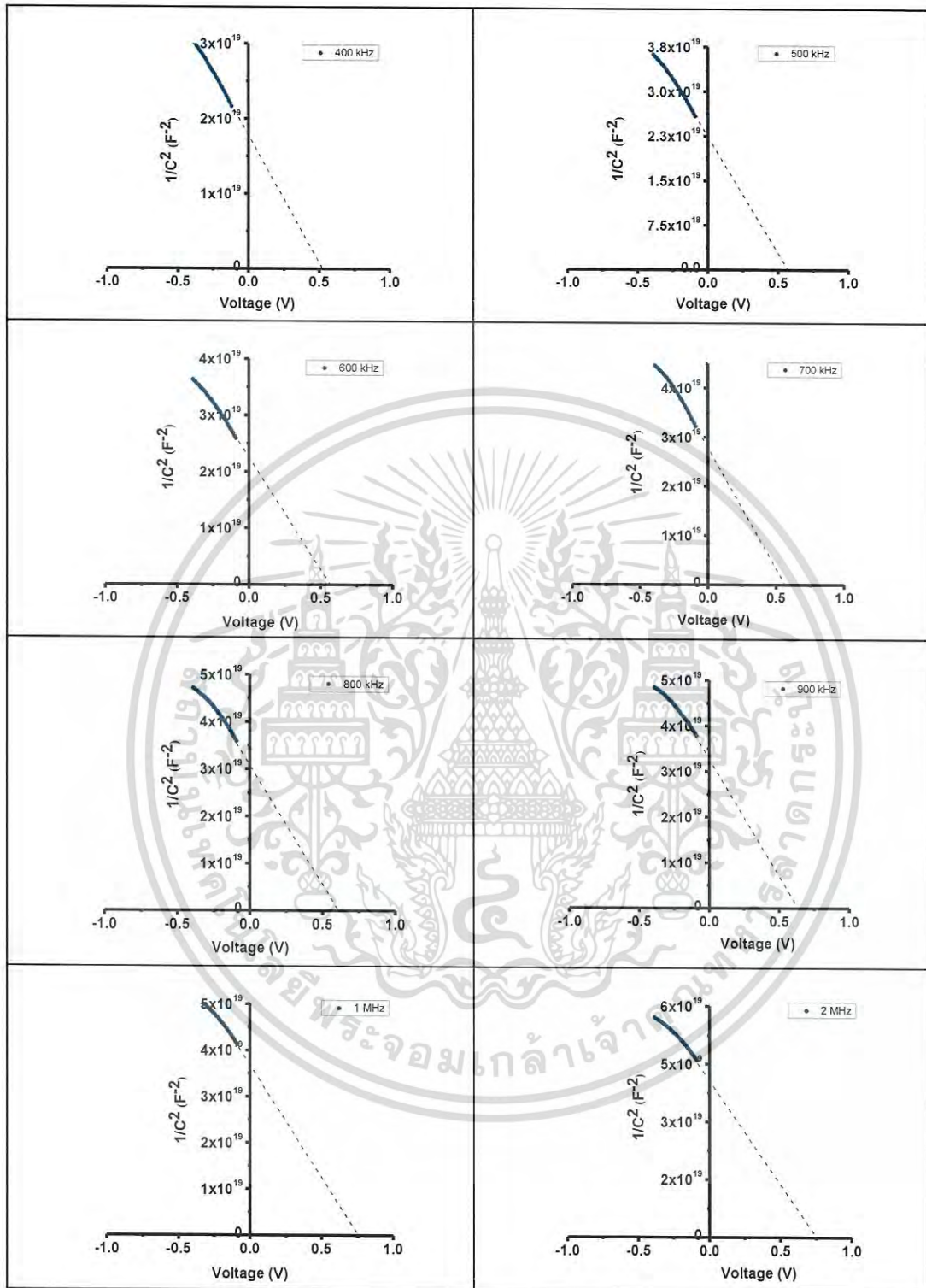
จากความสัมพันธ์ $E_c - E = kT \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right)$ เมื่อ N_c และ N_d ของ ZnSe เท่ากับ 1.31×10^{18} และ 3.16×10^{13} ลูกบาศก์เซนติเมตร จะทำให้ได้ว่า ระดับเฟอร์มิอยู่ต่ำกว่าขอบล่างสุดของแถบนำ เท่ากับ 0.28 อิเล็กตรอนโวลต์

4.2.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 400 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



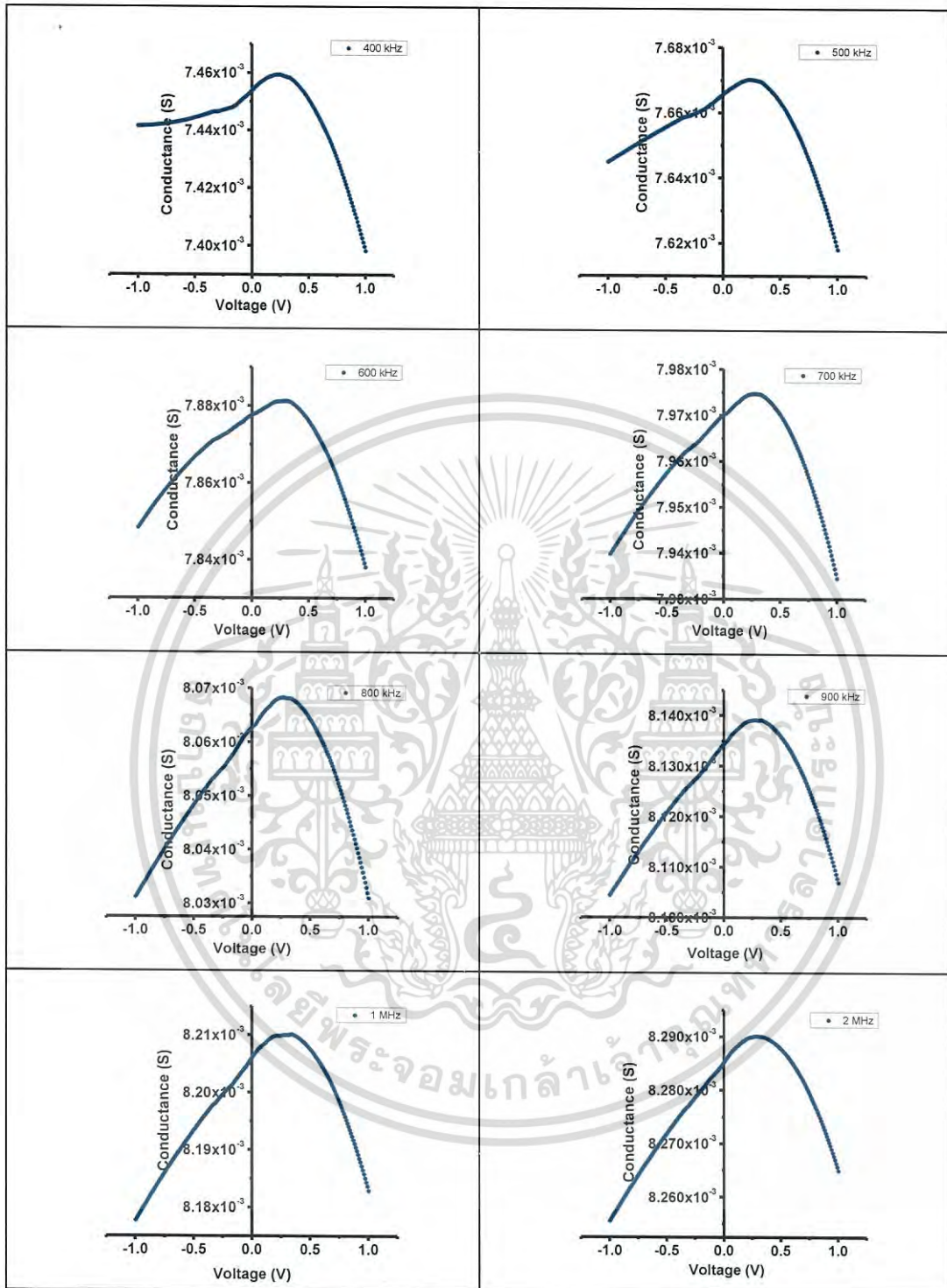
รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัด ในช่วงความถี่ 400 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อ แบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการ ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



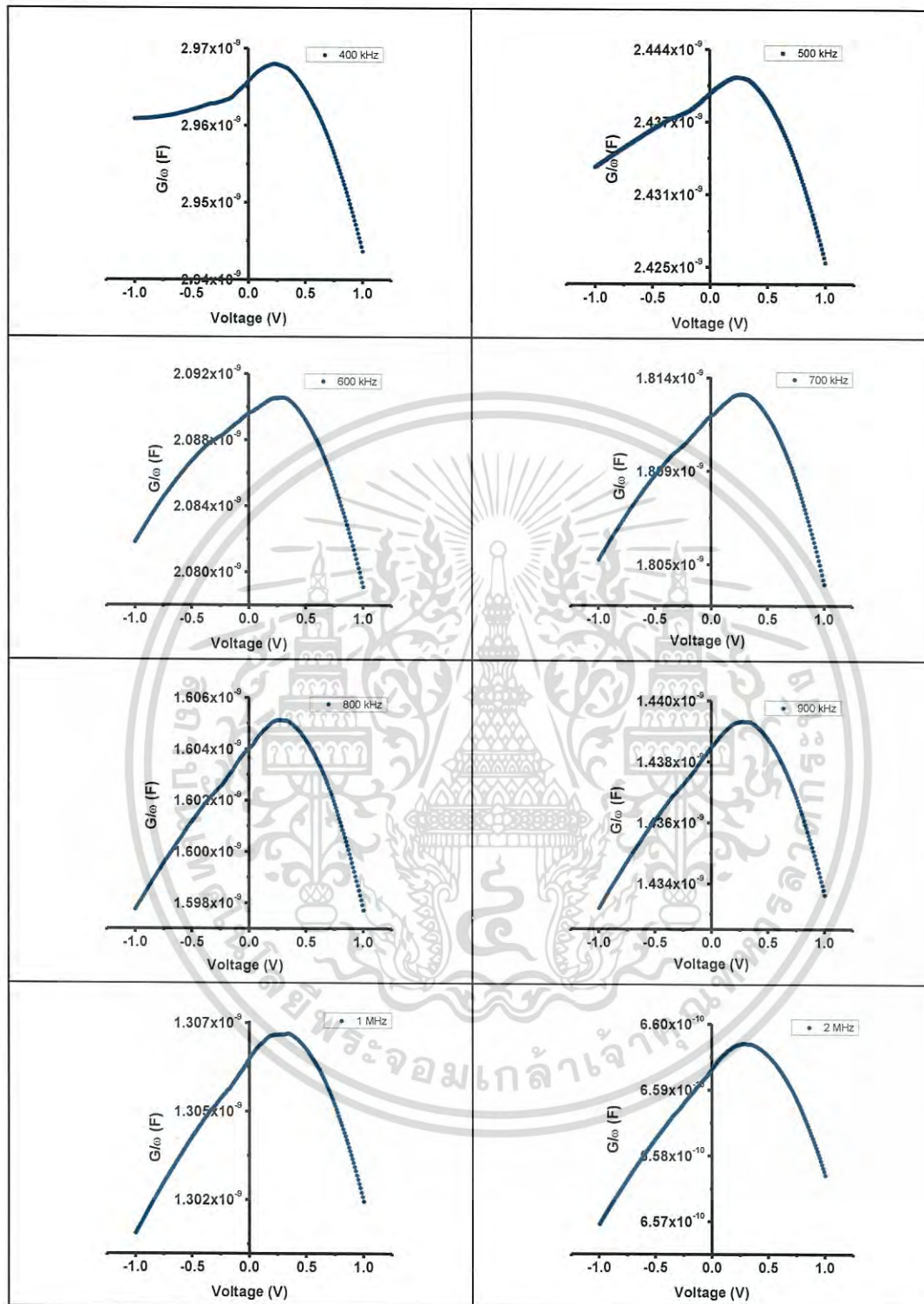
รูปที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C^{-2} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 400 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้า กับแรงดัน เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 400 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับแรงดัน เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 400 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาในขั้นตอนนี้จะเป็นการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ค่าความถี่ที่ตั้งแต่ 400 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่ากราฟของความจุไฟฟ้ากับแรงดันไบแอสในช่วง -1 ถึง 1 โวลต์ นั้นมีลักษณะเป็นกราฟพระฆังคว่ำตามแบบพฤติกรรมของความจุตัวเก็บประจุแบบรอยต่อพีเอ็น และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นกราฟความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้ากับแรงดันนั้นลดลงตามความถี่ที่สูงขึ้นตามรูปที่ 4.47 เนื่องจากที่ความถี่สูงขึ้นกับดักประจุจะตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลัปได้น้อย ส่วนรูปที่ 4.49 นั้นจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับแรงดันซึ่งจะพบว่าในช่วงความถี่ที่ 400 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ นั้นมีลักษณะเป็นกราฟพระฆังคว่ำ และจุดสูงสุดของกราฟจะมีค่าลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น จะพบว่าค่าความต้านทานอนุกรมยังขึ้นกับแรงดันไบแอสและความถี่ด้วย สำหรับในขณะที่มีการไบแอสกลับทาง กระแสอิมิต์ย้อนกลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสกลับทางที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากกราฟความสัมพันธ์ของ G/ω นี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นของกักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-ZnSe/p-Si}$ (100) ซึ่งตั้งสมมุติฐานได้ว่ามีชั้นบางๆของสารกึ่งตัวนำของ Si คั่นอยู่

สำหรับกรณีไบแอสให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขสะสมนุพพาหะ (accumulation condition) ซึ่งได้พิจารณาที่แสงพิจารณาที่แรงดันไบแอสตรงเท่ากับ 1 โวลต์ ความหนาแน่นของสภาวะผิวเชื่อมต่อ (N_{ss}) ความสัมพันธ์ของฮิลล์-โคลแมน (Hill-Coleman relation) คือ

$$N_{ss} = \frac{\left(\frac{G}{\omega}\right)_{\max}}{\left(\frac{G_{\max}}{\omega C_{ox}}\right)^2 + \left(1 - \frac{G_{\max}}{\omega C_{ox}}\right)^2} \quad (4.22)$$

โดยทั่วไป

$$\left(\frac{G_{\max}}{\omega C_{ox}}\right)^2 + \left(1 - \frac{G_{\max}}{\omega C_{ox}}\right)^2 \approx 0.8$$

ดังนั้น

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \left(\frac{G_p}{\omega}\right)_{\max} \quad (4.23)$$

สำหรับ

$$C_{ox} = C_{ma} \left[1 + \frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}}\right]^2 \quad (4.24)$$

โดยค่า C_{ma} คือ ค่าความจุของเงื่อนไขสะสมนุพพาหะ เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ จะได้ว่า

$$C_{ox} \approx C_{ma}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 4.6

ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ หาได้จากสมการ

$$N_d = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 (\text{slope})}$$

ดังนั้น

$$N_d = \frac{2}{(1.6 \times 10^{-19})(8.05 \times 10^{-13})(0.0314)^2 (3.833 \times 10^{18})}$$

จะได้

$$N_d = 5.07 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

ระดับพลังงานเฟอร์มิ หาได้จากสมการ

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right)$$

ดังนั้น

$$E_F = \frac{(4.14 \times 10^{-21})}{1.6 \times 10^{-19}} \ln \left(\frac{1.31 \times 10^{18}}{5.07 \times 10^{15}} \right)$$

จะได้

$$E_F = 0.1437 \text{ eV}$$

ความสูงกำแพงศักย์ หาได้จากสมการ

$$\phi_{b(C-V)} = V_{bi} + E_f - \Delta\phi_b$$

ดังนั้น

$$\phi_{b(C-V)} = 0.782 + (0.1437) - 2.024$$

จะได้

$$\phi_{b(C-V)} = 0.8689 \text{ eV}$$

สนามไฟฟ้าสูงสุดในรอยต่อขอตติ์ หาได้จากสมการ

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_i}{\epsilon_s} \right]^{\frac{1}{2}}$$

ดังนั้น

$$E_m = \left[\frac{2(1.6 \times 10^{-19})(5.07 \times 10^{15})(0.757)}{(8.053 \times 10^{-13})} \right]^{\frac{1}{2}}$$

จะได้

$$E_m = 3.88 \times 10^4 \text{ F/C}$$

กำแพงศักย์ที่ลดลงเนื่องจากผลของขอตติ์ หาได้จากสมการ

$$\Delta\phi_b = \left[\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s} \right]^{\frac{1}{2}}$$

ดังนั้น

$$\Delta\phi_b = \left[\frac{(1.6 \times 10^{-19})(3.88 \times 10^4)}{4\pi(8.053 \times 10^{-13})} \right]^{\frac{1}{2}}$$

จะได้

$$\Delta\phi_b = 2.478 \text{ eV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ หาได้จากสมการ

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V)}{qN_D}}$$

ดังนั้น

$$W_D = \sqrt{\frac{2(8.053 \times 10^{-13})(0.782 - 0)}{(1.6 \times 10^{-19})(5.07 \times 10^{15})}}$$

จะได้

$$W_D = 3.86 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

ศักย์ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง ZnSe หาได้จากสมการ

$$\Psi_s = \frac{qN_D W_D^2}{2\epsilon_s}$$

ดังนั้น

$$\Psi_s = \frac{(1.6 \times 10^{-19})(5.07 \times 10^{17})(3.86 \times 10^{-6})^2}{2(8.053 \times 10^{-13})}$$

จะได้

$$\Psi_s = 0.757 \text{ eV}$$

ความต้านทานอนุกรม หาได้จากสมการ

$$R_s = \frac{G}{G^2 + (\omega C)^2}$$

ดังนั้น

$$R_s = \frac{8.183 \times 10^{-3}}{(8.183 \times 10^{-3})^2 + ((6.23 \times 10^6)(5.68 \times 10^{-11}))^2}$$

จะได้

$$R_s = 121.976 \text{ } \Omega$$

ความหนาแน่นของกัปดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ หาได้จากสมการ

$$N_{ss} = \frac{2.5}{A} \left(\frac{G_{it}}{\omega} \right)_{\max}$$

ดังนั้น

$$N_{ss} = \frac{2.5}{0.0314} (8.294 \times 10^{10})_{\max}$$

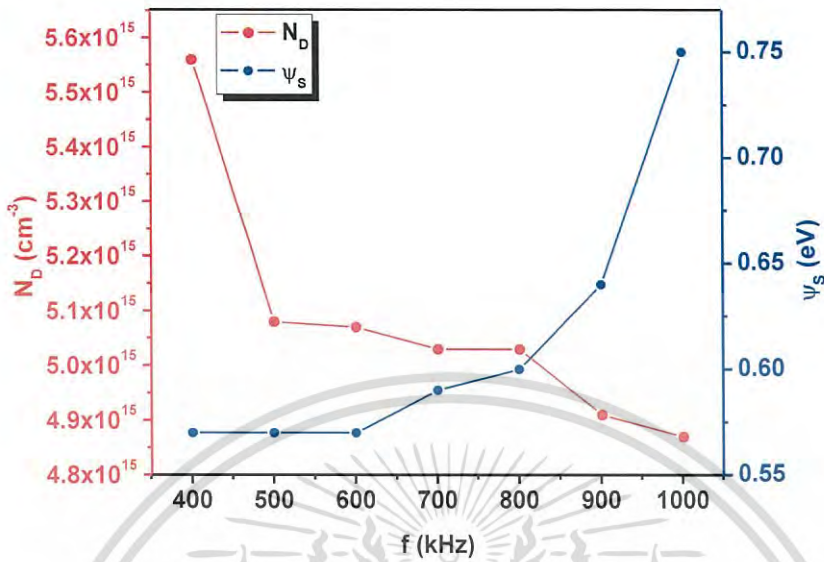
จะได้

$$N_{ss} = 6.50 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$$

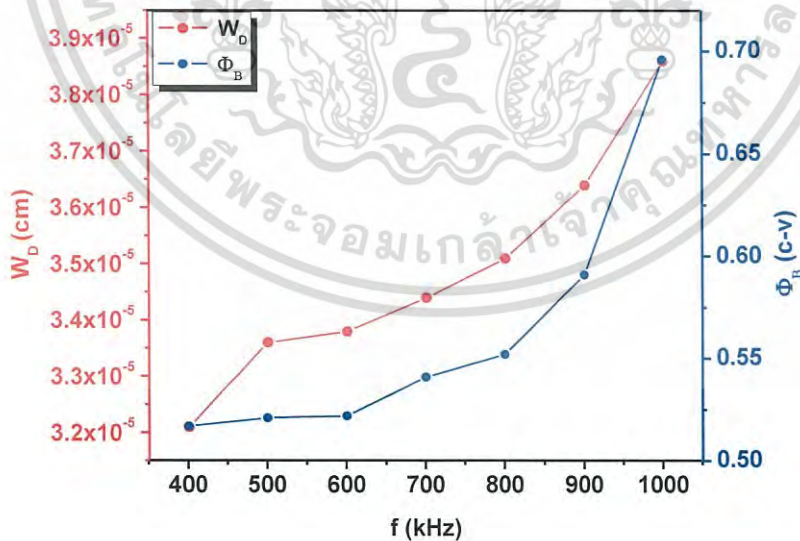
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกับค่าความจุไฟฟ้าสูงสุด ค่าจินตภาพของความจุไฟฟ้าสูงสุด และความหนาแน่นของกับดักในผิวเชื่อมต่อ ที่ทำได้ จากผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้าเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 400 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

f (kHz)	N_b (cm^{-3})	V_i (Volt)	E_F (eV)	ϕ_b (eV)	$\Delta\phi_b$ (meV)	W_b (cm)	ψ_s (eV)	C_m (F)	$(G/\omega)_{\text{max}}$	R_s (Ω)	N_{ss} ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$)
400	5.56×10^{15}	0.571	0.1431	0.6876	2.368	3.21×10^{-5}	0.571	6.38×10^{-11}	2.97×10^{-9}	135.10	1.48×10^{12}
500	5.08×10^{15}	0.574	0.1437	0.6905	2.315	3.36×10^{-5}	0.574	6.24×10^{-11}	2.44×10^{-9}	131.18	1.21×10^{12}
600	5.03×10^{15}	0.579	0.1439	0.8908	2.309	3.38×10^{-5}	0.579	6.10×10^{-11}	2.09×10^{-9}	127.47	1.04×10^{12}
700	5.03×10^{15}	0.590	0.1443	0.7106	2.329	3.44×10^{-5}	0.590	6.03×10^{-11}	1.81×10^{-9}	125.89	9.02×10^{11}
800	4.91×10^{15}	0.610	0.1445	0.7212	2.326	3.51×10^{-5}	0.610	5.93×10^{-11}	1.61×10^{-9}	124.34	7.98×10^{11}
900	4.87×10^{15}	0.642	0.1447	0.7611	2.359	3.64×10^{-5}	0.642	5.81×10^{-11}	1.44×10^{-9}	123.14	7.16×10^{11}
1000	5.07×10^{15}	0.757	0.1437	0.8689	2.478	3.86×10^{-5}	0.757	5.71×10^{-11}	1.31×10^{-9}	121.97	6.50×10^{11}
2000	4.75×10^{15}	0.759	0.1454	0.8709	2.439	3.99×10^{-5}	0.759	5.43×10^{-11}	6.60×10^{-9}	120.17	3.28×10^{11}

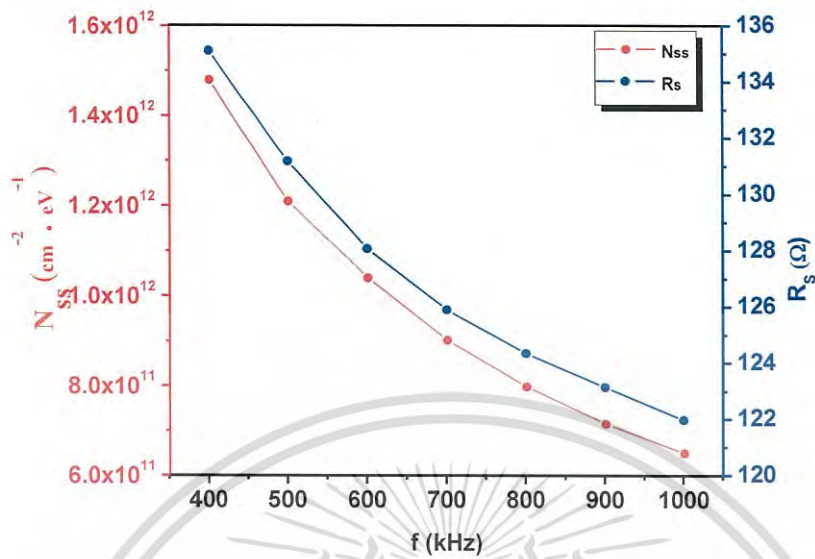


รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารเจือ (N_D) และ ศักย์ที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ (ψ_s) กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ (W_D) และ ความสูงก้ำแพงศักย์ (Φ_B) กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกักประจุที่เชื่อมต่อผิว (N_{ss}) และ ความต้านทานอนุกรม (R_s) กับความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เมื่อทำการวัดค่าความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการจ่ายค่าแรงดันไบแอสด้วยค่าต่างๆ ตั้งแต่ -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ พบว่าในกราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ ค่าของความจุไฟฟ้านั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่จนถึงช่วงความถี่ ประมาณ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ จะเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วและจะคงที่ที่ค่าเข้าใกล้ศูนย์ในช่วง ประมาณ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และเมื่อมีการไบแอสด้วยแรงดัน -0.3 โวลต์ ไปจนถึง 0.3 โวลต์ จะเห็นว่าตัวกราฟจะเลื่อนไปทางด้านความถี่ที่สูงขึ้นเล็กน้อยตามรูปที่ 4.55 ส่วนทางด้านรูปที่ 4.56 นั้นจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับความถี่ที่มีการจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ พบว่าความนำไฟฟ้านั้นมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ในช่วงที่สูงกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ขึ้นไปจนถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และตัวกราฟก็จะเลื่อนไปยังด้านที่มีความถี่สูงขึ้น เมื่อมีการไบแอสแรงดันมากขึ้นเช่นกัน โดยขึ้นกับสมการความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวเชื่อมต่อที่ว่าเมื่อมีระดับพลังงานของกักมีเพียงค่าเดียว (single trap)

$$C_p = C_D + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (4.25)$$

โดย $C_{it} = qD_{it}$ และ $\omega\tau = 1$

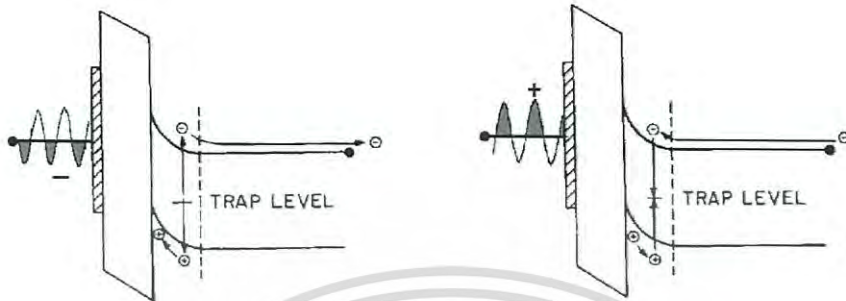
และถ้ากรณีที่กักมีการกระจายตัวกันแบบต่อเนื่อง (continuous trap) จะได้ว่า

$$C_p = C_D + \frac{C_{it} \arctan(\omega\tau_{it})}{\omega\tau_{it}} \quad (4.26)$$

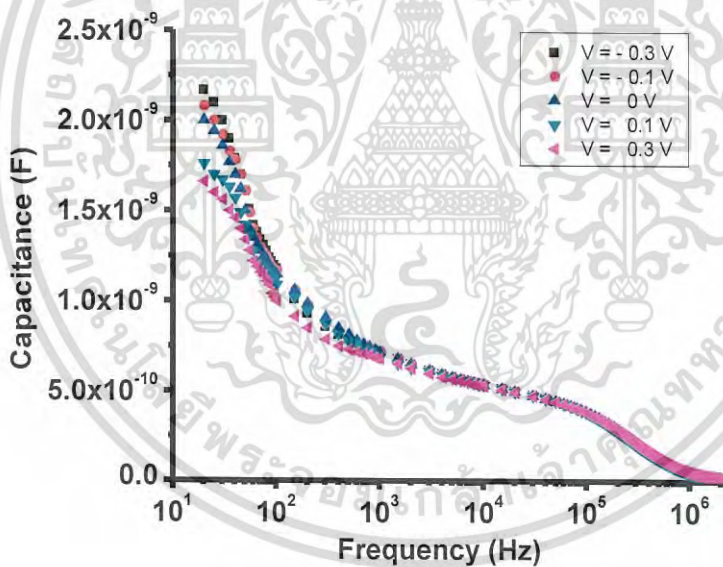
เมื่อ C_D คือความจุไฟฟ้าที่บริเวณพร่องพาหะ ส่วน C_{it} คือ ความจุไฟฟ้าของกักตักประจุ โดย $C_{it} = qD_{it}$ และ $\omega\tau = 1.98$ พฤติกรรมการจับและคายประจุของตัวเก็บประจุภายในบริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นจะเป็นดังรูปที่ 4.54 คือ เมื่อมีสัญญาณโวลต์ที่มีค่าความถี่ต่ำเข้ามาสู่รอยต่อ แบบ MIS อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในกักจะถูกเหนี่ยวนำให้หลุดออกจากกักแล้วเคลื่อนที่ไปยังบริเวณด้านนอกของบริเวณพร่องพาหะ และจะเหนี่ยวนำให้โฮลมาชุมนุมกันที่บริเวณรอยต่อของชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ และเมื่อได้รับสัญญาณโวลต์เข้ามาอีเล็กตรอนที่อยู่บริเวณด้านนอกของบริเวณพร่องพาหะจะถูกดึงเข้ามายังกักตักประจุในบริเวณพร่องพาหะส่วนโฮลที่บริเวณรอยต่อของชั้นฉนวนและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำจะถูกผลักกลับไปสู่กับดักเช่นเดิมโดยกระบวนการดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆไปมาอยู่เสมอ เมื่อมีการจ่ายสัญญาณไฟสลับที่มีค่าความถี่ต่ำให้กับรอยต่อ [16]

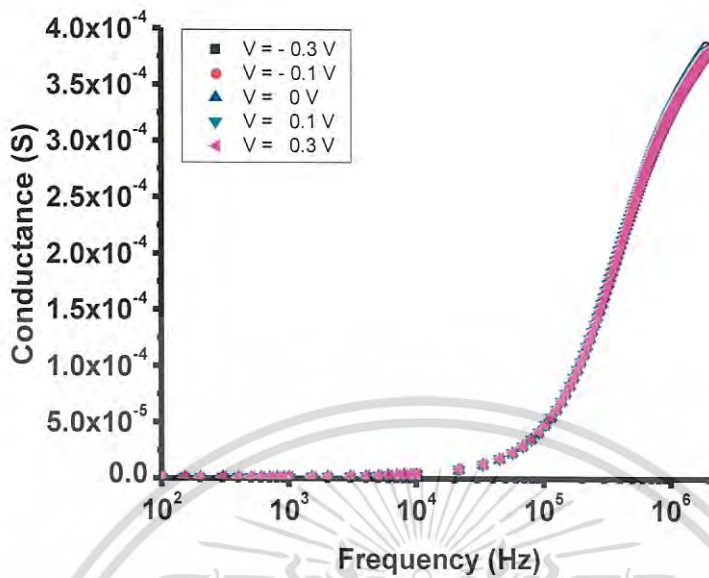


รูปที่ 4.54 แสดงการจับและคายประจุของกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสิ่งประดิษฐ์ MIS ที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่ำ



รูปที่ 4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-ZnSe/p-Si}$ (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เมื่อนำเอาข้อมูลของความนำไฟฟ้าที่วัดได้มาหารด้วยความถี่เชิงมุม ($2\pi f$) แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับความถี่ที่มีการไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ดังรูปที่ 4.57 จะเห็นว่ากราฟของค่า G/ω จะมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ ในช่วงความถี่สูงกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป ส่วนในช่วงที่ต่ำกว่า 10 กิโลเฮิร์ตซ์นั้นจะเป็นเส้นโค้งลงเชื่อมต่อเป็นหางของกราฟระฆังคว่ำ โดยจุดสูงสุดของกราฟระฆังคว่ำนั้นหมายถึงจุดที่มีค่าความถี่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติที่ทำให้พาหะ สามารถหลุดออกจากกับดักได้ หรือจะอธิบายได้อีกอย่างว่า ณ จุดความถี่ที่เกิดค่า G/ω สูงสุดนั้น คือความถี่ที่สอดคล้องกับพลังงานที่สัญญาณไฟสลับลูบสูญเสียไปเพื่อทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากกับดักประจุ ซึ่งจะนำมาใช้ในการหาค่า ความหนาแน่นของกับดักและช่วงชีวิตของพาหะที่ระดับพลังงานต่างๆได้ ซึ่งจะสัมพันธ์กับสมการที่ว่า

เมื่อกับดักประจุมีระดับพลังงานเพียงค่าเดียว (single trap)

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \omega \tau_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (4.27)$$

จะสามารถหาความหนาแน่นของกับดักประจุได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_{it} = \frac{2}{qA} \left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max}$$

และถ้ากรณีที่กับดักมีการกระจายตัวกันแบบต่อเนื่อง (continuous trap) จะได้ว่า

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \ln(1 + \omega^2 \tau_{it}^2)}{2\omega \tau_{it}} \quad (4.28)$$

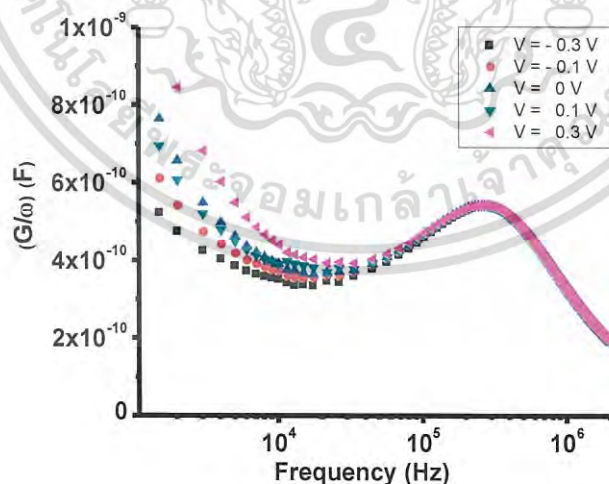
จะจากความสัมพันธ์ของนิโคลเลียนและบริว (Nicollian-Brew relation) สามารถหาความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อจะหาได้จากสมการ

$$D_{it} \approx \frac{2.5}{qA} \left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max}$$

ระดับพลังงานของกับดักพาหะที่ผิวเชื่อมต่อเมื่อเทียบกับขอบล่างสุดของแถบนำจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$E_C - E_{SS} \equiv q(\phi_B - V)$$

จากรูปที่ 4.57 แสดงให้เห็นว่ามีกับดักพาหะที่ผิวเชื่อมต่อสองชนิดคือกับดักพาหะที่ผิวเชื่อมต่อชนิดจับพาหะได้ช้า (slow interface trap) และกับดักพาหะที่ผิวเชื่อมต่อชนิดจับพาหะได้เร็ว (fast interface trap)

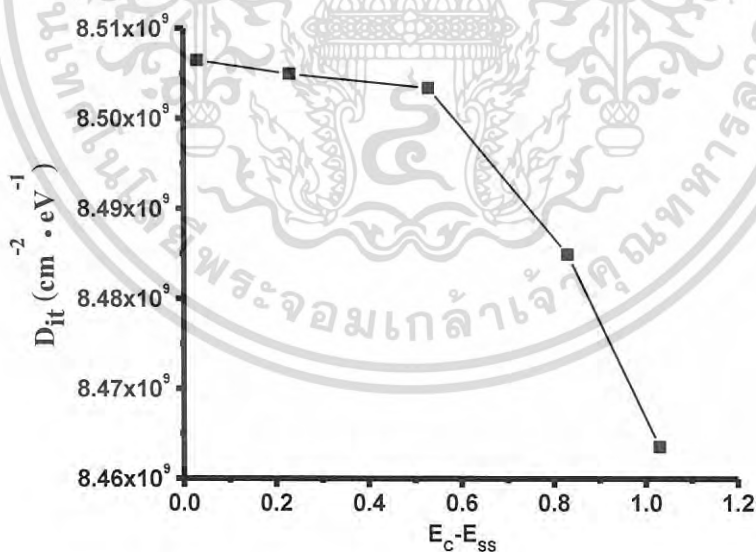


รูปที่ 4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

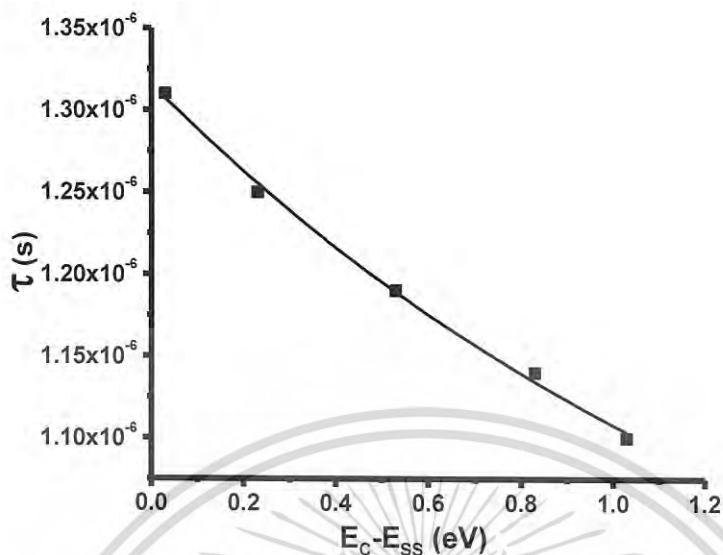
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความถี่ที่สอดคล้องกับค่าจินตภาพของค่าความจุไฟฟ้า และความหนาแน่นของกับดักที่ผิวเชื่อมต่อ และช่วงชีวิตของพาหะที่ขึ้นกับพลังงาน ที่หาได้จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Bias Voltage(V)	f_m (Hz)	$(G/\omega)_{\max}$ (F)	E_c-E_{ss} (eV)	D_{it} ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$)	τ (μs)
-0.3	2.88×10^5	5.41×10^{-4}	1.03	8.46×10^{11}	1.09
-0.1	2.76×10^5	5.44×10^{-4}	0.83	8.48×10^{11}	1.14
0	2.64×10^5	5.44×10^{-4}	0.53	8.50×10^{11}	1.19
0.1	2.52×10^5	5.43×10^{-4}	0.23	8.50×10^{11}	1.24
0.3	2.41×10^5	5.44×10^{-4}	0.03	8.51×10^{11}	1.30



รูปที่ 4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อชนิดช่วงจับพาหะได้เข้ากับพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



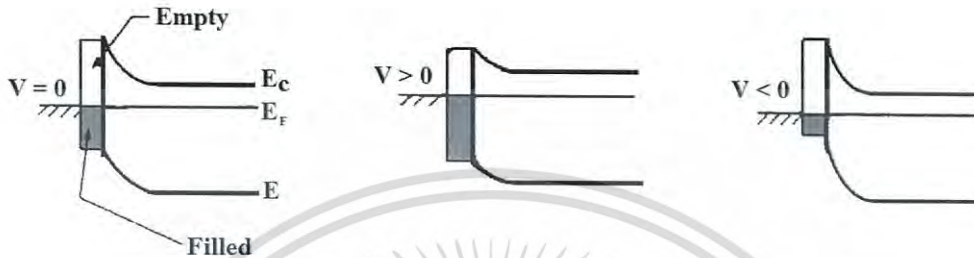
รูปที่ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่วงชีวิตของพาหะกับพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากผลที่ได้จากการคำนวณดังที่แสดงในตารางที่ 4.7 จะได้ว่าเมื่อ $E_c - E_{ss}$ มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วความหนาแน่นของกักจะมีค่าลดลง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.58 จะสามารถสรุปได้ว่ากักที่ผิวเชื่อมต่อชนิดจับพาหะได้เร็วนี้จะอยู่กันอย่างหนาแน่นที่บริเวณขอบล่างของแถบนำแล้วจะค่อยๆลดลงตามระดับพลังงานที่เลื่อนออกห่างจากแถบนำมากขึ้น ซึ่งจะรวมไปถึงช่วงชีวิตของพาหะก็จะลดลงตามระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยที่ช่วงชีวิตพาหะคำนวณได้จากความสัมพันธ์ $\omega\tau = 1.98$ [16]

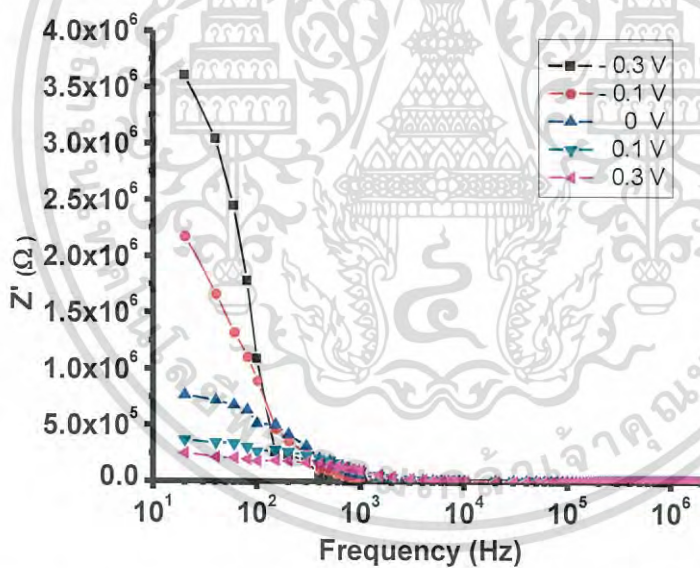
จากการศึกษาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าเทียบกับความถี่เมื่อทำการจ่ายแรงดันในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ จะสรุปได้ว่าแรงดันไฟฟ้านั้นมีอิทธิพลต่อระดับเฟอร์มิซึ่งจะเลื่อนขึ้นหรือลงตามค่าแรงดันที่ไบแอสระดับพลังงานของกัก ณ จุดที่ระดับเฟอร์มิซ้อนทับนั้นจะส่งผลให้กับกักที่อยู่บริเวณนั้นแสดงอิทธิพลออกมาโดยการจับและปล่อยพาหะได้โดยต้องทำการป้อนความถี่ค่าหนึ่งที่สูงสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของกักนั้นๆ จากกราฟความสัมพันธ์ของค่า G/ω กับความถี่ดังรูปที่ 4.57 นั้นแสดงถึงกักสองประเภทคือประเภทกักพาหะที่ผิวเชื่อมต่อที่ตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่ที่ต่ำมากๆ (slow interface trap) อิเล็กตรอนจะมีช่วงชีวิตยาวซึ่งจะเห็นจากเส้นโค้งที่เป็นส่วนหางของกราฟรูประฆังคว่ำ โดยส่วนที่จุดสูงสุดของกราฟรูประฆังคว่ำจะแสดงถึงกักพาหะที่ผิวเชื่อมต่อที่ตอบสนองได้ดีในช่วงความถี่สูงๆ (fast interface trap) อิเล็กตรอนจะมีช่วงชีวิตสั้น ความหนาแน่นของกักพาหะที่ผิวเชื่อมต่อชนิดจับพาหะได้เร็วเทียบกับขอบล่างสุด

ของแถบนำจะแสดงดังรูปที่ 4.58 มีค่าความหนาแน่นอยู่ในระดับ 10^{11} ต่อตารางเซนติเมตร ต่ออิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนช่วงชีวิตพาหะมีค่าอยู่ในช่วง 1.09-1.30 ไมโครวินาที ดังรูปที่ 4.60

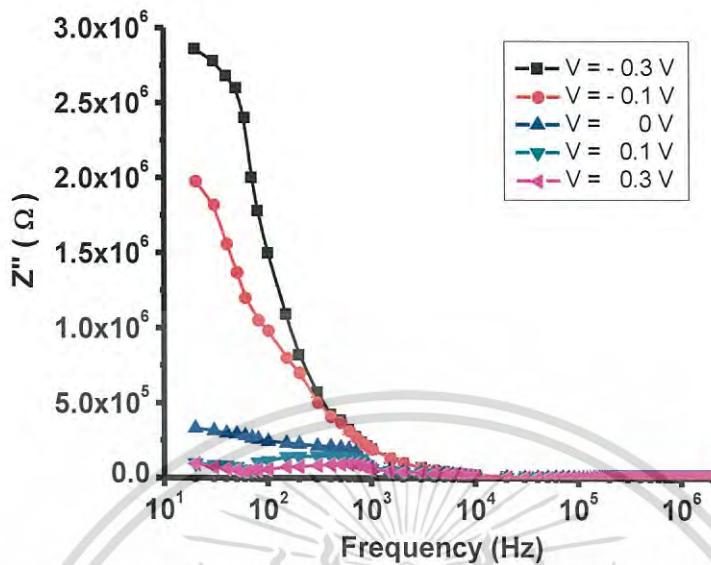
สำหรับกับดักพาหะที่ผิวเชื่อมชนิดจับได้ช้า จะตอบสนองต่อความถี่ในย่านกิโลเฮิรตซ์ ซึ่งค่าชีวิตพาหะจะอยู่ในช่วง 0.16-0.95 มิลลิวินาที ดังปรากฏในตารางที่ 4.8



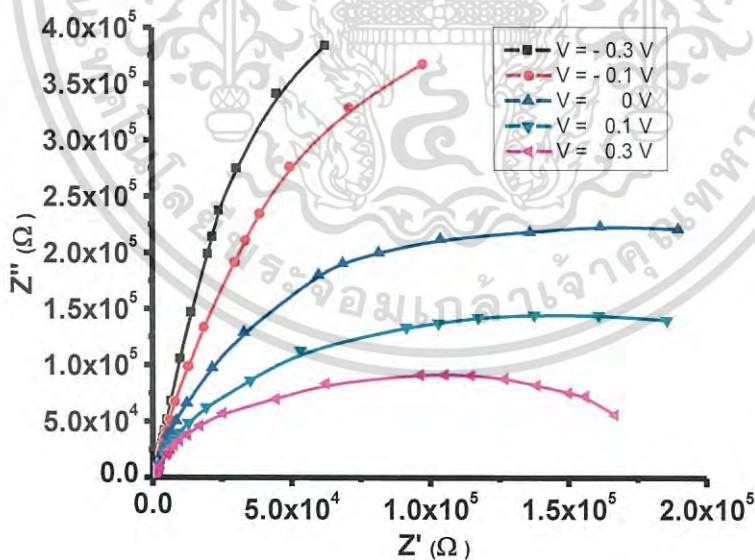
รูปที่ 4.60 แสดงระดับเฟอร์มีที่เลื่อนขึ้นลงตามแรงดันไบแอส



รูปที่ 4.61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

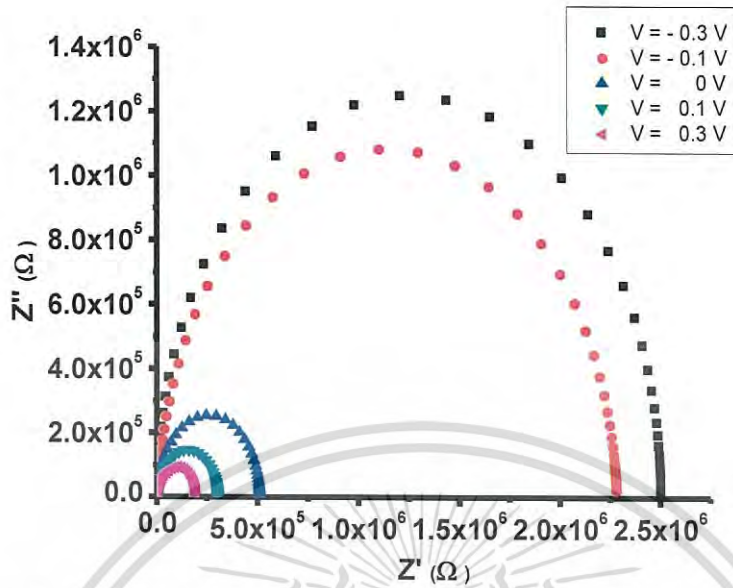


รูปที่ 4.62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



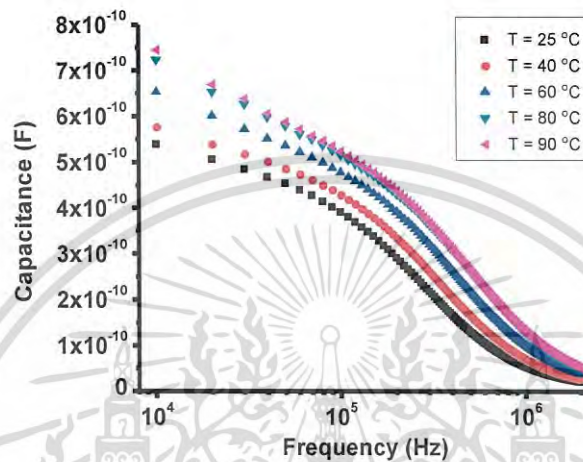
รูปที่ 4.64 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 โวลต์ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-ZnSe/p-Si (100)}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนภายใต้การวัดในช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-ZnSe/p-Si (100)}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

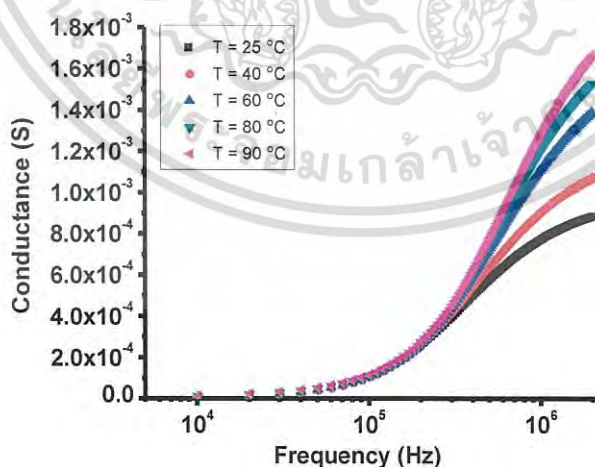
Bias Voltage	Extracted Parameters								
	R_s (Ω)	CPE			C_p (F)	τ (s)	f_{\max} (Hz)	ω_{\max} (rad/s)	$\omega_{\max} * \tau$
		R_p (Ω)	P ($S \cdot s^{-n}$)	n					
-0.3	1950	2.55×10^6	3.70×10^{-11}	0.99	3.74×10^{-11}	9.53×10^{-4}	1.63×10^2	1.02×10^3	0.97
-0.1	1810	1.40×10^6	4.99×10^{-11}	0.97	5.14×10^{-11}	7.20×10^{-4}	2.17×10^2	1.36×10^3	0.98
0	1750	6.00×10^5	6.00×10^{-11}	0.98	6.12×10^{-11}	3.67×10^{-4}	4.18×10^2	2.62×10^3	0.96
0.1	1660	3.30×10^5	7.40×10^{-11}	0.97	7.63×10^{-11}	2.52×10^{-4}	5.99×10^2	3.76×10^3	0.95
0.3	930	2.00×10^5	8.00×10^{-11}	0.99	8.08×10^{-11}	1.62×10^{-4}	9.79×10^2	6.15×10^3	0.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริทพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

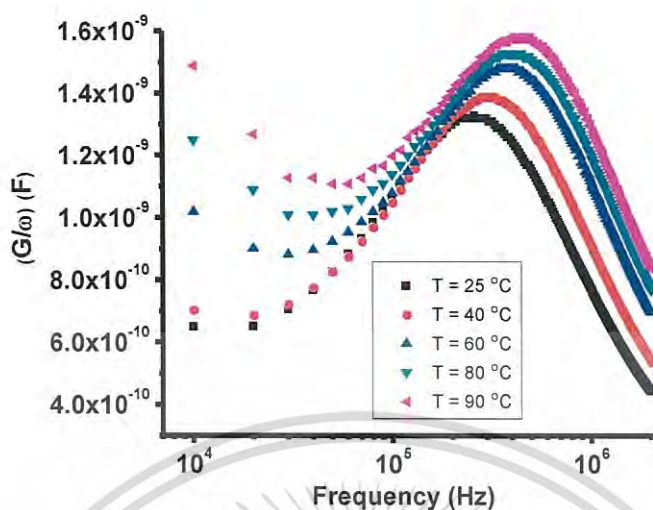


รูปที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริทพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริทพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ในหัวข้อนี้จากการศึกษาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วงอุณหภูมิต่างๆตั้งแต่ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดนั้นจะมีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น รูปที่ 4.65 ซึ่งกรณีความหนาแน่นของกัปดักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน ความจุของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่วัดได้คือ C_p จะสอดคล้องกับความสัมพันธ์

$$C_p = C_D + \frac{C_{it} \tan^{-1}(\omega\tau_{it})}{\omega\tau_{it}}$$

เมื่อ C_D คือ ความจุไฟฟ้าที่บริเวณพร่องพาหะ ส่วน C_{it} คือความจุไฟฟ้าของกัปดักประจุ รูปที่ 4.66 ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของความนำไฟฟ้ากับความถี่พบว่าความนำไฟฟ้านั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของ จอนเชอร์ (Joncher relation) คือ [35]

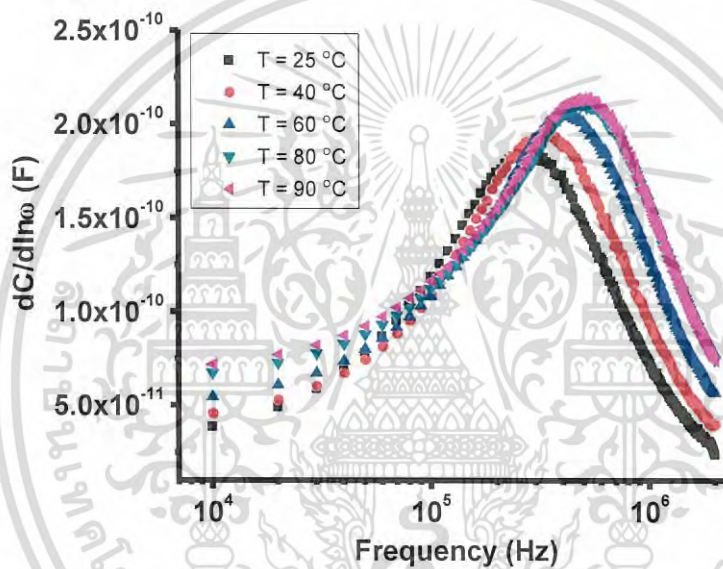
$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^s$$

เมื่อ A คือค่าคงที่ ส่วนเลขยกกำลัง s จะมีค่าน้อยกว่า 1 และนอกจากนี้เมื่อนำค่าความนำไฟฟ้าที่วัดได้มาเขียนเป็นกราฟของค่า G/ω กับความถี่ก็ยังคงแสดงให้เห็นช่วงของการตอบสนองของกัปดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อกับความถี่เป็นสองช่วงได้อย่างชัดเจนโดยค่าความถี่เชิงมุมที่สอดคล้องกับ

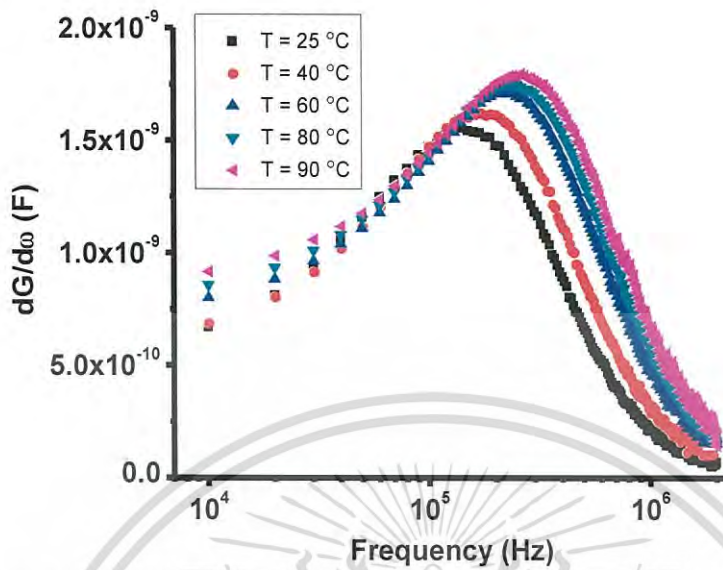
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่เฉพาะที่ทำให้โอเล็กตรอนหลุดออกจากกัก (ω_0) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

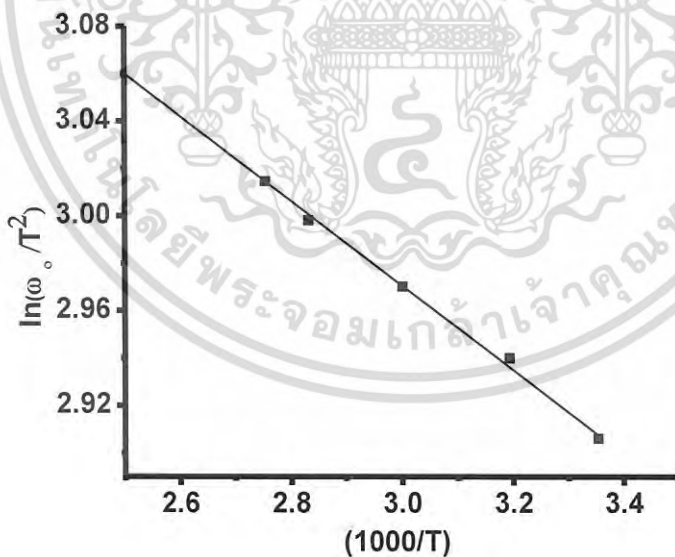
การหาค่าความถี่เฉพาะ (ω_0) นอกจากความสัมพันธ์ของ G/ω กับความถี่แล้วก็ยังสามารถหาได้หลายวิธีด้วยกันโดยเริ่มจากการหาอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับลอการิทึมของความถี่เชิงมุมจะทำให้ช่วงจุดเปลี่ยนโค้งของค่าความจุกลายเป็นจุดสูงสุดของรูปที่ 4.68 และในรูปที่ 4.69 จะเป็นการหาค่าอนุพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าเทียบกับความถี่เชิงมุมซึ่งจะได้รูปภาพที่มีลักษณะคล้ายกันแต่จะสังเกตเห็นจุดสูงสุดได้ชัดเจนกว่ากราฟอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งค่า ω_0 ที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงดังที่แสดงในตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dC/d\ln(\omega)$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

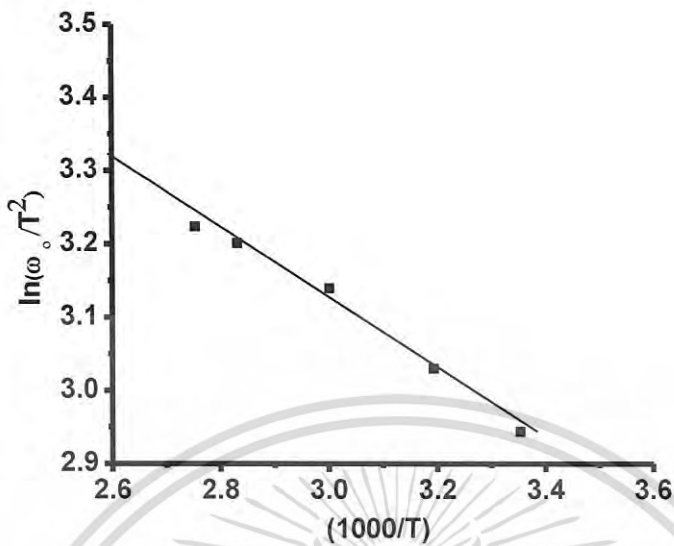


รูปที่ 4.69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dG/d\omega$ กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

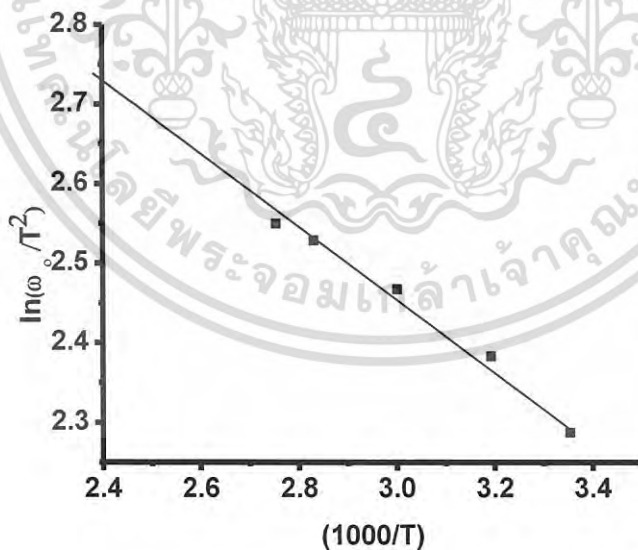


รูปที่ 4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ $dC/d\ln(\omega)$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวีวีพีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ $dG/d\omega$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวีวีพีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่า ω_0 จากค่าอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าเทียบกับความถี่เชิงมุมแล้วนั้น จะสามารถหาค่าของพลังงานกระตุ้นได้จากความชันของของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิซึ่งจะมีที่มาจากสมการ

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (4.29)$$

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงจะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln\xi_0 \quad (4.30ก.)$$

และเพื่อให้ง่ายในการคำนวณก็นำสมการที่ (4.30) มาปรับปรุงใหม่จะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln\xi_0 \quad (4.30ข.)$$

จุดตัดแกน y นั้นจะได้ค่า $\ln\xi_0$ แล้วจะสามารถหา ξ_0 ได้ และสามารถหาค่า σ_T ได้จากสมการความสัมพันธ์

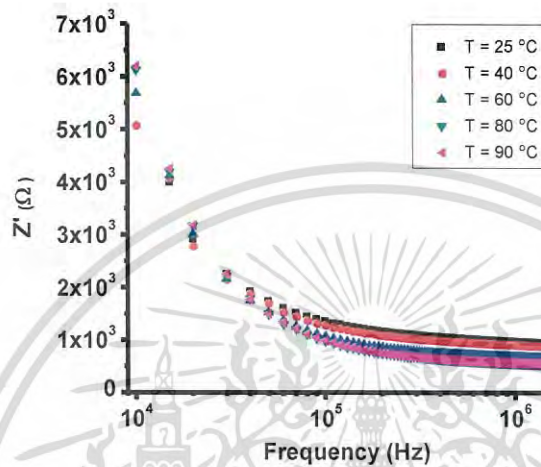
$$\begin{aligned} \xi_0 &= 2\sigma_T v_{th} N_c \\ \sigma_T &= \frac{\xi_0}{2v_{th} N_c} \end{aligned} \quad (4.31)$$

เมื่อ ξ_0 คือพารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิ ส่วน σ_T คือ พื้นที่ภาคตัดขวางในการวิจัยอิเล็กตรอนของกับดักประจุ

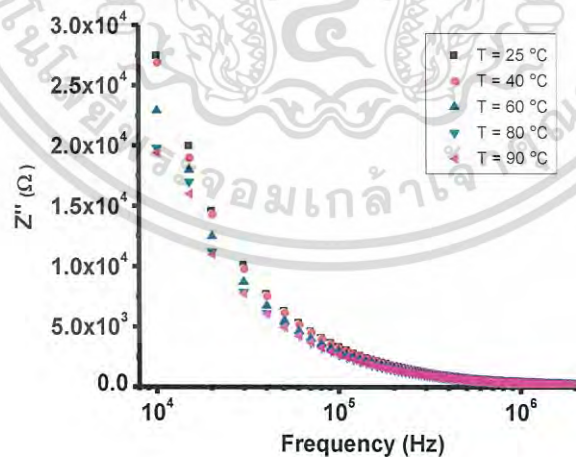
ค่าพลังงานกระตุ้น E_a สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $1,000/T$ ซึ่ง ω_0 สามารถหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ก็จะพบอีกว่าทุกวิธีนั้นสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้มีค่าใกล้เคียงกันมากแต่ค่าของ ξ_0 และ σ_T นั้นมีความแตกต่างกันค่อนข้างมากโดยค่า ξ_0 ที่ได้จากวิธีการหาอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับค่าลอการิทึมของความถี่เชิงมุมซึ่งมีค่าอยู่ที่ 81.532 ต่อวินาทีเคลวินยกกำลังสอง ($s^{-1}K^{-2}$) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.9 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 - 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

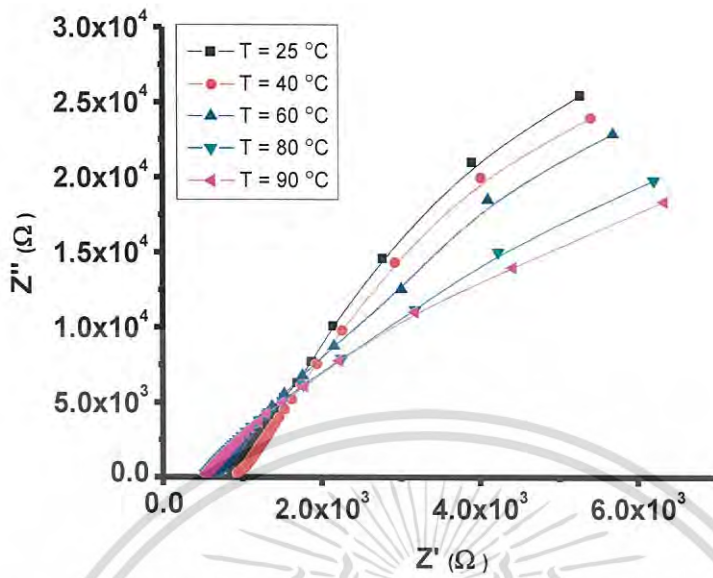


รูปที่ 4.73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงกับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จะได้กราฟรูปครึ่งวงกลมที่เทียบเคียงกับข้อมูลที่ได้จากการวัดมาก โดยจะขึ้นกับสมการ [32]

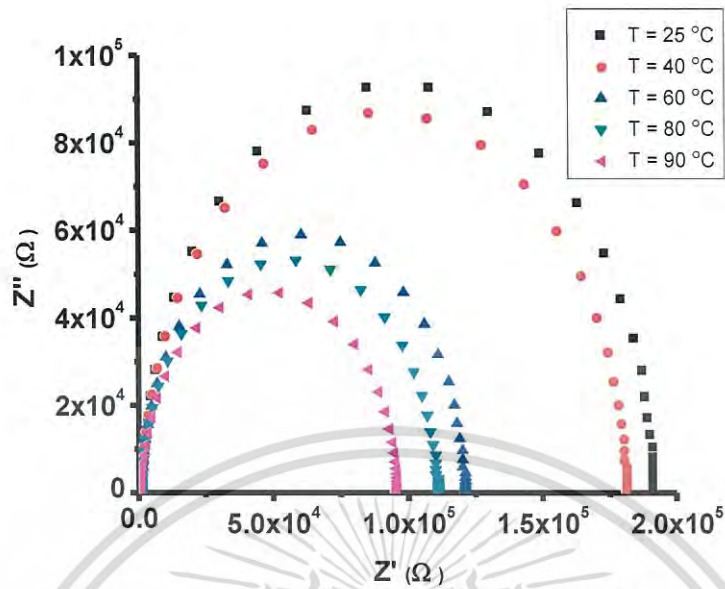
$$\left[Z' - \left(R_s + \frac{R_p}{2} \right) \right]^2 + [Z'']^2 = \left(\frac{R_p}{2} \right)^2 \quad (4.32)$$

ก็จะสามารถหาค่าความจุของรอยต่อแล้วนอกจากนี้ยังหาค่าความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดได้จากกราฟที่ได้จากการจำลองนี้อีกด้วย และเมื่อนำกราฟที่ได้จากการจำลองค่ามาพล็อตรวมกันตามรูปที่ 4.76 จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และค่าความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะเลื่อนไปทางด้านความถี่ที่สูงขึ้นตามอุณหภูมิเช่นกัน ส่วนในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อจะได้จากสมการ

$$C_p = \frac{(PR_p)^{1/n}}{R_p} \quad (4.33)$$

ช่วงชีวิตของพาหะจะหาได้จากสมการ $\tau = R_p C_p$ และค่าความถี่เชิงมุมที่สอดคล้องกับอิมพีแดนซ์สูงสุดจะได้ว่า $\omega = 2\pi f_{\max}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

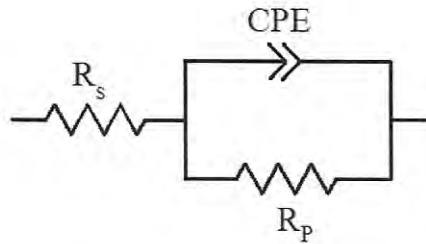


รูปที่ 4.76 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

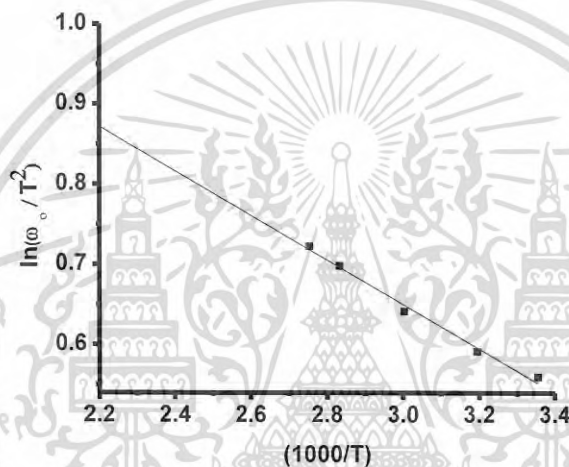
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Temperature (°C)	Extracted Parameters								
	R_s (Ω)	CPE			C_p (F)	τ (s)	f_{max} (Hz)	ω_{max} (rad/s)	$\omega_{max} * \tau$
		R_p (Ω)	P (S·s ⁻ⁿ)	n					
25	1300	1.90×10^5	2.91×10^{-9}	0.99	2.94×10^{-11}	5.58×10^{-2}	2.60×10^4	1.63×10^5	0.91
40	980	1.80×10^5	2.99×10^{-9}	0.98	3.05×10^{-11}	5.49×10^{-2}	2.60×10^4	1.63×10^5	0.90
60	850	1.20×10^5	3.20×10^{-9}	0.98	3.27×10^{-11}	3.92×10^{-2}	3.35×10^4	2.11×10^5	0.82
80	750	1.10×10^5	3.40×10^{-9}	0.97	3.51×10^{-11}	3.86×10^{-2}	4.32×10^4	2.71×10^5	1.05
90	600	9.50×10^4	3.80×10^{-9}	0.97	3.92×10^{-11}	3.72×10^{-2}	4.32×10^4	2.71×10^5	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.77 แสดงวงจรสมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัดค่าค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.78 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0 / T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่า R_s และ R_p มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ เมื่อ R_p ลดลงแล้ว τ ($\tau = R_p C$) จะมีค่าลดลงจึงส่งผลให้ค่าความถี่เชิงมุม (ω) มีค่าสูงขึ้นและท้ายที่สุดยังสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้โดยใช้วิธีการเดียวกันกับการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ตามสมการที่ (4.30ก.) และสมการ (4.30ข.) ตามที่เคยเสนอไปในหัวข้อที่แล้ว และเมื่อนำค่าที่คำนวณได้จากวิธีการต่างๆมาสรุปตามตารางที่ 4.10 จะพบว่าค่าที่ได้จากการศึกษาอิมพีแดนซ์นั้นมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดทั้งนี้มิสาเหตุมาจากการจำลองค่าของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนนั่นเอง โดยค่าของความถี่ที่สอดคล้องกับอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นควรจะเป็นค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าแต่ด้วยในช่วงความถี่ต่ำนั้นจะมีสัญญาณรบกวนอยู่มากจึงทำให้สามารถทำการวัดได้เพียงบางส่วนของกราฟอิมพีแดนซ์เท่านั้น โดยสัญญาณรบกวนดังกล่าวนี้ อาจเกิดจากกั๊กประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นมีค่ามากกว่าหนึ่งชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

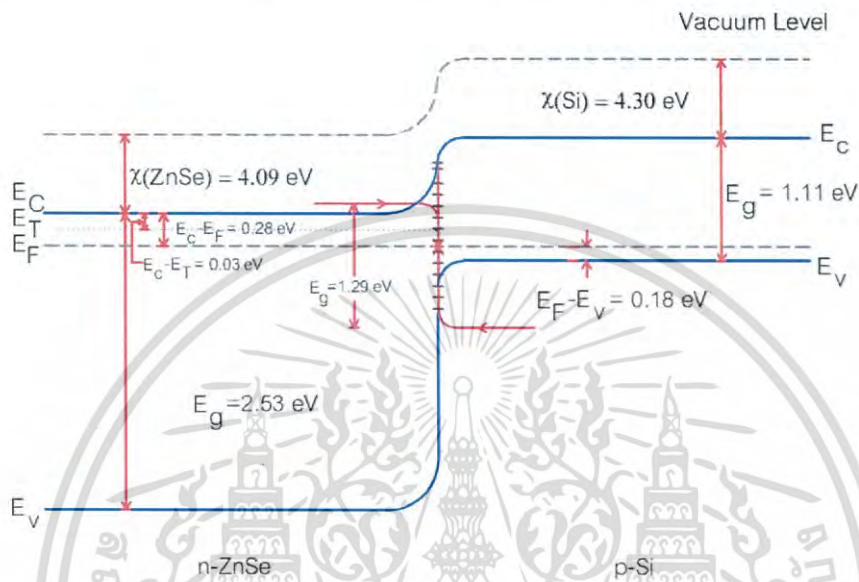
ที่สามารถตอบสนองได้ในช่วงความถี่ต่ำๆจึงส่งผลให้เกิดความไม่คงที่และความไม่ต่อเนื่องกันของข้อมูลที่ได้จากการวัด โดยเฉพาะในช่วงบริเวณความถี่ตั้งแต่ 20 เฮิร์ตซ์ ไปจนถึงช่วง 100 เฮิร์ตซ์ นั้นเอง สรุปได้ว่าพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้ทั้ง 2 วิธีนี้คือระดับพลังงานพลังงานตื้น (shallow trap) ที่อยู่ภายในเนื้อสารของสารกึ่งตัวนำ ZnSe

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า ความถี่กำทอน พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้จากหลายวิธีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

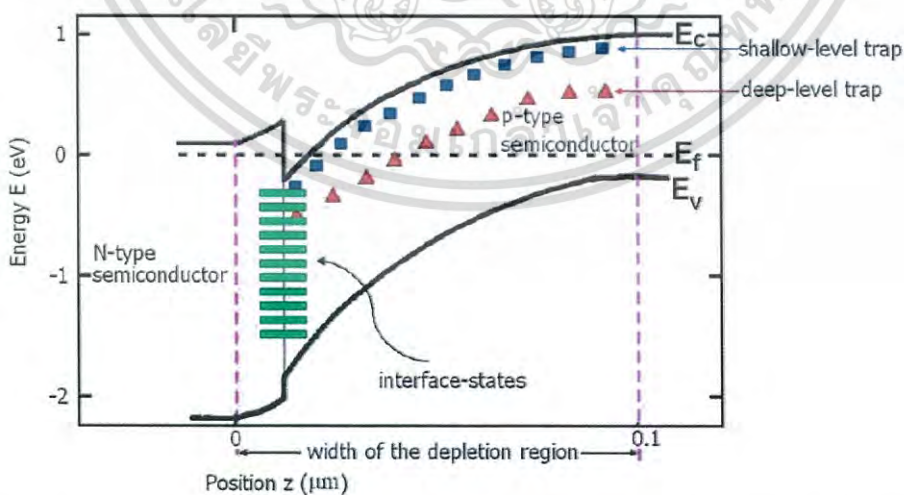
Method	T (°C)	ω_0 (rad/s)	E_a (eV)	ξ (s ⁻¹ K ⁻²)	σ_i (cm ⁻²)
$\frac{G}{\omega} - f$	25	1.62×10^6	0.014	32.392	1.12×10^{-24}
	40	1.87×10^6			
	60	2.37×10^6			
	80	2.50×10^6			
	90	2.68×10^6			
$\frac{dG}{df} - f$	25	8.75×10^5	0.037	42.609	1.48×10^{-24}
	40	1.06×10^6			
	60	1.37×10^6			
	80	1.56×10^6			
	90	1.68×10^6			
$\frac{dC}{d \ln f} - f$	25	1.68×10^6	0.036	81.532	1.12×10^{-24}
	40	2.18×10^6			
	60	2.56×10^6			
	80	3.06×10^6			
	90	3.31×10^6			
$Z' - Z''$	25	1.63×10^6	0.023	4.372	1.52×10^{-25}
	40	1.63×10^6			
	60	2.10×10^6			
	80	2.71×10^6			
	90	2.71×10^6			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมด ได้แก่ ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe และพลังงานกระตุ้นของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) สามารถนำมาเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ได้ดังรูปที่ 4.79



รูปที่ 4.79 แสดงแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.80 แสดงแผนภาพกับดักพาหะที่ผิวเชื่อมต่อ กับดักพาหะต้น และกับดักพาหะลึกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับชนิดเอ็น [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะสรุปผลการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ทำการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางและทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ 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 ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ เป็นเวลา 30 นาที พบว่าลักษณะฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่อยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ มีสีเหลืองโปร่งแสง ผิวหน้าเรียบ มีความมันเงายึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดี การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าระนาบเลี้ยวเบนเป็นระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกและจากการศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ พบว่า ช่องว่างแถบพลังงาน มีค่าเท่ากับ 2.71 อิเล็กตรอนโวลต์

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ที่มีผิวหน้าเป็นระนาบ (100) ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เป็นเวลา 30 นาที พบว่าฟิล์มบางมีลักษณะยึดติดกับแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) ได้ดี การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnSe ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า ระนาบการเลี้ยวเบนของสารกึ่งตัวนำ ZnSe เป็นระนาบ (111) และระนาบการเลี้ยวเบนของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si เป็นระนาบ (400) การศึกษาโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าฟิล์มบางมีเกรนขนาดเล็กมากในระดับ 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 เมื่อทำการ วัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -4 ถึง 4 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนสมบัติเฉพาะของไดโอดทั่วไป โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.57 โวลต์ มีค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับเท่ากับ 4.93×10^{-10} แอมแปร์ จากการคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงในการหาค่าของแฟกเตอร์ในอุดมคติ และค่าความสูงของกำแพงศักย์ พบว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกัน คือ ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติมีค่าเท่ากับ 2.91 และ 2.96 ตามลำดับ และ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ มีค่าเท่ากับ 0.90 และ 0.73 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณโดยวิธีของชวงที่คำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับ I และ $dV/d \ln I$ กับ I มีค่าใกล้เคียงกันคือ มีค่าเท่ากับ 0.84×10^4 และ 0.85×10^4 โอห์ม ตามลำดับ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้าช่วง -4 ถึง 4 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 300 เคลวิน พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง และจากการคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และ วิธีของชวง ในการหาค่าของแฟกเตอร์อุดมคติ และค่าความสูงของกำแพงศักย์ พบว่า มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และ ค่าของแฟกเตอร์อุดมคติทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นค่าของแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่าลดลง ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากวิธีของชวงก็มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากการหาค่าลักษณะเฉพาะของค่าพลังงานการขุดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) โดยการเปรียบเทียบระหว่าง คำนวณโดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มอไดนามิกส์และวิธีของชว่งพบว่า มีค่าเท่ากับ 0.095 และ 0.096 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 เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง 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 3.16×10^{13} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

5.1.2.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับ แรงดันไบแอสโดยการป้อน ความถี่คงที่หลายๆ ค่า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับแรงดันไบแอสโดยการป้อนความถี่คงที่หลายๆค่า พบว่าค่าความหนาแน่นของกักเก็บที่บริเวณผิวเชื่อมต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ คือ 3.28×10^{11} ต่อตารางเซนติเมตร-อิเล็กตรอนโวลต์ แล้วจะมีค่าลดลงเรื่อยๆตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีเหตุปัจจัยมาจากความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะผิวเชื่อมต่อ คือเมื่อมีค่าความถี่ที่เหมาะสมจะทำให้สถานะกับดักที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นมีการตอบสนองโดยการปล่อยอิเล็กตรอนออกมาสูงสุด และที่ความถี่คงที่ 400 กิโลเฮิรตซ์นั้นจะสามารถคำนวณหาศักย์ก่อก่อรอยต่อเท่ากับ 0.571 อิเล็กตรอนโวลต์ และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับเท่ากับ 5.56×10^{15} ลูกบาศก์เซนติเมตร

5.1.2.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ เมื่อไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -1 โวลต์ถึง 1 โวลต์เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับความถี่ เมื่อไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -1 โวลต์ถึง 1 โวลต์ พบว่ากับดักนั้นจะอยู่กันอย่างหนาแน่นที่บริเวณขอบบนของแถบวาเลนส์แล้วจะค่อยๆลดลงที่ระดับพลังงานออกห่างจากแถบวาเลนส์มากขึ้น และยังพบว่าแรงดันไฟฟ้านั้นมีอิทธิพลต่อระดับเฟอร์มิซึ่งจะเลื่อนขึ้นตามค่าแรงดันที่ไบแอสเข้าไปและ ณ จุดที่ระดับเฟอร์มิพาดผ่านนั้นจะส่งผลให้กับกับดักที่อยู่บริเวณนั้นแสดงอิทธิพลออกมาโดยการจับพาหะที่อยู่ในบริเวณระดับพลังงานเฟอร์มิและถ้าต้องการให้กับกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นทำการคายประจุออกมาต้องทำการบ่อนค่าความถี่ค่าหนึ่งที่สอดคล้องกับความถี่เฉพาะของกับดักนั้นๆ

5.1.2.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับ ความถี่ ในช่วงอุณหภูมิ 25- 80 องศาเซลเซียส ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่ ในช่วงอุณหภูมิ 25- 80 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความถี่เฉพาะของกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อจะเลื่อนออกไปทางความถี่ที่สูงขึ้น และค่าพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้นั้นมีค่าเท่ากับ 0.03 อิเล็กตรอนโวลต์ และค่า ζ_0 ก็จะเท่ากับ 81.532 ต่อวินาที•เคลวินยกกำลังสอง

5.1.2.7 ผลการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส และในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส และในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธี พันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnSe/p-Si (100) พบว่าค่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดจะเลื่อนไปในทางความถี่ที่สูงขึ้น

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ระวังอย่าให้ผิวหน้าเป็นรอยเพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกไม่สม่ำเสมอหรือเคลือบไม่ติด
2. ต้องการทำความสะอาดระบบประเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทุกครั้งเมื่อทำงานเสร็จหรือก่อนใช้งานเพื่อที่ไม่ได้มีสารอื่นมาปนเปื้อนระหว่างการผลิตฟิล์มบาง
3. ต้องทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ p-Si (100) โดยการกัดในสารละลายเคมีอย่างพิถีพิถันเพื่อให้ได้ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอและต้องไม่มีคราบน้ำปอดประจุติดอยู่
4. การวัดอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในระบบประเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศต้องให้ปลายเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับแผ่นฐานรองรับเพื่อให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิจ่ายกระแสแก่แผ่นฐานรองรับให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการตามที่ต้องการและจะไม่เกิดความเสียหายกับฟิล์มบางที่เคลือบกับแผ่นฐานรองรับที่เตรียมไว้แล้วหรือที่กำลังเตรียมใหม่
5. การวัดค่าต่างๆที่ความถี่ต่ำต้องมีระบบกันสัญญาณรบกวนที่ดีเพราะเวลาวัดค่าไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำมีสัญญาณรบกวนมากเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Samarasekara, P. 2010. "Characterization of Low Cost p-Cu₂O/n-CuO Junction." *GESJ. Physics*. 2(4) : 1-8.
- [2] Wijesundera, R. Hidaka, M. Koga, K. Choi, J.Y. and Sung, N.E. 2010. "Structure and Electronics Properties of Electrodeposited Heterojunction of CuO/Cu₂O." *Ceramics-Silikaty*. 54(1) : 19-25.
- [3] Dandeneau, C.S. Jeon, Y.H. Shelton, C.T. Plant, T.K. Cann, D. and Gibbons, B. 2009. "Thin Films Chemical Sensors based on p-CuO/n-ZnO Heterocontacts." *Thin Solid Films*. 517 : 4448-4454.
- [4] Gao, F. Liu, X.J. Zhang, J.S. Song, M.Z. and Li, N. 2012. "Photovoltaic Properties of the p-CuO/n-Si Heterojunction Prepared Through Reactive Magnetron sputtering." *J. Appl. Phys*. 3 : 084507.
- [5] Minami, T. Nishi, Y. Miyata, T. and Nomoto, J.I. 2011. "High Efficiency Oxide Solar Cells with ZnO/Cu₂O Heterojunction Fabrication on Thermally Oxidized Cu₂O Sheet." *Appl. Phys. Express*. 4 : 062301.
- [6] จิตินัย แก้วแดง, นามนิตย์ วงษ์เจริญ, อัญญพร อริยฤทธิ์, อติศร นพรุจกุล, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิทธิ์ ภูรักษาเกียรติ. 2554. "ลักษณะเฉพาะของกระแส - แรงดันไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิของไดโอดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdZnS/CuAlO₂" วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ปีที่ 3 (ฉบับพิเศษที่2) มีนาคม 2554 : 12-22.
- [7] อติศร นพรุจกุล. 2555. "สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS กับ CuAlO₂ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] Nakashima, Y. and Ichimura, M. 2012. "Electrochemical Deposition of Cu_xSn_yS_zO Thin Films and Their Application for Heterojunction Solar Cells." *International Journal of Photoenergy*. 2012 : 1-8.
- [9] วรรณภา จำเริญพีช. 2555. "การศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด CdS/CuO" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] Chavez, H. Jordan, M. McClure, J.C. Lush, G. and Singh V.P. 1997. "Physical and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characterization of CdS Films Deposition by Vacuum Evaporation ,
Solution Growth and Spray Pyrolysis.”. *J.Master.Sci : Matter Elec.* 8 : 151-154.
205.

- [11] Schroder D.K. 1990. **Semiconductor Material and Device Characterization**. New York : John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [12] Sze S.M. and Kwok K. Ng. 2007. **Semiconductor Devices Physics and Technology**. 3rd ed. United States of America : John Wiley&Sons.
- [13] Kittel C. 2005. **Introduction to Solid State Physics**. 8th ed. United States of America : John Wiley & Son, Ins., New York.
- [14] ฐิตินัย แก้วแดง. 2531. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [15] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2530. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [16] Nicollian E.H. And Brews J.R. 1982. **MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology**. New York : John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [17] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2543. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ญัฐพร พรหมรส 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] ฐิติชัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CuAlO_2 เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [22] ฐิติกร จรรยาธรรม. 2550. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [23] เอกชัย วิลามาต. 2552. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/CdTe ” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [24] ไกรศักดิ์ ยืนยง. 2553. “การศึกษาข้อสัมผัสโอห์มิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [25] สุริยา มีเปี่ยมสมบูรณ์. 2553. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อประยุกต์เป็นขอตัก์ไกโดโอด” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [26] Ignatowicz S. and Kobendza A. 1990. **Semiconducting Thin Films of $A^{\text{II}}B^{\text{VI}}$ Compounds.** Warsaw : PWN-POLISH SCIENTIFIC.
- [27] Abrikosov N.Kh., Bankina V.F., Poretskaya L.V., Shelimova L.E. and Skudnova E.V. 1969. **Semiconducting II-VI, IV-VI, and V-VI Compounds.** New York : PLENUM PRESS.
- [28] Adachi S. 2005. **Properties of Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors.** West Sussex : John Wiley&Sons.
- [29] Perrier G., Philippe R. and Dodelet J.P. 1988. “Growth of Semiconductors by the Close - Spaced Vapor Transport Technique : A review” *J. Mater. Res.* pp. 1031-1042.
- [30] Ohring M. 2002. **Materials Science of Thin Films Deposition and Structure.** 2nd ed. San Diego : ACADEMIC PRESS.
- [31] Bayhan Habibe A. and Sertap Kavasoglu A.S. 2005. “Tunneling Enhanced Recombination in Polycrystalline CdS/CdTe and CdS/Cu(In,Ga)Se_2 Heterojunction Solar Cell.” *Solid-State Electronics.* 49 : 991-996.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] Barsoukov E. and Macdonald J.R. 2005. **Impedance Spectroscopy Theory, Experiment and Application**. 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc. Hoboken. New Jersey.
- [33] Subhash C. and Saroj B. 2005. "Analysis of Current-Voltage Characteristics of Inhomogeneous Schottky diodes at Low Temperatures." *Appl. Surf. Sci.* 252 : 358-363.
- [34] Tataroglu A. and Altindal S. 2006. "Characterization of Current-Voltage(I-V) and Capacitance - Voltage - Frequency (C - V - f) Feature of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky Diodes." *Microelectronic Engineering*. 83 : 582-588
- [35] Karatas, S. Altindal, S. Turut, A. and Cakar, M. 2007. "Electrical Transport Characteristics of Sn/p-Si Schottky Contacts Revealed from I-V-T and C-V-T Measurements." *Physica B*. 329 : 43-50.
- [36] Blood P. and Orton J.W. 1992. *The Electrical Characterization of Semiconductor Majority Carriers and Electron State*. London : Academic Press.
- [37] Rakhshani A.E. 2001. "Heterojunction properties of electrodeposited CdTe/CdS solar cells." *J. Appl. Phys.* 90 : 4265 - 4271.
- [38] ประธาน ประจวบโชค. 2550. "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ CuAlO₂ ชนิดพี" วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [39] Kumar, P. Adhikari, S. and Banerji, P. 2010. "Fabrication and Characterization of Polyaniline/Porous Silicon Heterojunction" *Synth. Met.* 160 : 1507-1512.
- [40] Takahata, S. Saiki, K. Imao, T. Nakanishi, H. Sugiyama, M. and Chichibu, S.F. 2009. "Fabrication of n-Type ZnO/p-Type Cu-Al-O Heterojunction Diode by Sputtering Deposition Methods" *Phy. Status Solidi C*. 6(5) : 1105-1108.
- [41] Banerjee, A.N. Nandy, S. Ghosh, C.K. and Chattopadhyay, K.K. 2007. "Fabrication and Characterization of All - Oxide Heterojunction p-CuAlO_{2+x}/n-Zn_{1-x}Al_xO Transparent Diode for Potential Application in Invisible Electronics." *Thin Solid Films*. 515 : 7324-7330.
- [42] Xiwei, Z. Xiujuan, Z. LiuWang, Yiming, W. Yan, W. Peng, G. Yuanyuan, H. and Jiansheng, J. 2013. "ZnSe nanowire/Si p-n heterojunctions device construction and optoelectronic applications" *Nanotechnology*. 24 : 395201-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [43] Altindal, S. Kanbur, H. Yucedag, İ. and Tataroglu, A. 2008 . “On The Energy Distribution of Interface States and Their Relaxation Time and Capture Cross Section Profiles in Al/ SiO₂/p-Si (MIS) Schottky Diodes” *Microelectronic Engineering*. 85 : 1495-1501.
- [44] Kordos, P. Stoklas, R. Gregusova, D. Gazi, S. and Novak, J. 2010. “Trapping Effects in Al₂O₃/AlGaIn/ GaN Metal-Oxide-Semiconductor Heterostructure Field-Effect Transistor Investigated by Temperature Dependent Conductance Measurements” *Applied Physics Letters*. 96 : 013505-1 ,013505-3.
- [45] Gorkem, O.A. Sertap, K. and Nese, K. 2012. “The illustrated brief application of defect distribution model for heterojunction device by admittance spectroscopy” *Journal of Alloys and Compounds*. 523 : 16– 21
- [46] งามนิตย์ วงษ์เจริญ และฐิตินัย แก้วแดง. 2553. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วย Al สำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [47] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO₃ (0.00≤x≤0.05) และการประยุกต์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [48] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอะตอมอินเดียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [49] ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2544. “เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์.” ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [50] ฐิตินัย แก้วแดง. 2545. “เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.” ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [51] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [52] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียนติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [53] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2547. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [54] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง ดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [55] ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้า ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [56] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้า ด้านหลัง ชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [57] ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และ การศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงาน วิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [58] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียนติ. 2558. “การเตรียมฟิล์ม บาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสเป็คเตอรริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnSe
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.80-8

Pattern : 80-8		Radiation = 1.540600	Quality : Calculated				
Zn Se			2th	I	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/Icor = 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 : CuKα1 Lambda : 1.54060	Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเดี่ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnSe
 ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.1-690

Pattern : 1-690		Radiation = 1.540600		Quality : Deleted		
Zn Se		2th	l	h	k	l
		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
		106.719	8	5	3	1
Lattice : Face-centered cubic	Mol. weight = 144.34					
S.G. : F-43m (216)	Volume [CD] = 180.36					
a = 5.65000	Dx = 1.329					
	Dm = 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 :						
Radiation : MoK α 1	Filter : Not specified					
Lambda : 0.70900	d-sp : Not given					
SS/FOM : F9= 9(0.0870,11)						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ Si
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.27-1402

Pattern : 27-1402		Radiation = 1.540600		Quality : High		
Si		2th	l	h	k	l
Silicon, syn / Silicon		28.443	100	1	1	1
		47.304	55	2	2	0
		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
Lattice : Face-centered cubic		Mol. weight = 28.09				
S.G. : Fd3m (227)		Volume [CD] = 160.18				
a = 5.43088		Dx = 2.329				
Z = 8		I/I _{cor} = 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 5-565 and 26-1481. COLOR : Gray</p>						
CAS: 7440-21-3						
*Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 13, page 35, (1976) primary reference :						
Radiation : CuKα1		Filter : Monochromator crystal				
Lambda : 1.54060		d-sp : Diffractometer				
SS/FOM : F11=409(0.0021,13)		Internal standard : W				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาวชนิภรณ์ จุไรสง
เกิดเมื่อ	วันที่ 1 กันยายน 2535
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 961 ม.2 ถนนเจนจบทิศ ตำบลในเมือง อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น 40110
ประวัติการศึกษา	2553 เข้ารับการศึกษาในระดับอุดมศึกษาที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2556 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษาที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2557 เข้ารับการศึกษาในระดับอุดมศึกษาที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
หัวข้องานวิจัยที่ทำ	- Fabrication and Characterization of n-Znse/p-Si (100) Heterojunction. - Study of Cds/Cuo Heterojunction Thin Film Device.
ผลงานทางวิชาการ	Electrical Properties of n-ZnSe/p-Si (100) Heterojunction Thin Film Device.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้