

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนใน
สูญญากาศสูง

GROWTH OF ZnSe THIN FILMS BY THE HIGH VACUUM
ELECTRON-BEAM EVAPORATOR SYSTEM



เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 49611/
วัน, เดือน, ปี 25 ก.พ. 2547

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ISBN 974-324-402-6

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADGRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซลีไนต์โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็คตรอนในสุญญากาศสูง |
| นักศึกษา | นางสาวกรรณิกา อุประ โศตร |
| รหัสประจำตัว | 43065007 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | ฟิสิกส์ประยุกต์ |
| พ.ศ. | 2546 |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว |

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ซลีไนต์ที่ความหนา 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร โดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็คตรอนในสุญญากาศสูงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแก้ว ที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับในช่วง 300-473 เคลวิน จากการตรวจสอบโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า ฟิล์มบางซิงค์ซลีไนต์มีสมบัติเป็นผลึกระนาบ (111) มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนแบบลูกบาศก์ชนิดเฟซเซ็นเตอร์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับสูงขึ้นค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ในการเลี้ยวเบนจะมีค่าลดลง จากการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ซลีไนต์โดยการหาค่าความหนาแน่นและสภาพคล่องตัวของพาหะด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์จะพบว่าฟิล์มบางซิงค์ซลีไนต์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับสูงขึ้นค่าความหนาแน่นพาหะจะลดลงขณะที่สภาพคล่องตัวพาหะมีค่าสูงขึ้น จากการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดิเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโรระหว่างสารกึ่งตัวนำซิงค์ซลีไนต์ชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี ตรวจสอบโดยการวัดค่ากระแส-แรงดัน และช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดิเทคเตอร์ พบว่าการตอบสนองต่อความยาวคลื่นมีการเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นของสีน้ำเงินมากขึ้นเมื่อเพิ่มชั้นความหนาของฟิล์มบางซิงค์ซลีไนต์

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis Title | Growth of ZnSe Thin Films by the High Vacuum Electron-Beam Evaporator System |
| Student | Ms. Kannika Upracoat |
| Student ID. | 43065007 |
| Degree | Master of Science |
| Programme | Applied Physics |
| Year | 2003 |
| Thesis Advisor | Assoc.Prof.Dr. Jiti Nukeaw |

ABSTRACT

The ZnSe thin films of thickness 100 nm to 1 μm were deposited on glass substrates by the high vacuum electron beam evaporation at temperatures between 300-473K. The thin films are crystalline having the face-centered cubic zincblende structure which is investigated by X-Ray Diffraction method (XRD). The preferential orientation is along (111) plane for all deposited films. The intensity of XRD spectra decreased with increasing temperature of substrate. The electrical property of ZnSe thin films are investigated by Hall effect. The carrier concentration of n-ZnSe thin films decreased with increasing temperature of substrate, while the electron mobility increased with increasing substrate temperature. The electrical property of n-ZnSe/ p-Si heterojunction photodetector was investigated by current-voltage measurement and response wavelength. The blue shift of response wavelength of photodetector increased with increasing the thickness of n-ZnSe.

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของงานวิจัยนี้ เกิดจากความร่วมมือของหลายๆฝ่าย เริ่มจากแนวความคิดของ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว ในการขออนุมัติโครงการการพัฒนาสารกึ่งตัวนำ ด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง รวมทั้งคอยให้คำปรึกษาและแก้ปัญหาเกี่ยวกับงานวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้การสนับสนุนทุนในการจัดซื้อเครื่องมือในงานวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (FNRF) ในการให้ความอนุเคราะห์เรื่องการฝังไอออนของแก๊สในโตนเจนด้วยวิธีการอิมพลานเตชัน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สมาชิกของห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำ ทางแสงที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาที่ติดตลอดเวลา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ปรียญาโททุกคน ที่คอยถามข่าวคราวในการทำงานวิจัยและช่วยเหลือในการเรียนเสมอมา

ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยให้ความอบอุ่นและคอยเป็นกำลังใจในการดำเนินชีวิตจนกระทั่งเกิดวันนี้ขึ้นมา คุณค่าและคุณประโยชน์ที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแก่ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

กรรณิกา อุประโคตร

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญรูป..... | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.3 การดำเนินงานวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎี..... | 4 |
| 2.1 สมบัติทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำเชิงคัสตี้ไนต์..... | 4 |
| 2.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ..... | 7 |
| 2.2.1 การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... | 7 |
| 2.2.2 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการหาค่าความหนาแน่นและสภาพ..... | 12 |
| คล่องตัวของพาหะจากปรากฏการณ์ฮอลล์ | |
| 2.3 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำ..... | 13 |
| 2.3.1 รอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำ..... | 13 |
| 2.3.2 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำแบบพี-เอ็น..... | 21 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 2.3.3 สารกึ่งตัวนำรอยต่อเฮเทอโร..... | 28 |
| 2.4 หลักการทำงานของโฟโตดีเทคเตอร์..... | 31 |
| บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... | 33 |
| 3.1 ระบบประเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ..... | 33 |
| 3.1.1 ห้องสุญญากาศสูง..... | 34 |
| 3.1.2 ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ..... | 35 |
| 3.1.2.1 ปั๊มกลโรตารี..... | 35 |
| 3.1.2.2 ปั๊มกังหัน โมเลกุล..... | 36 |
| 3.1.2.3 เกจพิรานี..... | 37 |
| 3.1.2.4 เกจเพ็นนิ่ง..... | 37 |
| 3.1.3 แผงควบคุมการทำงานของระบบประเหยสาร..... | 38 |
| 3.1.4 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอน..... | 39 |
| 3.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ..... | 40 |
| 3.3 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยระบบประเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน..... | 41 |
| ในสุญญากาศสูง | |
| 3.3.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ..... | 42 |
| แผ่นฐานรองรับ | |
| 3.3.2 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยการเปลี่ยนแปลง..... | 42 |
| ความหนาของซิงค์ซัลไฟด์ | |
| 3.4 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยวิธีการเจือด้วยแก๊สในโตรเจน..... | 42 |
| 3.4.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยวิธีการทำปฏิกิริยากับแก๊สในโตรเจน..... | 42 |
| 3.4.2 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยการฝัง ไอออนของแก๊สในโตรเจน..... | 42 |
| 3.5 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์..... | 43 |
| 3.5.1 การตรวจสอบสมบัติทาง โครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... | 43 |
| 3.5.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความหนาแน่น..... | 43 |
| และสภาพคล่องตัวพาหะจากปรากฏการณ์ฮอลล์ | |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|-----------|
| 3.6 ขั้นตอนในการเตรียมและตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์..... | 44 |
| รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร | |
| 3.3.1 ขั้นตอนในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็น..... | 44 |
| แบบเฮเทอโร | |
| 3.3.2 ขั้นตอนในการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์..... | 46 |
| โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร | |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง..... | 47 |
| 4.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซีสไนด์โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน..... | 47 |
| 4.1.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซีสไนด์โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ..... | 47 |
| แผ่นฐานรองรับ | |
| 4.1.2 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซีสไนด์โดยการเปลี่ยนแปลงความหนา..... | 54 |
| ของฟิล์มบาง | |
| 4.2 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซีสไนด์โดยวิธีการเจือด้วยแก๊สใน โตรเจน..... | 58 |
| 4.2.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซีสไนด์ที่มีการทำปฏิกิริยากับ..... | 58 |
| แก๊สใน โตรเจน | |
| 4.2.2 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซีสไนด์ที่มีการฝังไอออนของ..... | 61 |
| แก๊สใน โตรเจน | |
| 4.3 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์..... | 63 |
| รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร | |
| 4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง..... | 64 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 69 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 71 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 72 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.1 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....48 ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่ความหนา 100 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน | |
| 4.2 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....49 ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่ความหนา 300 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน | |
| 4.3 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....50 ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่ความหนา 500 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน | |
| 4.4 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....51 ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่ความหนา 1 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน | |
| 4.5 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....55 ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 300 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร | |
| 4.6 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....56 ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 373 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร | |
| 4.7 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....57 ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 423 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร | |
| 4.8 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....58 ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 473 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร | |
| 4.9 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....59 ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่มีการทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร | |
| 4.10 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....62 ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่มีการฝังไอออนของแก๊สไนโตรเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟไนต์..... | 4 |
| 2.2 แสดงบริลลัน โชนของ โครงผลึกแบบซิงค์เบลน | 5 |
| 2.3 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟไนต์..... | 5 |
| 2.4 แสดงช่วงการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟไนต์..... | 6 |
| 2.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... | 8 |
| 2.6 ภาพถ่ายเครื่อง X-ray diffractometer..... | 9 |
| 2.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... | 9 |
| 2.8 หลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์..... | 12 |
| 2.9 แสดงรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น..... | 14 |
| 2.10 แสดงรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำภายใต้สภาวะการป้อนแรงดัน ไบแอส..... | 16 |
| 2.11 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำแบบพี-เอ็น..... | 22 |
| 2.12 แสดงค่ากระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็น..... | 27 |
| 2.13 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อเฮเทอโร..... | 28 |
| 2.14 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟไนต์ชนิดเอ็นและซิลิกอนชนิดพี..... | 30 |
| 2.15 หลักการทำงานของโฟโตดีเทคเตอร์ โครงสร้างชนิดรอยต่อแบบพี-เอ็น..... | 31 |
| 2.16 แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็น..... | 32 |
| 3.1 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง..... | 33 |
| 3.2 การจัดอุปกรณ์ในห้องสุญญากาศ..... | 34 |
| 3.3 ลักษณะของปั๊มกลโรตารี..... | 36 |
| 3.4 ลักษณะของปั๊มกังหัน โมเลกุล..... | 37 |
| 3.5 ลักษณะของเกจพิรานี..... | 37 |
| 3.6 ลักษณะของเกจเพนนิ่ง..... | 38 |
| 3.7 แผนควบคุมการทำงานของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ..... | 38 |
| 3.8 แหล่งจ่ายแรงดัน ไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอนของระบบระเหยสาร..... | 40 |
| 3.9 เครื่องอัลตราโซนิคส์..... | 40 |
| 3.10 น้ำยาเคมีในการทำความสะดวกแผ่นฐานรองรับ..... | 41 |
| 3.11 สารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟไนต์และอุปกรณ์ในการระเหยสาร..... | 42 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.12 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance..... | 43 |
| 3.13 แสดงแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก..... | 44 |
| 3.14 แสดงเครื่องสปีดเตอร์ริงกระแสดตรงและขั้ว โลหะที่เตรียมได้..... | 45 |
| 3.15 แสดงเตาอบที่ใช้ในการแอนนัลขั้ว โลหะ..... | 45 |
| 3.16 โครงสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร..... | 45 |
| 3.17 สิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร..... | 46 |
| 4.1 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดที่ความหนา 100 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน | 47 |
| 4.2 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดที่ความหนา 300 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน | 48 |
| 4.3 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดที่ความหนา 500 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน | 49 |
| 4.4 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดที่ความหนา 1 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน | 50 |
| 4.5 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดที่ความหนา 500 นาโนเมตร..... ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน | 52 |
| 4.6 แสดงค่าสภาพคล่องตัวพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดที่ความหนา 500 นาโนเมตร..... ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน | 52 |
| 4.7 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดที่ความหนา 1 ไมโครเมตร..... ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน | 53 |
| 4.8 แสดงค่าสภาพคล่องตัวพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดที่ความหนา 1 ไมโครเมตร..... ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน | 53 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.9 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ.....54 ฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 300 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร | |
| 4.10 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ.....55 ฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 373 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร | |
| 4.11 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ.....56 ฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 423 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร | |
| 4.12 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ.....57 ฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 473 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร | |
| 4.13 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ.....59 ฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่มีการทำปฏิกิริยากับแก๊สใน โครเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร | |
| 4.14 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่มีการทำปฏิกิริยากับ.....60 แก๊สใน โครเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร | |
| 4.15 แสดงค่าสภาพคล่องตัวพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่มีการทำปฏิกิริยากับ.....61 แก๊สใน โครเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร | |
| 4.16 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ.....62 ฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่มีการฝังไอออนของแก๊สใน โครเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร | |
| 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-แรงดันของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์.....63 | |
| 4.18 แสดงช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์.....64 | |
| 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันของแก๊สใน โครเจนและค่าคงที่โครงสร้างผลึก.....67 | |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมนุษย์ได้นำประโยชน์จากพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในการอุตสาหกรรม การสื่อสาร และอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันอย่างมากผ่านทางอุปกรณ์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าประกอบไปด้วยสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์มีความสามารถในการประมวลผล วิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีศักยภาพสูงขึ้นมาโดยตลอด

การพัฒนาและประยุกต์ทำสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ มีการนำสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI มาใช้เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ (Zinc Selenide ; ZnSe) เป็นสารกึ่งตัวนำหนึ่งที่มีการศึกษาและนำไปใช้อย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการวิจัยโดยเฉพาะในต่างประเทศ สารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบตรงและมีช่วงของการทะลุผ่านของแสงที่ตามองเห็นในช่วงกว้าง ได้มีการนำสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ไปประยุกต์ทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ โคโอดเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน-เขียว กระจกไดอิเล็กตริก (Dielectric mirror) ฟิลเตอร์ (Filter) และอุปกรณ์ทางแสงที่มีความไวสูง

การพัฒนาเทคโนโลยีในการเตรียมฟิล์มบางขึ้นมามีหลายวิธี เช่น Chemical Vapor Deposition (CVD), Liquid Phase Epitaxy (LPE), Molecular Beam Epitaxy (MBE), Organometallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE) และ RF Magnetron Sputtering เป็นต้น เพื่อนำไปใช้ในงานวิจัย และงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ อุตสาหกรรมการเคลือบเลนส์ อุตสาหกรรมเลนส์กรองแสง เป็นต้น

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำโดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง (The high vacuum electron-beam evaporation) ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางโดยการบังคับลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าให้ตกลงบนสารที่ต้องการทำฟิล์มบาง ลำอิเล็กตรอนเกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดทั้งสแตง จนเกิดปรากฏการณ์เทอร์มิโอนิกอิมิชชัน (Thermionic emission) ของอิเล็กตรอนเมื่อลำอิเล็กตรอนชนเข้ากับผิวหน้าของสารที่ต้องการทำฟิล์มบางจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในตัวเป็นพลังงานความร้อน สารที่ต้องการทำฟิล์มบางจะระเหยขึ้นไปเกาะติดบนแผ่นฐานรองรับ (Substrate) การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีนี้จะใช้เวลาในการเตรียมน้อยและทำการเตรียมได้ครั้งละมากๆทำให้ลดต้นทุนในการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำนั้นมีวิธีการหลายวิธี เช่น การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction spectroscopy : XRD) การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความหนาแน่นของพาหะโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) และการตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตนิกเทอร์รอยด์พี-เอ็นแบบเฮเทอโร (p-n heterojunction photodetector) โดยการวัดค่ากระแส-แรงดันและช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของโฟโตนิกเทอร์รอยด์ ซึ่งวิธีต่างๆเหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ถูกเตรียมขึ้น เพื่อป้อนกลับไปสู่การเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำให้มีคุณภาพดีขึ้นและประยุกต์ใช้งานในด้านสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อสมบัติเฉพาะเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง

1.2.3 เพื่อสร้างและศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตนิกเทอร์รอยด์พี-เอ็นแบบเฮเทอโรที่เตรียมจากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์

1.3 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นด้วยการศึกษาระบบการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์โดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูงและวิธีการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง จากนั้นทำการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ด้วยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์โดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง และนำฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ที่เตรียมได้ไปตรวจสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความหนาแน่นของพาหะโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ นำฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ไปประดิษฐ์เป็นสิ่งประดิษฐ์โฟโตนิกเทอร์รอยด์พี-เอ็นแบบเฮเทอโร จากนั้นนำโฟโตนิกเทอร์รอยด์ที่ได้มาศึกษาสมบัติกระแส-แรงดันและช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของโฟโตนิกเทอร์รอยด์โครงสร้างดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทำให้ทราบถึงสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง

1.4.2 ทำให้ทราบถึงผลกระทบต่อสมบัติเฉพาะเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง

1.4.3 ทำให้ทราบถึงสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตนิกเคออร์รอยคอปี้-เอ็นแบบเฮเทอโรที่สร้างขึ้นจากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์



**GROWTH OF ZnSe THIN FILMS BY THE HIGH VACUUM
ELECTRON-BEAM EVAPORATOR SYSTEM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE
OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2003
ISBN 974-324-402-6**

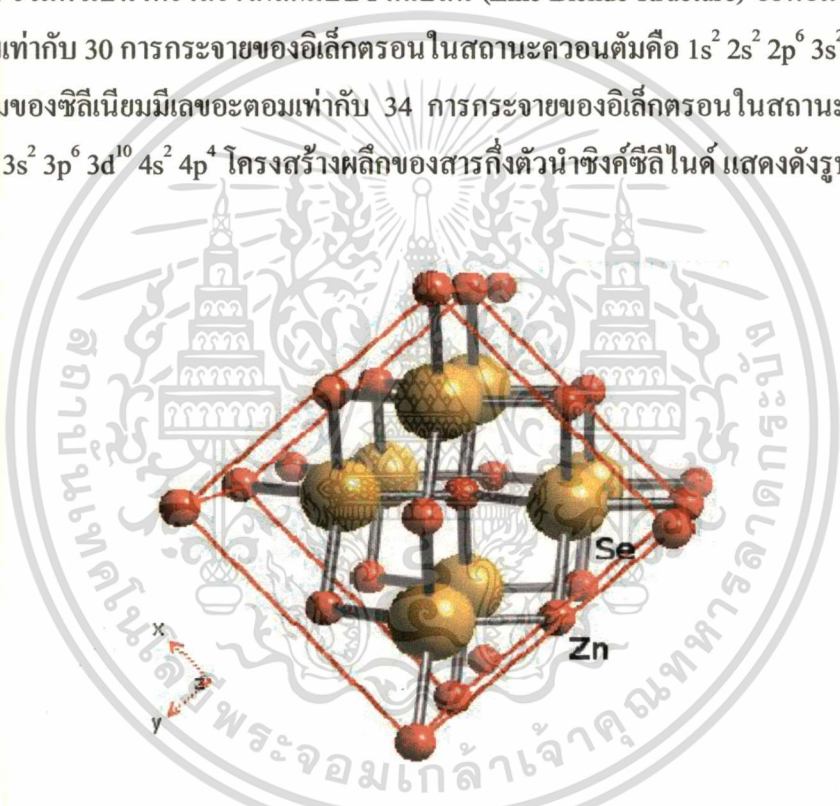
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 สมบัติทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์

สารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ (Zinc Selenide) เป็นสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ จะประกอบไปด้วยอะตอมของสังกะสี (Zinc) และอะตอมของซีลีเนียม (Selenium) รวมตัวเป็นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลน (Zinc Blende structure) อะตอมของสังกะสีมีเลขอะตอมเท่ากับ 30 การกระจายของอิเล็กตรอนในสถานะควอนตัมคือ $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$ และอะตอมของซีลีเนียมมีเลขอะตอมเท่ากับ 34 การกระจายของอิเล็กตรอนในสถานะควอนตัมคือ $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^4$ โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนจะประกอบด้วยผลึกแบบลูกบาศก์ชนิดเฟซเซ็นเตอร์ (Face centered cubic; fcc) 2 ผลึกที่แตกต่างกันเกิดการรวมตัวกัน ดังนั้นในหนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนจะมีอะตอมอยู่สองชนิด ซึ่งมีตำแหน่งของอะตอมดังนี้

อะตอมของ Zn อยู่ที่ $0\ 0\ 0, 0\ 1/2\ 1/2, 1/2\ 0\ 1/2, 1/2\ 1/2\ 0$

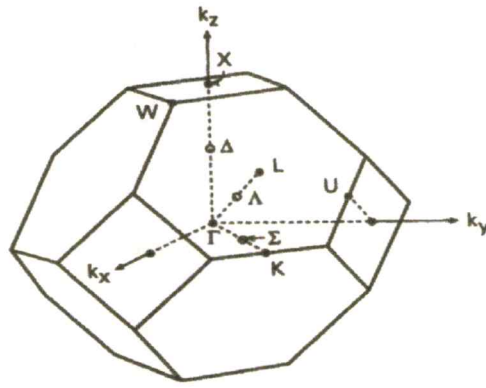
อะตอมของ Se อยู่ที่ $1/4\ 1/4\ 1/4, 1/4\ 3/4\ 3/4, 3/4\ 1/4\ 3/4, 3/4\ 3/4\ 1/4$

บริลลันโซน (Brillouin zone) ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนและโครงสร้างแถบพลังงาน

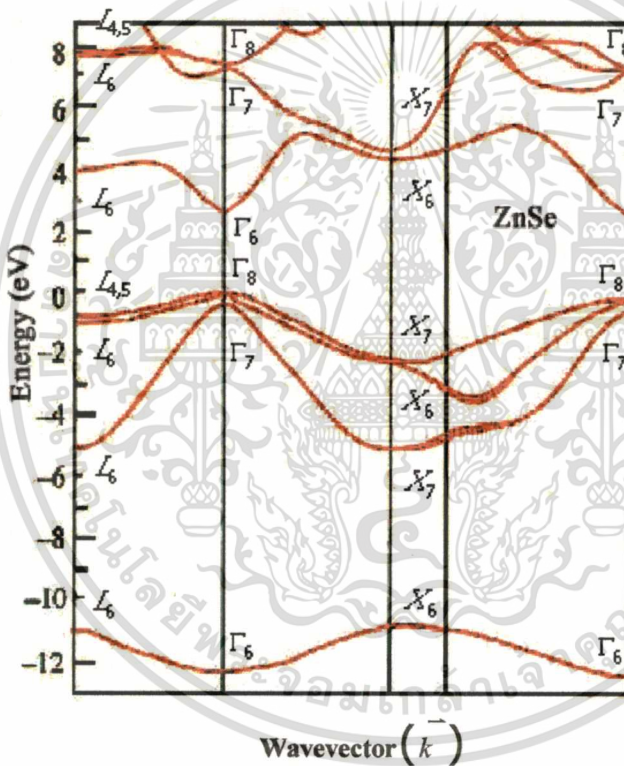
ของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์แสดงดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงบริลลันโซนของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลน

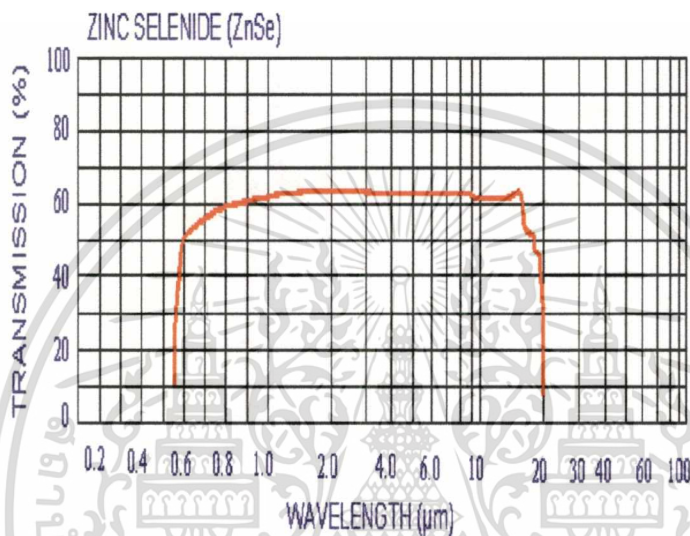


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์

โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์แสดงในรูปที่ 2.3 สามารถบอกได้ถึงชนิดของแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำ โดยพิจารณาจากตำแหน่งต่ำสุดของแถบการนำและตำแหน่งบนสุดของแถบวาเลนซ์ โดยถ้าตำแหน่งต่ำสุดของแถบการนำอยู่แกนเดียวกับตำแหน่งบนสุดของแถบวาเลนซ์จะเป็นชนิดแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรง (Direct band gap) แต่ถ้าตำแหน่งต่ำสุดของแถบการนำอยู่คนละแกนกับตำแหน่งบนสุดของแถบวาเลนซ์จะเป็นชนิดแถบพลังงานต้องห้ามแบบอ้อม (Indirect band gap) ซึ่งจากรูปโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเป็นเอกสารที่สวอนเวสทาร์เพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้เข้าใช้ฟรีโดยไม่มีการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำซิงค์ซีลีไนด์มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบการนำอยู่ที่จุด Γ ของบริลลันโซน แสดงว่าสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์มีชนิดของแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรง และมีขนาดของแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 2.82 อิเล็กตรอน โวลต์ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน

สารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์มีช่วงการทะลุผ่านของแสงในช่วงกว้าง คือช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.55-20 ไมโครเมตร ช่วงการทะลุผ่านของแสงของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงช่วงการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์

สารกึ่งตัวนำจะมีพาหะในการนำไฟฟ้า 2 ชนิดคือ อิเล็กตรอนและโฮล ถ้าสารกึ่งตัวนำมีพาหะข้างมาก (Majority carrier) เป็นอิเล็กตรอนจะเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) และถ้าสารกึ่งตัวนำมีพาหะข้างมากเป็นโฮลจะเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) ในการนำสารกึ่งตัวนำไปทำการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจะต้องมีการเจือสารบางชนิดในผลึกของสารกึ่งตัวนำเพื่อให้ได้ชนิดของพาหะตามที่ต้องการ

การเจือสาร คือ การที่จะกำหนดชนิด (Type) และความนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารกึ่งตัวนำให้มีค่าตามต้องการ ซึ่งได้มีการค้นคว้าเพื่อควบคุมปริมาณดังกล่าวเมื่อมีการเติมสารเจือลงไปว่าจะมีสภาพเป็นผู้ให้ (Donor) หรือผู้รับ (Acceptor) ซึ่งขึ้นกับชนิดของสารที่เติม การเจือสารมี 2 แบบ คือ การเข้าไปแทนที่อะตอมเดิม (Trapping) และการเข้าไปแทรกตัวระหว่างอะตอม (Doping)

- การเข้าไปแทนที่อะตอมเดิม เช่น วาเลนซ์อิเล็กตรอนของซิลิกอนมี 4 ตัว จะเกิดการสร้างพันธะของโครงสร้างผลึกด้วยพันธะโควาเลนซ์ เมื่อพลังงานสูงขึ้นขั้วพันธะจะเกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แยกออก อะตอมสารเจือจะเข้าไปแทนที่โดยที่อะตอมสารเจือจะต้องมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของอะตอมที่ถูกแทนที่

- การเข้าไปแทรกตัวระหว่างอะตอม พบว่าจะเกิดกับสารเจือที่มีขนาดอะตอมใหญ่กว่าอะตอมของสารกึ่งตัวนำมาก เช่น การเจือทองคำในซิลิกอน ทองคำที่แทรกอยู่ในซิลิกอนจะทำให้เกิดศูนย์กลางการรวมตัว (Recombination center) ขึ้นในระหว่างชั้นของพลังงาน เรียกว่า ระดับพลังงานลึกของสารเจือ (Deep impurity level)

การเจือสารจะมีหลายวิธีเช่น วิธีแพร่สารเจือ (Diffusion) วิธีฝังไอออน (Ion implantation) และวิธีหลอมผสม (Alloying) เป็นต้น

- วิธีแพร่สารเจือ จะอาศัยทฤษฎีการแพร่สารในของแข็งคือ อะตอมของสารเจือซึ่งอยู่ในสภาพแก่สามารถแพร่เข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำได้
- วิธีฝังไอออน คือการทำให้ไอออนของสารเจือมีพลังงานจลน์สูงและถูกเร่งให้เคลื่อนที่ไปตามแนวสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าแล้วทะลุเข้าไปในเนื้อของสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้าม ทำให้เกิดรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ
- วิธีการหลอมผสม คือการนำชิ้นสารกึ่งตัวนำหนึ่งใส่ในสารเจือชนิดตรงข้ามกับสารกึ่งตัวนำและทำให้ร้อนจนหลอมละลายเป็นโลหะผสม

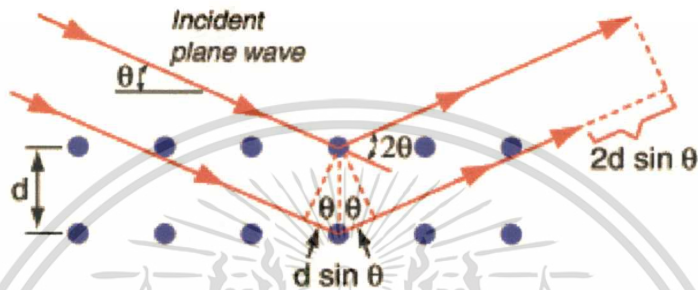
2.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

2.2.1 การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงมีค่าความยาวคลื่นระหว่าง 0.5 – 2.5 อังสตรอม รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิดคือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก เมื่อคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน วิลเลียม เฮนรี แบริก (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path different) เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.1

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

- เมื่อ N คือลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...
 λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
 d_{hkl} คือระยะห่างระหว่างระนาบ
 θ คือมุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

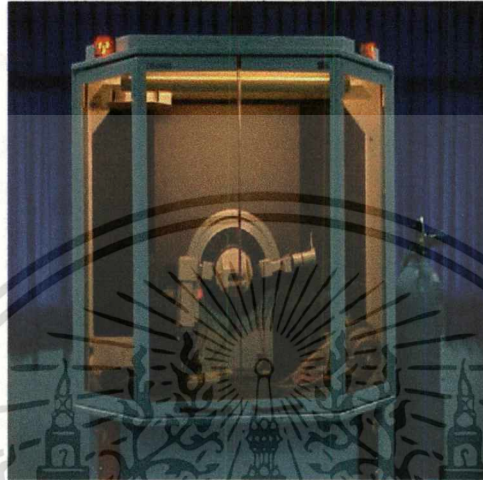


รูปที่ 2.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

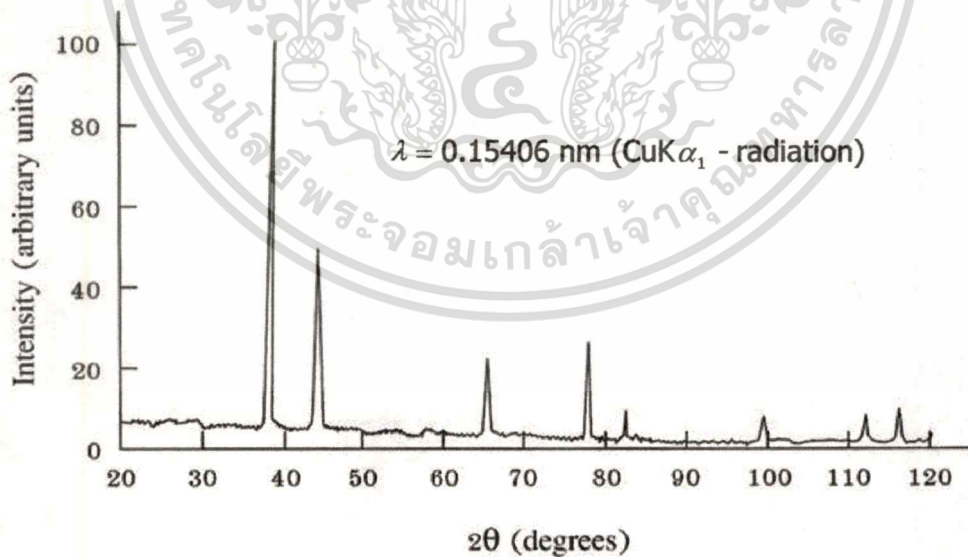
ระนาบของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) แสดงดังรูปที่ 2.5 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน เครื่อง X-Ray diffractometer ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.6 ตามลำดับ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) แสดงดังอย่างดังในรูปที่ 2.7 ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบแต่ละชนิด การเลี้ยวเบนและแทรกสอดกันแบบเสริมทำให้ความเข้มของรังสีเอ็กซ์มีค่ามากจะสังเกตได้จากยอดในรูปแบบการเลี้ยวเบนและยอดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกทำได้โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนกับฐานข้อมูลของเครื่อง X-ray diffractometer ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบด้วย

1. ชื่อธาตุหรือสารประกอบและสูตรโมเลกุล
2. ระบบผลึกและค่าคงที่โครงผลึก
3. สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี
4. d_{hkl} และ h,k,l ของระนาบที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน



รูปที่ 2.6 ภาพถ่ายเครื่อง X-ray diffractometer



รูปที่ 2.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถคำนวณค่าตัวแปรจากการศึกษาโครงสร้างผลึก โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซึ่งแสดงถึงสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำได้ดังนี้

- ค่าคงที่โครงผลึก (Lattice Constant)

จากกฎการเลี้ยวเบนของเบรกก์แอมป์ติจูดของการเลี้ยวเบนของคลื่นคือ เวกเตอร์คลื่นของระนาบคลื่นที่ตกกระทบคือ \vec{k} เวกเตอร์คลื่นของคลื่นสะท้อนคือ \vec{k}' ดังนั้น

$$F = \int n_G e^{i(\vec{G} + \vec{k} - \vec{k}') \cdot \vec{r}} \quad (2.2)$$

เมื่อ n_G คือ แอมพลิจูดของการเลี้ยวเบน
 \vec{G} คือ เวกเตอร์ส่วนกลับ (Reciprocal lattice)

ค่าเวกเตอร์ส่วนกลับสามารถหาได้จากสมการ

$$\vec{G} = \vec{k}' - \vec{k} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$|\vec{k}'| = |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.4)$$

จะได้

$$|G|^2 = 4 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 (1 - \cos 2\theta) \quad (2.5)$$

เมื่อ 2θ คือมุมระหว่าง \vec{k} และ \vec{k}' แก้สมการหาค่า λ จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{4\pi}{|G|} \sin \theta \quad (2.6)$$

และจากสมการการหาค่าของ $|G|^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|G|^2 = \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 (h^2 + k^2 + l^2) \quad (2.7)$$

จะได้สมการของค่าคงที่โครงผลึกเป็น

$$a = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2.8)$$

เมื่อ a คือ ค่าคงที่โครงผลึก

λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (สำหรับ $\text{CuK}\alpha_1$ เท่ากับ 1.5406 อังสตรอม)

θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

- ขนาดของเม็ดผลึก (Grain size)

การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะสามารถหาค่าตัวแปรได้อีกอย่างหนึ่งคือการหาขนาดของเม็ดผลึกของสารกึ่งตัวนำ ในการหาขนาดของเม็ดผลึกของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นกับค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน (Full width at half-maximum of the diffraction peak) และมุมของการเลี้ยวเบน ซึ่งถ้าค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบนมีค่ามากแสดงว่าเม็ดผลึกของสารกึ่งตัวนำมีขนาดเล็ก ในทางตรงข้ามถ้าค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบนมีค่าน้อยแสดงว่าเม็ดผลึกของสารกึ่งตัวนำมีขนาดใหญ่ ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการของ Sherrer's equation ดังนี้

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos\theta} \quad (2.9)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเม็ดผลึก

K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก ($0.89 \leq K \leq 0.94$)

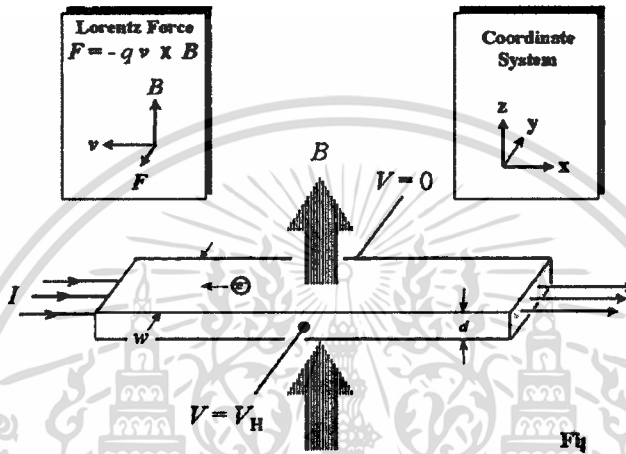
θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

$\beta_{2\theta}$ คือ ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน

λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

2.2.2 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการหาค่าความหนาแน่นและสภาพคล่องตัวของพาหะจากปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์จะใช้หลักการของวันเดอร์พาวว์ (Van der Pauw Method) ซึ่งสารตัวอย่างที่จะทำการวัดจะต้องมีความหนาสม่ำเสมอ ขั้วไฟฟ้าที่ผิวของสารจะต้องอยู่ที่ขอบและเป็นจุดเล็กๆ สภาพภายในสารตัวอย่างจะต้องเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 2.8 หลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์

ถ้ามีการป้อนกระแสไฟฟ้า (I) ให้แก่สารตัวอย่างที่อยู่ภายในสนามแม่เหล็ก (B) จะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า (V) ขึ้นที่ระหว่างคู่ของขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถหาสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่น (Sheet resistivity ; ρ_s) ได้จากสมการ

$$\rho_s = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{R_a + R_b}{2} \right) f \left(\frac{R_a}{R_b} \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ $R_a = V_{34}/I_{12}$, $R_b = V_{14}/I_{23}$, $f(R_a/R_b)$ คือ ฟังก์ชันแก้มือคพลาตซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อสารตัวอย่างมีรูปร่างสมมาตร ($R_a = R_b$) และ d คือความหนาของสารตัวอย่าง

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์เชิงแผ่น (Sheet Hall coefficient ; R_{HS}) จะสามารถหาได้จากสมการ

$$R_{HS} = \frac{\Delta V_{24} d}{BI_{13}} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ΔV_{24} คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างที่ยังไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็กและหลังจากมีการป้อนสนามแม่เหล็ก จากสมการข้างต้นจะสามารถหาค่าความหนาแน่นพาหะเชิงแผ่น (Sheet carrier concentration ; n_s) ได้จากสมการ

$$n_s = \frac{r}{qR_{HS}} \quad (2.12)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor)

$$n_s = -\frac{r}{qR_{HS}} \quad (2.13)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor)

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิงของฮอลล์ (Hall scattering factor) จะเท่ากับอัตราส่วนระหว่างสภาพคล่องตัวของฮอลล์ (Hall mobility) และสภาพคล่องของการนำไฟฟ้า (Conductivity mobility) และค่า r จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดเจเนอเรท (Degenerate semiconductor)

ค่าสภาพคล่องตัวของพาหะเชิงแผ่น (Sheet Hall mobility; μ_{HS}) จะสามารถหาได้จากสมการ

$$\mu_{HS} = \frac{R_{HS}}{\rho_s} \quad (2.14)$$

2.3 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Junction)

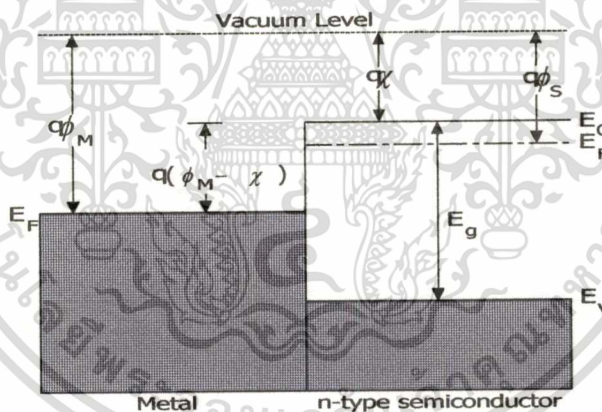
2.3.1 รอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal-semiconductor junction)

ปรากฏการณ์การไหลทางเดียว (Rectify) ของกระแสไฟฟ้าผ่านรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เริ่มมีการศึกษาคั้งแต่ปี ค.ศ. 1904 โดยเฉพาะตัวกรองกระแสชนิดรอยต่อแบบจุด (Point contact rectifier) เป็นไดโอดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในสมัยก่อนซึ่งในขณะนั้นทฤษฎีการนำไฟฟ้ายังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลาย ต่อมาในปี พ.ศ. 1938 Schottky ได้เสนอแนวคิดว่า การไหลทางเดียวของกระแสเกิดจากกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเรียกว่า กำแพงชอตต์กี (Schottky barrier) ส่วนในกรณีของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีปรากฏการณ์การไหลทางเดียวและมีค่าความต้านทานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำน้อยกว่าเมื่อเปรียบ

เทียบกับความต้านทานของเนื้อสารเรียกว่า รอยต่อโอห์มมิก (Ohmic contact) ซึ่งในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจะมีการใช้รอยต่อแบบโอห์มมิก

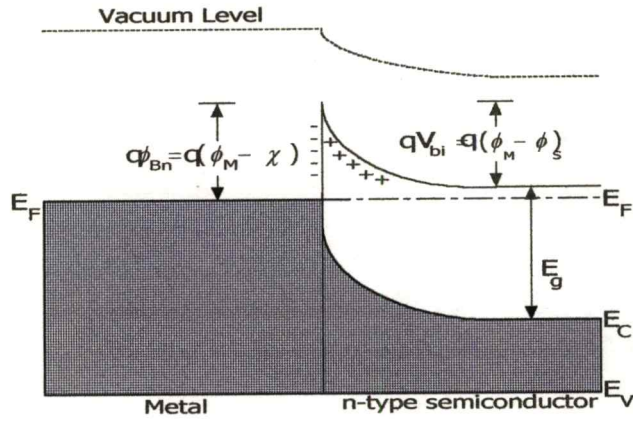
2.3.1.1 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแสดงดังรูปที่ 2.9(ก) กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเกิดจากความแตกต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงานของโลหะ (Work function : ϕ_M) กับค่าสัมพรรคภาพของอิเล็กตรอน (Electron affinity : χ) ของสารกึ่งตัวนำ ค่าฟังก์ชันงานของโลหะคือ ค่าความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) และระดับสุญญากาศ (Vacuum level) ส่วนค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนคือ ค่าความแตกต่างระหว่างขอบล่างของแถบนำ (Conduction band edge) กับระดับสุญญากาศในสารกึ่งตัวนำ เมื่อเกิดการสร้างรอยต่อระดับพลังงานเฟอร์มีของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) จะมีค่าเท่ากันที่สถานะสมดุล (Thermal equilibrium) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9(ข) ค่าความสูงของกำแพงศักย์สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงานของโลหะและค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_{Bn} = q(\phi_M - \chi)$)

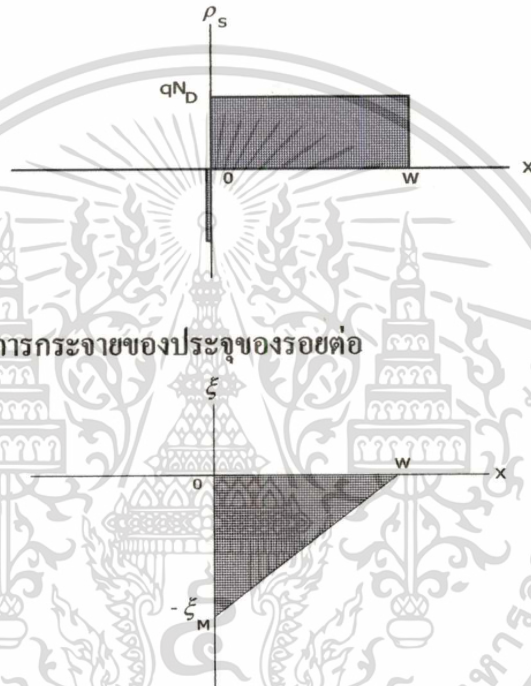


(ก) ผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อ

รูปที่ 2.9 แสดงรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น



(ข) โครงสร้างแถบพลังงานที่สภาวะสมดุล



(ค) การกระจายของประจุของรอยต่อ

(ง) สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ

รูปที่ 2.9 (ต่อ)

เมื่อมีการสร้างรอยต่ออิเล็กทรอนิกส์จะเคลื่อนย้ายจากสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะ ทำให้ทางด้านโลหะเกิดประจุลบเพิ่มขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อเรียกว่า ประจุลบเชิงผิว (Negative surface charge) สำหรับในด้านสารกึ่งตัวนำเนื่องจากการสูญเสียอิเล็กตรอนไปทำให้มีการสะสมของไอออนตัวให้ซึ่งเป็นประจุบวกที่เคลื่อนที่ไม่ได้อยู่ภายในเขตปลอดพาหะซึ่งอยู่ใกล้กับผิวสัมผัสในด้านสารกึ่งตัวนำเรียกว่า ประจุบวกเชิงผิว (Positive surface charge) ในรูปที่ 2.9(ค) แสดงการกระจายของประจุของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น การกระจายของประจุทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อแสดงดังรูปที่ 2.9(ง)

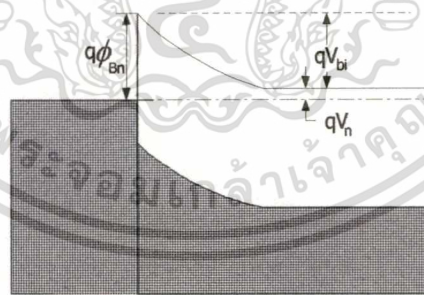
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ไม่มีการป้อนแรงดันไบแอสแก่รอยต่อจะไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อซึ่งอาจคิดได้ว่า มีกระแสจำนวนหนึ่งไหลจากโลหะผ่านรอยต่อเข้าสู่สารกึ่งตัวนำและจะมีกระแสค่าเดียวกันไหลจากสารกึ่งตัวนำเข้าสู่โลหะซึ่งจะทำให้กระแสลัพธ์มีค่าเป็นศูนย์ ค่าศักย์ภายใน (Built-in potential) (ซึ่งจะต้านการไหลของอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ) ขณะที่ยังไม่มี การป้อนแรงดันไบแอสของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสก็ภายในมีค่า

$$V_{bi} = \phi_{Bn} - V_n \quad (2.15)$$

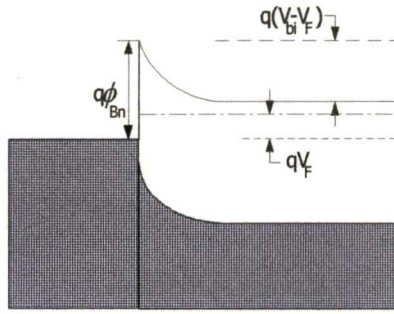
เมื่อ ϕ_{Bn} คือความสูงของกำแพงศักย์ และ V_n คือความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างระดับเฟอร์มีกับแถบนำ

เมื่อมีการป้อนแรงดันไบแอสแก่รอยต่อ ในกรณีของการป้อนแรงดันไบแอสตรง (Forward bias; V_F) คือป้อนแรงดันบวกทางด้านโลหะและแรงดันลบทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะทำให้กำแพงศักย์ทางด้านสารกึ่งตัวนำลดลงเป็นผลให้พาหะข้างมาก (อิเล็กตรอน) สามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ไปยังโลหะได้ง่ายดังนั้นเมื่อเพิ่มค่าแรงดันในการไบแอสมากขึ้นค่ากระแสจึงเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีของการป้อนแรงดันไบแอสย้อนกลับ (Reverse bias; $-V_R$) ให้กับรอยต่อจะทำให้กำแพงศักย์ทางด้านสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงขึ้นทำให้อิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ได้ยากขึ้นดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหลที่รอยต่อ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในกรณีที่มีการไบแอสในเงื่อนไขต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.10

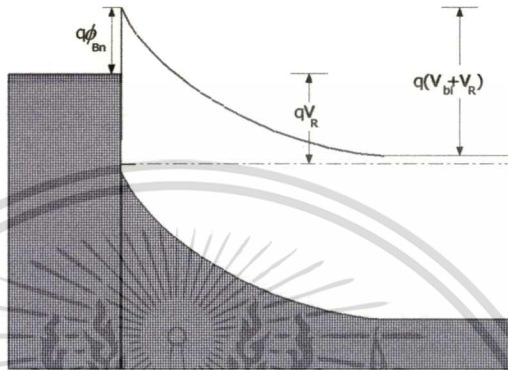


(ก) ที่สภาวะสมดุล

รูปที่ 2.10 แสดงรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำภายใต้สภาวะการป้อนแรงดันไบแอส



(ข) สภาวะไบแอสตรง



(ค) สภาวะไบแอสย้อนกลับ

รูปที่ 2.10 (ต่อ)

ในกรณีของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเหมือนกับรอยต่อของ $p^+ - n$ ความกว้างของชั้นปลอดพาหะมีค่า

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_{bi} - V)} \quad (2.16)$$

เมื่อ V คือ แแรงดันไบแอส ในสมการ (2.16) แรงดันไบแอสจะมีค่าเป็นบวกสำหรับกรณีไบแอสตรง และจะมีค่าเป็นลบในกรณีของการไบแอสย้อนกลับ ความกว้างของชั้นปลอดพาหะจะขยายเข้าไปทางด้านของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งขึ้นกับการกระจายของประจุว่างบริเวณรอยต่อและการกระจายของประจุบริเวณรอยต่อและสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อแสดงดังรูปที่ 2.9(ค) และรูปที่ 2.9(ง) ตามลำดับ จะพบว่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง $x = 0$

ค่าประจุว่าง (Space charge : Q_{sc}) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของสารกึ่งตัวนำและค่าความจุของชั้นปลอดพาหะ (Depletion layer capacitance : C) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มีค่า

$$Q_{sc} = qN_D W = \sqrt{2q\epsilon_s N_D (V_{bi} - V)} \quad C/cm^2 \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \left| \frac{\partial Q_{sc}}{\partial V} \right| = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V)}} = \frac{\epsilon_s}{W} \quad F/cm^2 \quad (2.18)$$

สมการ(2.18) สามารถทำให้อยู่ในรูป

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V)}{q\epsilon_s N_D} \quad (2.19)$$

2.3.1.2 สมบัติกระแส-แรงดัน (current-voltage characteristics)

การไหลของกระแสที่รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่จะเกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมาก (Majority carriers) สารกึ่งตัวนำที่มีการเจือมากและภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ การไหลของกระแสจะแสดงในรูปของขบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน (Thermionic emission) ของพาหะข้างมากเคลื่อนที่ผ่านกำแพงศักย์ตรงรอยต่อจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ ที่สภาวะสมดุลจะมีค่ากระแสสุทธิ (Net current) เท่ากับศูนย์เนื่องจากการไหลของพาหะทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำจะไหลไปทางด้านโลหะและมีประจุตรงข้ามไหลจากทางด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ ซึ่งกระแสดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อ ที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำจะมีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเท่ากับ

$$\begin{aligned} n_s &= N_D \exp\left[\frac{-qV_{bi}}{kT}\right] = N_D \exp\left[\frac{-q(\phi_{Bn} - V_n)}{kT}\right] \\ &= N_C \exp\left[\frac{-q\phi_{Bn}}{kT}\right] \end{aligned} \quad (2.20)$$

เมื่อ N_C คือความหนาแน่นสถานะ (Density of state) ในแถบนำ ที่สภาวะสมดุลจะได้

$$|J_{M \rightarrow S}| = |J_{S \rightarrow M}| \alpha n_s \quad (2.21)$$

เมื่อ $J_{M \rightarrow S}$ คือความหนาแน่นของกระแสจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำและ $J_{S \rightarrow M}$ คือความหนาแน่นของกระแสจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ

เมื่อมีการป้อนแรงดันไบแอสตรง ค่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าตรงรอยต่อจะมีค่าลดลง และค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่รอยต่อจะเพิ่มขึ้นเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้

$$\begin{aligned}
 n_s &\approx N_D \exp\left[\frac{-q(V_{bi} - V_F)}{kT}\right] \\
 &= N_C \exp\left[\frac{-q(\phi_{Bn} - V_F)}{kT}\right]
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

กระแสสุทธิภายใต้การป้อนแรงดันไบแอสตรงจะมีค่า

$$J = C N_C e^{-q\phi_{Bn}/kT} (e^{qV_F/kT} - 1) \tag{2.23}$$

สำหรับในกรณีป้อนแรงดันไบแอสย้อนกลับ ค่ากระแสสุทธิจะมีค่าเหมือนกับสมการที่ (2.23) แต่จะมีค่าแรงดันไบแอสเป็นลบ

สัมประสิทธิ์ $C N_C$ จะมีค่าเท่ากับ $A^* T^2$ เมื่อ A^* เรียกว่า ค่าคงที่ประสิทธิภาพริชาร์ดสัน (Effective Richardson constant) (มีหน่วยเป็น $A/K^2\text{-cm}^2$) และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature) ค่า A^* จะขึ้นกับค่ามวลประสิทธิผลของสารกึ่งตัวนำ (A^* มีค่าเท่ากับ 110 และ 32 สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นและชนิดพี ตามลำดับ สำหรับสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิดเอ็นและชนิดพีจะมีค่า 8 และ 74 ตามลำดับ) สมบัติของกระแส-แรงดันของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำภายใต้ขบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิสชันจะมีค่า

$$J = J_s (e^{qV/kT} - 1) \tag{2.24}$$

และ

$$J_s = A^* T^2 e^{-q\phi_{Bn}/kT} \tag{2.25}$$

เมื่อ J_s คือค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัว (Saturation current density) และแรงดันไบแอสมีค่าบวกสำหรับกรณีไบแอสตรงและมีค่าลบสำหรับกรณีไบแอสย้อนกลับ

ในกรณีของกระแสเนื่องจากพาหะข้างมาก (อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ) และกระแสเนื่องจากพาหะข้างน้อย (โฮลเคลื่อนที่จากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ) การเคลื่อนที่ของโฮลจะเหมือนกับรอยต่อของ $p^+ - n$ ภายใต้เงื่อนไขของการไบแอสทั่วไป ค่ากระแสเนื่องจากพาหะข้างน้อยจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสเนื่องจากพาหะข้างมาก ซึ่งถือว่ารอยต่อแบบขอคัดก็เป็นรอยต่อแบบขั้วเดียว (Unipolar junction)

2.3.1.3 รอยต่อแบบโอห์มมิก

รอยต่อแบบโอห์มมิกคือรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่ค่าความต้านทานตรงรอยต่อมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ เพื่อที่ว่าความต่างศักย์ที่ให้กับอุปกรณ์จะได้ไม่ตกคร่อมที่รอยต่อมากนัก ลักษณะที่บอกถึงสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มมิกคือค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ (Specific contact resistance) ซึ่งมีค่า

$$R_c \equiv \left[\frac{\partial J}{\partial V} \right]_{V=0}^{-1} \quad \Omega - cm^2 \quad (2.26)$$

สำหรับรอยต่อแบบโอห์มมิกที่มีการเจือเล็กน้อย กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อจะมาจากขบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน ค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะมีค่าดังสมการ

$$R_c = \frac{k}{qA^*T} \exp \left[\frac{q\phi_{Bn}}{kT} \right] \quad (2.27)$$

จากสมการ (2.27) ถ้าค่ากำแพงศักย์ (ϕ_{Bn}) มีค่าน้อย จะทำให้ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อมีค่าน้อยด้วย

สำหรับกรณีรอยต่อแบบโอห์มมิกที่มีการเจือสารมากๆ กำแพงศักย์จะแคบลง ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อส่วนใหญ่จะมาจากกระแสที่เกิดจากขบวนการทะลุผ่านกำแพงศักย์ (Tunneling current) ซึ่งมีค่า

$$I \approx \exp \left[-2W \sqrt{2m_n(q\phi_{Bn} - qV)/\hbar^2} \right] \quad (2.28)$$

เมื่อ W คือความกว้างของชั้นปลอดพาหะและมีค่าประมาณ $\sqrt{(2\varepsilon_s/qN_D)(\phi_{Bn} - V)}$ แทนค่าของ W ลงในสมการ (2.28) จะได้

$$I \approx \exp \left[\frac{-C_1(\phi_{Bn} - V)}{\sqrt{N_D}} \right] \quad (2.29)$$

เมื่อ C_1 เท่ากับ $2\sqrt{m_n\varepsilon_s/\hbar}$ ค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อที่มีการเจือมากๆจะมีค่า

$$R_c \approx \exp\left[\frac{C_1 \phi_{Bn}}{\sqrt{N_D}}\right] \quad (2.30)$$

ซึ่งแสดงถึงค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะขึ้นกับการเจือสารทางด้านสารกึ่งตัวนำ

2.3.2 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำแบบพี-เอ็น (P-N Junction Semiconductor)

รอยต่อแบบพี-เอ็น คือบริเวณที่ชนิดการนำไฟฟ้าของสารเปลี่ยนจากชนิดพีเป็นชนิดเอ็น หรือเปลี่ยนจากชนิดเอ็นเป็นชนิดพีโดยที่โครงสร้างของผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลง รอยต่อแบบพี-เอ็นเป็นส่วนที่สำคัญมากในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแทบทุกชนิดและคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นจะขึ้นกับกระบวนการผลิตซึ่งมีมากมายหลายแบบ วิธีการสร้างรอยต่อที่สำคัญๆ ในปัจจุบันมีดังนี้ คือ วิธีแพร่สารเจือ วิธีอีพิแทกซ์ วิธีฝังไอออน และวิธีหลอมผสม เป็นต้น

2.3.2.1 รอยต่อในสภาวะสมดุล (thermal equilibrium condition)

แบบจำลองของรอยต่อพี-เอ็น ในเชิงอุณหพลศาสตร์จะเริ่มพิจารณาที่รอยต่อโฮโม (Homojunction) ซึ่งทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารชนิดเอ็นเป็นวัสดุชนิดเดียวกันจึงมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากัน เมื่อเกิดการสร้างรอยต่ออิเล็กตรอนทางด้านสารชนิดเอ็นซึ่งมีอยู่จำนวนมากจะแพร่ซึม ไปยังด้านสารชนิดพี ส่วนโฮลทางด้านสารชนิดพีจะแพร่ซึมไปยังด้านสารชนิดเอ็น การแพร่ซึมของพาหะจะทำให้เนื้อสารขาดความเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือทางด้านสารชนิดเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอนไปทำให้ด้านสารชนิดเอ็นที่บริเวณใกล้รอยต่อแสดงอำนาจทางไฟฟ้าเป็นบวกเนื่องจากมีประจุบวกของไอออนผู้ให้ถูกทิ้งไว้ สำหรับทางด้านสารชนิดพีจะมีไอออนผู้รับซึ่งมีประจุเป็นลบอยู่ จึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่รอยต่อ โดยที่สนามไฟฟ้ามีทิศจากทางด้านสารชนิดเอ็นไปทางด้านสารชนิดพี ดังนั้นการแพร่ซึมของโฮลและอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ด้านการแพร่ซึม และสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยต่อทำให้เกิดการพัดพาของพาหะ ที่สภาวะสมดุลกระแสที่เกิดจากการแพร่ซึม (Diffusion current) และกระแสที่เกิดจากการพัดพาของพาหะ (Drift current) จะมีค่าเท่ากันเนื่องจากเกรเดียนต์ความเข้มข้นของพาหะแต่ละชนิดจะมีทิศทางตรงข้าม บริเวณรอยต่อจะเป็นบริเวณที่ปลดพาหะที่เคลื่อนที่ได้เนื่องจากถูกสนามไฟฟ้ากวาดออกไปเรียกบริเวณนี้ว่า เขตปลดพาหะ (Depletion region) หรือเรียกว่า บริเวณประจุว่าง (Space charge region) ดังนั้นค่ากระแสสุทธิเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโฮลจะมีค่า

$$\begin{aligned}
 J_p &= J_p(\text{drift}) + J_p(\text{diffusion}) \\
 &= q\mu_p p \xi - qD_p \frac{dp}{dx} \\
 &= q\mu_p p \left[\frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \right] - kT\mu_p \frac{dp}{dx} = 0
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

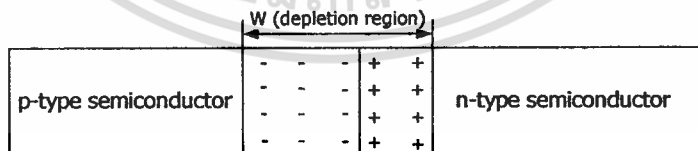
และกระแสสุทธิเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมีค่า

$$\begin{aligned}
 J_n &= J_n(\text{drift}) + J_n(\text{diffusion}) \\
 &= q\mu_n n \xi + qD_n \frac{dn}{dx} \\
 &= \mu_n n \frac{dE_F}{dx} = 0
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

ที่สถานะสมดุลระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำทั้งสองจะมีค่าเท่ากันจึงไม่มีการไหลของพาหะเกิดขึ้นที่รอยต่อ

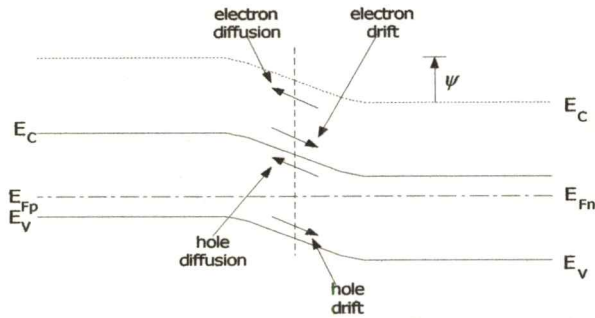
2.3.2.2 เขตปลอดพาหะ (depletion region)

ในการหาค่าศักย์ไฟฟ้า สนามไฟฟ้า และประจุที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง (x) จากบริเวณรอยต่อ จะหาได้จากการแก้สมการปัวส์ซอง (Poisson's equation) ที่เกี่ยวข้องกับประจุสุทธิภายในเขตปลอดพาหะ ซึ่งในการสร้างรอยต่อแบบพี-เอ็นจะมี 2 ชนิดคือ การสร้างรอยต่อพี-เอ็นแบบขั้น (Abrupt junction) และการสร้างรอยต่อพี-เอ็นแบบลาด (Linearly graded junction)

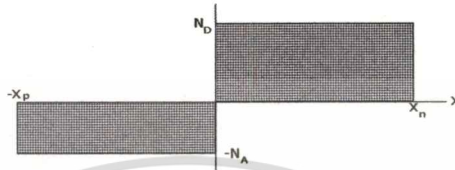


(ก) การเกิดชั้นปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น

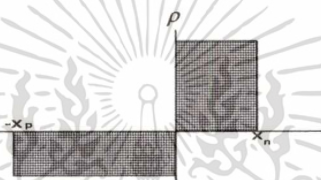
รูปที่ 2.11 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำแบบพี-เอ็น



(ข) แถบพลังงานของรอยต่อที่สภาวะสมดุล



(ค) ความเข้มข้นของสารเจือ



(ง) การกระจายของประจุว่างบริเวณรอยต่อ



(จ) ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ

รูปที่ 2.11 (ต่อ)

2.3.2.2.1 รอยต่อแบบชัน (Abrupt junction)

รอยต่อแบบชันเป็นรอยต่อแบบอุดมคติ ที่พิจารณาว่าความเข้มข้นของสารเจือทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีค่าคงที่ (แต่ค่าไม่เท่ากัน) จนกระทั่งถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณรอยต่อของสาร ประจุไฟฟ้าจะมีค่าไม่เป็นศูนย์เฉพาะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จากสมการของปัวส์ซองจะสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าทางด้านสารชนิดพีได้จาก

$$\xi(x) = -\frac{d\psi}{dx} = -\frac{qN_A(x + x_p)}{\epsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad -x_p \leq x < 0 \quad (2.33)$$

และสนามไฟฟ้าทางด้านสารชนิดเอ็นจะสามารถหาได้จาก

$$\xi(x) = -\xi_m + \frac{qN_D x}{\epsilon_s} = \frac{qN_D}{\epsilon_s} (x - x_n) \quad \text{สำหรับ} \quad 0 < x \leq x_n \quad (2.34)$$

สนามไฟฟ้าในด้านสารชนิดเอ็นมีเครื่องหมายลบ แสดงว่าจะมีทิศไปทางซ้ายมือและสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นและจะสิ้นสุดที่ระยะทางเท่ากับ x_n ดังนั้นสนามไฟฟ้าในด้านสารชนิดเอ็นจะด้านการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนและสนามไฟฟ้าในด้านสารชนิดพีจะด้านการแพร่ซึมของโฮลและที่ระยะ $x=0$ สนามไฟฟ้าจะมีค่าต่อเนื่อง นั่นคือ

$$N_A x_p = N_D x_n \quad (2.35)$$

ซึ่งแสดงถึงความกว้างของเขตปลอดพาหะทั้งในด้านสารชนิดพีและสารชนิดเอ็นจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารเจือ กล่าวคือถ้าด้านใดมีความเข้มข้นของสารเจือสูงเขตปลอดพาหะจะขยายเข้าไปในด้านที่มีการเติมสารเจือในปริมาณต่ำเรียกว่า รอยต่อแบบขั้นด้านเดียว (One-sided step junction) ความกว้างของชั้นปลอดพาหะทั้งหมดของรอยต่อพี-เอ็นคือ

$$W = x_p + x_n \quad (2.36)$$

ในกรณีที่ไม่มีกรไบแอสสามารถคำนวณหาค่าความกว้างของชั้นปลอดพาหะได้จาก

$$V_{bi} = \frac{qN_A x_p^2}{2\epsilon_s} + \frac{qN_D x_n^2}{2\epsilon_s} = \frac{1}{2} \xi_m W \quad (2.37)$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left[\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right] V_{bi}} \quad (2.38)$$

ถ้าในกรณีการสร้างรอยต่อที่มีการเจือสารด้านใดด้านหนึ่งในปริมาณมาก (Heavily dope) ซึ่งได้แก่รอยต่อแบบ p^+-n เมื่อ $N_A \gg N_D$ หรือรอยต่อแบบ $p-n^+$ เมื่อ $N_A \ll N_D$ เทอมของ $(N_A + N_D)/N_A N_D$ ในสมการ (2.38) จะลดลงเป็น $1/N_D$ สำหรับรอยต่อแบบ p^+-n และ $1/N_A$ สำหรับรอยต่อแบบ $p-n^+$ ความกว้างของชั้นปลอดพาหะสำหรับรอยต่อแบบ p^+-n จะมีค่า

$$W \cong x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{qN_D}} \quad (2.39)$$

และความกว้างของชั้นปลอดพาหะสำหรับรอยต่อแบบ $p-n^+$ จะมีค่า

$$W \cong x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{qN_A}} \quad (2.40)$$

เมื่อมีการป้อนแรงดันไบแอสแก่รอยต่อแบบพี-เอ็น ศักย์ไฟฟ้าตรงรอยต่อจะมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่ไบแอสตามสมการ

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V)}{qN_B}} \quad (2.41)$$

ถ้ามีการป้อนแรงดันไบแอสตรงให้กับรอยต่อจะได้ V มีค่าเป็นบวก (คือ $V_{bi} - V_F$) ถ้าป้อนแรงดันไบแอสแบบย้อนกลับจะได้ V มีค่าลบ (คือ $V_{bi} + V_R$) และถ้ามีการป้อนแรงดันไบแอสตรงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับค่าศักย์ภายในของรอยต่อจะทำให้ความกว้างของชั้นปลอดพาหะหมดไป

2.3.2.2.2 รอยต่อแบบลาด (Linearly graded junction)

ในกรณีของรอยต่อแบบลาดจะพิจารณาสมการของปัวส์ซองได้ดังนี้

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{-d\xi}{dx} = \frac{-\rho_s}{\epsilon_s} = \frac{-q}{\epsilon_s} ax \quad \text{เมื่อ} \quad -\frac{W}{2} \leq x \leq \frac{W}{2} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ a คือค่าเกรเดียนต์ของสารเจือ (หน่วยเป็น cm^{-4}) และ W คือความกว้างของเขตปลอดพาหะค่าสนามไฟฟ้าของรอยต่อแบบลาดจะมีค่า

$$\xi(x) = -\frac{qa}{\epsilon_s} \left[\frac{(W/2)^2 - x^2}{2} \right] \quad (2.43)$$

ที่ตำแหน่ง $x=0$ จะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและมีค่า

$$\xi_m = \frac{qaW^2}{8\epsilon_s} \quad (2.44)$$

ดังนั้นค่าศักย์ภายในและค่าความกว้างของชั้นปลอดพาหะจะมีค่า

$$V_{bi} = \frac{qaW^3}{12\epsilon_s} \quad (2.45)$$

$$W = \left[\frac{12\epsilon_s V_{bi}}{qa} \right]^{1/3} \quad (2.46)$$

2.3.2.3 ค่าความจุของชั้นปลอดพาหะ (Depletion capacitance)

ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของรอยต่อ จะแสดงในรูปของประจุ (Q) (ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) ในเขตปลอดพาหะดังความสัมพันธ์

$$C_j \equiv \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{W \frac{dQ}{\epsilon_s}} = \frac{\epsilon_s}{W} \quad \text{F/cm}^2 \quad (2.47)$$

ในกรณีที่มีการเจือสาร ในอีกด้านหนึ่งสูงๆ จะเรียกว่า รอยต่อแบบชั้นข้างเดียว จะมีค่าความจุไฟฟ้าคือ

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_B}{2(V_{bi} - V)}} \quad (2.48)$$

หรือ

$$\frac{1}{C_j^2} = \frac{2(V_{bi} - V)}{q\epsilon_s N_B} \quad (2.49)$$

เมื่อ N_B คือ ความเข้มข้นของสารเจือในเนื้อสารกึ่งตัวนำ

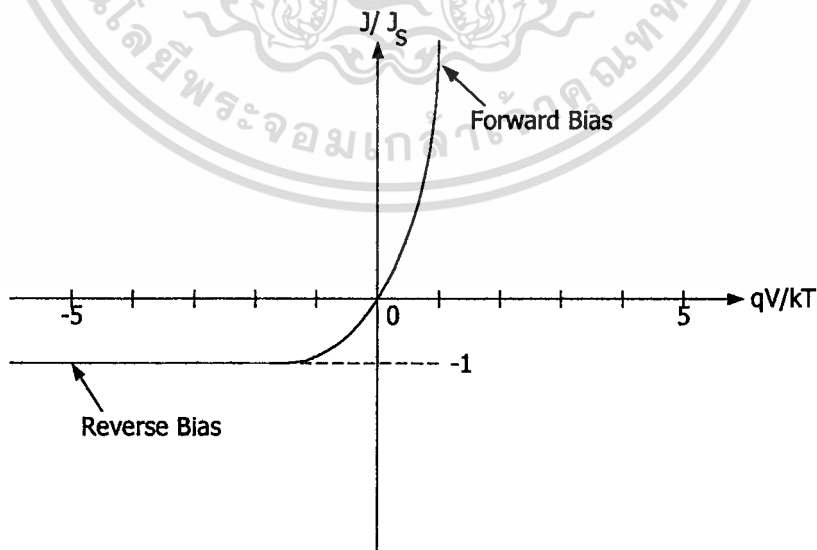
2.3.2.4 สมบัติกระแส-แรงดัน (Current-Voltage Characteristics)

ในการป้อนแรงดันไบแอสแก่รอยต่อแบบพี-เอ็น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการไหลของกระแส คือ เมื่อป้อนแรงดันไบแอสตรงให้กับรอยต่อจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าตรงรอยต่อมีค่าลดลง ทำให้กระแสที่ไหลลดลง ในขณะที่กระแสแพร่ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่าแรงดันไบแอส ส่วนในกรณีของการป้อนแรงดันย้อนกลับจะกั้นการแพร่ซึ่งของพาหะข้างมากทำให้ค่ากระแสแพร่ซึ่งเป็นศูนย์ แต่กระแสที่พาหะเนื่องจากพาหะข้างน้อยซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสแพร่ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลง

กระแสรวมทั้งหมดของรอยต่อแบบพี-เอ็นจะมีค่าดังสมการ

$$J = J_p(-x_p) + J_n(x_n) = J_s(e^{qV/KT} - 1) \quad (2.50)$$

เมื่อ J_s คือค่ากระแสอิ่มตัว

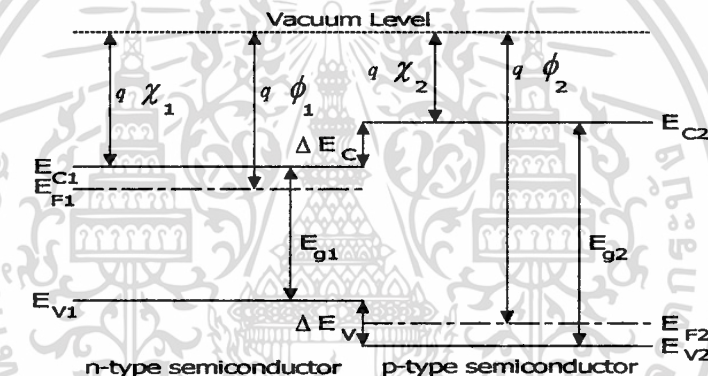


รูปที่ 2.12 แสดงค่ากระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

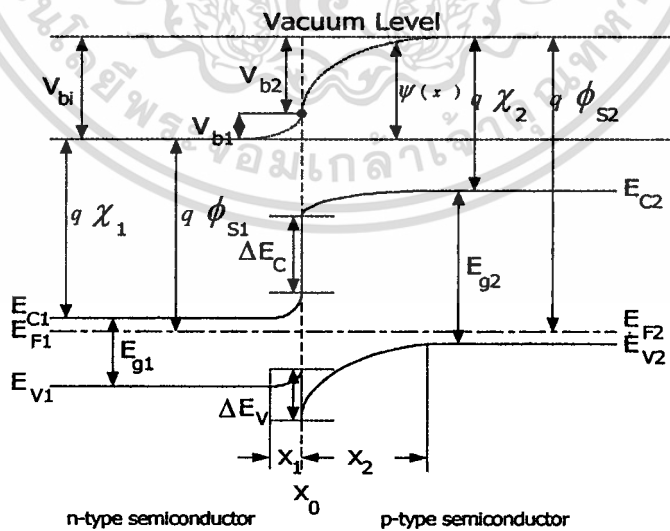
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 สารกึ่งตัวนำรอยต่อเฮเทอโร (Heterojunction semiconductor)

เมื่อมีการปลูกชั้นของสารกึ่งตัวนำในรูปของผลึกเดี่ยวลงบนผลึกของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันจะทำให้เกิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชัน โดยทั่วไปการสร้างรอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันจะได้ดีเมื่อค่าคงที่ของโครงผลึกของสารกึ่งตัวนำมีค่าใกล้เคียงกัน เช่น รอยต่อของเจอร์มาเนียมชนิดเอ็น (n-Ge) กับ แกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิดพี (p-GaAs) รอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันส่วนใหญ่จะนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านอุปกรณ์ทางแสง รูปที่ 2.13 แสดงรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชัน ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่จะนำมาสร้างรอยต่อจะต้องมีค่าแถบพลังงานต้องห้าม ค่าความยินยอมสัมพัทธ์ ค่าฟังก์ชันงานและค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนแตกต่างกัน จากรูปที่ 2.13(ก) ค่าความแตกต่างระหว่างขอบของแถบนำจะมีค่าเท่ากับ ΔE_C และค่าความแตกต่างระหว่างขอบของแถบวาเลนซ์มีค่า ΔE_V



(ก) ขณะที่วัสดุทั้งสองอยู่แยกกัน



(ข) รอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันที่สภาวะสมดุล

รูปที่ 2.13 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อเฮเทอโร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.13(ข) เมื่อทำการสร้างรอยต่อระดับเฟอร์มี E_{F1} และ E_{F2} จะปรับระดับโดยการถ่ายประจุพาหะระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจนเกิดการสร้างเขตปลอดพาหะเมื่อรอยต่อเข้าสู่สภาวะสมดุล และจะมีการโค้งงอของแถบพลังงานที่ผิวของรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด คุณสมบัติของรอยต่อเฮเทอโรคือ การที่อิเล็กตรอนและโฮลมองเห็นความสูงของกำแพงพลังงานที่แตกต่างกันเมื่อทำการไบแอสไปหน้าให้แก่อรอยต่อ จึงเสมือนว่าเป็นการอนุญาตให้พาหะเพียงชนิดเดียวสามารถถูกฉีดข้ามรอยต่อได้

ความกว้างของเขตปลอดพาหะของรอยต่อแบบเฮเทอโรสามารถหาได้เช่นเดียวกับกรณีของรอยต่อแบบเนื้อเดียวกัน แต่จะใช้ค่าความยินยอมสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ในแต่ละด้านของรอยต่อ สำหรับความกว้างของเขตปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่า

$$x_1 = \sqrt{\frac{2N_{A2}\epsilon_1\epsilon_2(V_{bi} - V)}{qN_{D1}(\epsilon_1N_{D1} + \epsilon_2N_{A2})}} \quad (2.51)$$

ส่วนความกว้างของเขตปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีค่า

$$x_2 = \sqrt{\frac{2N_{D1}\epsilon_1\epsilon_2(V_{bi} - V)}{qN_{A2}(\epsilon_1N_{D1} + \epsilon_2N_{A2})}} \quad (2.52)$$

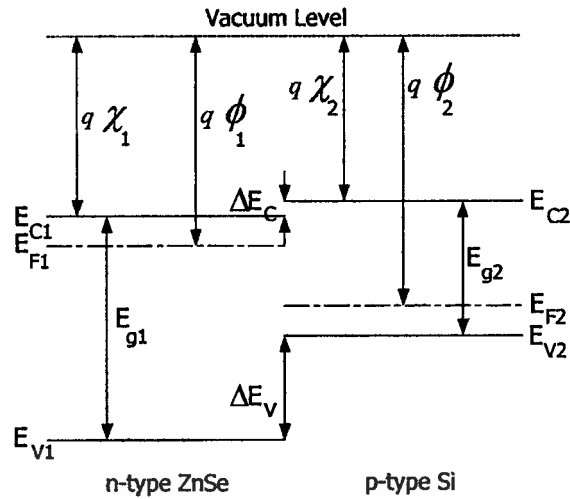
ค่าความจุของรอยต่อเฮเทอโรหาได้จากสมการ

$$C = \sqrt{\frac{q\epsilon_1\epsilon_2N_{D1}N_{A2}}{2(N_{D1}\epsilon_1 + N_{A2}\epsilon_2)(V_{bi} - V)}} \quad (2.53)$$

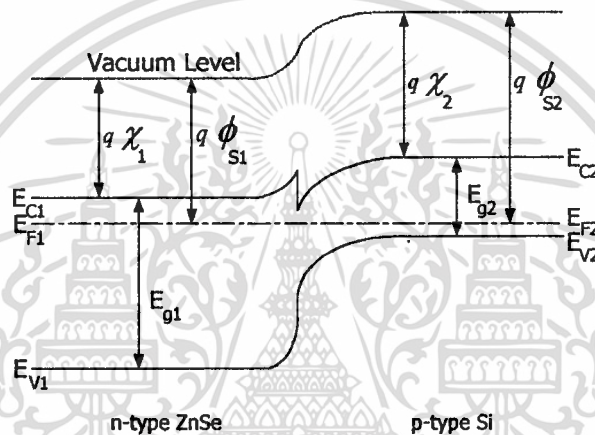
เมื่อ V คือค่าแรงดันไบแอส

สำหรับโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อเฮเทอโรจะมีความซับซ้อนมากกว่ารอยต่อที่เกิดจากการสร้างด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน ดังนั้นในกรณีรอยต่อเฮเทอโรจึงจำเป็นต้องเชื่อถือข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อนำข้อมูลมาใช้สร้างรอยต่อได้อย่างแม่นยำ

สำหรับ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อแบบเฮเทอโรของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ชนิดเอ็นและซีลีคอนชนิดพีแสดงดังรูปที่ 2.14



(ก) ขณะที่วัสดุทั้งสองอยู่แยกกัน



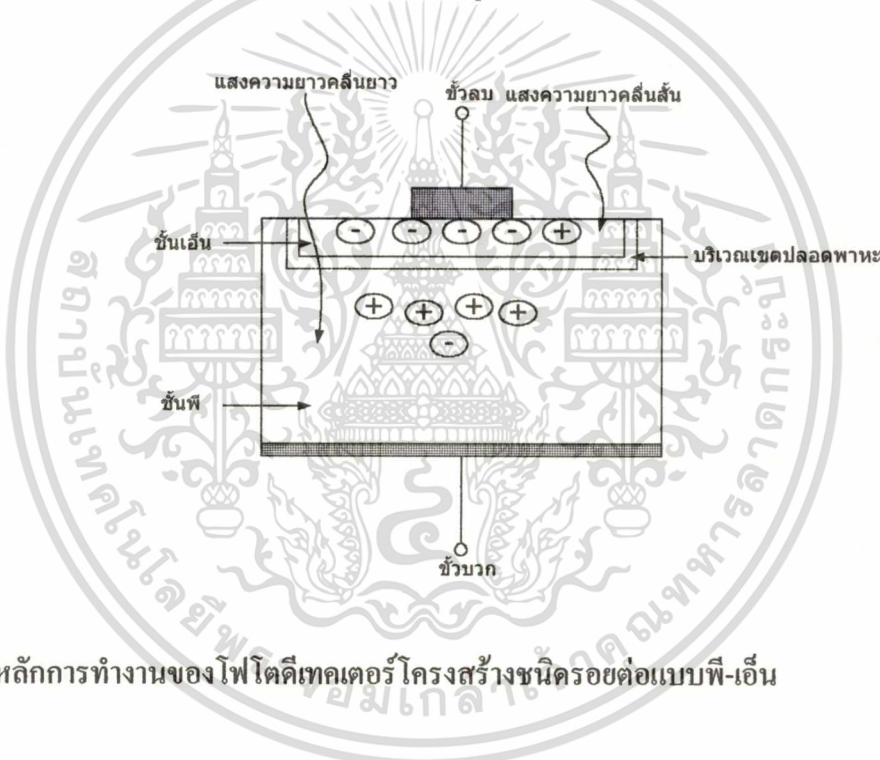
(ข) รอยต่อเฮเทอโรที่สภาวะสมดุล

รูปที่ 2.14 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ชนิดเอ็นและซิลิกอนชนิดพี

ค่าแถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์ซีลีไนด์และซิลิกอนมีค่า 2.82 และ 1.12 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ เมื่อค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์และซิลิกอนมีค่า 4.84 และ 4.52 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ ส่วนค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์และซิลิกอนมีค่า 4.09 และ 4.01 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ ดังนั้นค่า ΔE_C ของรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์และซิลิกอนมีค่าเท่ากับ $q(\chi_{\text{ZnSe}} - \chi_{\text{Si}}) = 0.08$ อิเล็กตรอนโวลต์ และ ΔE_V มีค่าเท่ากับ $(E_{\text{ZnSe}} - E_{\text{Si}}) - q(\chi_{\text{ZnSe}} - \chi_{\text{Si}}) = 1.78$ อิเล็กตรอนโวลต์

2.4 หลักการทำงานของโฟโตดีเทคเตอร์

หลักการทำงานของโฟโตดีเทคเตอร์ที่มีโครงสร้างชนิดรอยต่อแบบพี-เอ็นแสดงดังรูปที่ 2.15 ที่ด้านรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และติดต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นรอยต่อพี-เอ็น ที่รอยต่อพี-เอ็นนี้ทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ในกรณีโฟโตดีเทคเตอร์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชั้นเอ็นเตรียมได้จากการแพร่ซึมธาตุฟอสฟอรัส (P) เข้าสู่ซิลิกอนด้วยความลึกประมาณ 1 ไมโครเมตร ที่บริเวณตรงกลางรอยต่อพี-เอ็นเป็นชั้นของเขตปลอดพาหะ ในการผลิตจริงจะมีการควบคุมความหนาและปริมาณการโด๊ปสารเจือปนของชั้นพีและชั้นเอ็น ให้เหมาะสมซึ่งจะช่วยให้โฟโตดีเทคเตอร์ไวต่อแสงในย่านที่ต้องการได้และสามารถทำงานที่ความถี่สูงที่ต้องการได้



รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างชนิดรอยต่อแบบพี-เอ็น

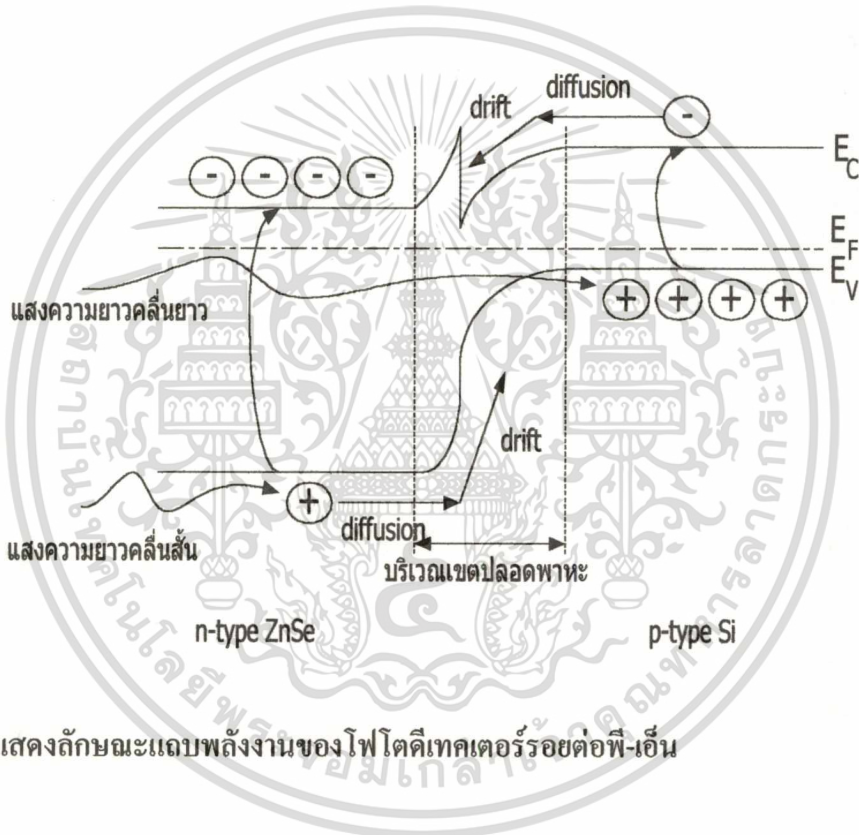
เมื่อมีแสงตกกระทบโฟโตดีเทคเตอร์และถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือ

$$h\nu \geq E_g \quad (2.54)$$

แสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืนโดยพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบการนำและที่แถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งชั้นเอ็น ชั้นของเขตปลอดพาหะและชั้นพี อิเล็กตรอนที่เกิดในแถบการนำในชั้นพีจะแพร่กระจายไปสู่ชั้นเอ็นและอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบการนำในเขตปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในพัคพาให้วิ่งไปสู่ชั้นเอ็น ส่วนกรณีของโฮลก็จะไหลในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือจะไหลจากแถบวาเลนซ์ในชั้นเอ็นหรือชั้นปลอดพาหะไปสู่ชั้นพี จำนวนของการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้จะแปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนของแสง (photon flux) ที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน อิเล็กตรอนที่สะสมในชั้นเอ็นจะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและโฮลที่สะสมในชั้นพีจะทำให้ชั้นพีมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก เมื่อทำการต่อโฟโตดีเทคเตอร์กับวงจรภายนอก อิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้นเอ็นและโฮลก็จะไหลออกจากชั้นพีไปสู่วงจรภายนอก



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็น

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง (Electron-Beam Evaporator System)

หลักการของการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูงคือ การบังคับลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าให้ตกลงบนสารกึ่งตัวนำซึ่งบรรจุอยู่ภายในเบ้าหลอมสาร (Crusible) ลำอิเล็กตรอนเกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดทั้งสแตเจนจนเกิดปรากฏการณ์เทอร์มิโอนิกอิมิสชันของอิเล็กตรอน เมื่อลำอิเล็กตรอนชนเข้ากับผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในตัวเป็นพลังงานความร้อน จากนั้นสารกึ่งตัวนำจะเกิดการระเหยขึ้นไปเกาะบนแผ่นฐานรองรับและคริสตอล ไอระเหยของสารที่ขึ้นไปเกาะติดกับคริสตอลจะทำให้ความถี่ของคริสตอลเปลี่ยนแปลงไป ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะสามารถนำมาคำนวณเป็นความหนาของฟิล์มบางได้ ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูงแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง

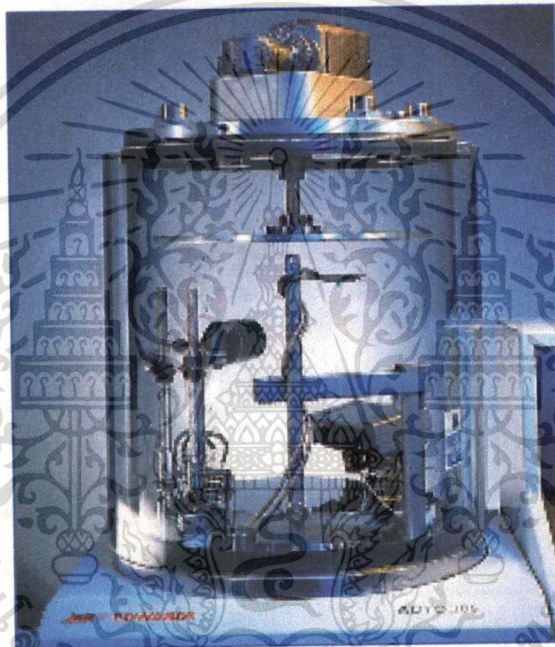
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูงประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

- ห้องสุญญากาศ (Chamber)
- ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์วัดความดันสุญญากาศ (Vacuum pump system)
- แผงควบคุมการทำงานของระบบระเหยสาร (Controller)
- แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอน (Power supply)

3.1.1 ห้องสุญญากาศสูง

การจัดอุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การจัดอุปกรณ์ในห้องสุญญากาศ

องค์ประกอบของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศประกอบด้วย

- แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Source)
เป็นแหล่งกำเนิดของลำอิเล็กตรอนซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์เทอร์มิโอนิกอิมิสิชันของอิเล็กตรอน
- ชัตเตอร์ (Shutter)
ใช้ในการเปิด/ปิด โขงสารระเหยจากเบ้าหลอมสาร (Crucible) ที่จะขึ้นไปเกาะที่แผ่นฐานรองรับ เมื่อกดเปิดชัตเตอร์จะเป็นการเริ่มวัดความหนาของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คริสตอล (Crystal sensor)

คริสตอลคือ แผ่นกระจกที่มีทั้งความเร็วและหนูน ซึ่งถูกกระตุ้นโดยการสั่นของสัญญาณ จากหน่วยของการสั่น (Oscillator Unit) โดยในช่วงแรกนี้การสั่นของคริสตอล (Crystal oscillator) จะมีความถี่ประมาณ 6 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ความถี่ของการสั่น สามารถวัดได้จากมวลของชั้นสารที่เกาะบนพื้นผิวคริสตอล และขณะที่ชั้นของสาร ระเหยกำลังถูกระเหยการสั่นจะมีค่าลดลง การคำนวณหาความหนาของฟิล์มบาง

$$T_f = \frac{N_q \cdot D_q \cdot f^2 \cdot (f_q - f)}{D_f} \quad (3.1)$$

เมื่อ T_f คือความหนาของฟิล์มบาง (cm)

D_q คือความหนาแน่นของควอตซ์ (g.cm^{-3})

D_f คือความหนาแน่นของฟิล์มบาง (g.cm^{-3})

N_q คือค่าคงที่ความถี่ของการสั่นของคริสตอล (Hz.cm^{-1})

f คือความถี่ของคริสตอลภายหลังการระเหยสาร (Hz)

f_q คือความถี่ของคริสตอลก่อนการระเหยสาร (Hz)

- ตัวให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ (Substrate Heater)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับในการระเหยสารภายในห้อง สูญญากาศ

- เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เป็นตัววัดอุณหภูมิภายในห้องสูญญากาศ

- ตัวยึดจับแผ่นฐานรองรับ (Substrate Workholder)

เป็นตัวยึดจับแผ่นฐานรองรับในการระเหยสารภายในห้องสูญญากาศ

3.1.2 ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ

3.1.2.1 ปั๊มกลโรตารี (Mechanical rotary pump)

ปั๊มกลโรตารีใช้ในการสร้างสุญญากาศขั้นต้น สามารถสร้างสุญญากาศตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึงความดันประมาณ 10^{-3} มิลลิบาร์ หลักการทำงานคือ แก๊สหรืออากาศในภาชนะจะถูกขับออกโดยการเคลื่อนไหวยของลูกสูบ ทำให้แก๊สในห้องสูบมีความดันเพิ่มมากขึ้นจนมากกว่าความดันบรรยากาศภายนอกและแก๊สจะถูกขับออกมา ประสิทธิภาพของปั๊มขึ้นอยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.) ผิวของสเตเตอร์ (Stator) และโรเตอร์ (Rotor) จะต้องสะอาด มันเรียบและที่กำบัง (Shield) ด้านบนจะต้องไม่สึกกร่อนง่าย
- 2.) การกำบังระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ อาศัยน้ำมันเป็นตัวหล่อลื่นและระบายความร้อนไปในตัว
- 3.) แก๊สที่อัดเพื่อขับออกจากปั๊มอาจมีไอน้ำปะปนอยู่ ไอน้ำหรือไอของของเหลวนี้ อาจละลายในน้ำมันที่ความดันสูง จึงไม่ถูกขับออกโดยง่าย แต่จะถูกนำกลับเข้าไปในห้องสเตเตอร์ได้อีก ทำให้ประสิทธิภาพการปั๊มลดลง วิธีแก้ไขให้ใช้แก๊สบัลลาสต์ (Gasballast)

ลักษณะของปั๊มกลโรตารีแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะของปั๊มกลโรตารี

3.1.2.2 ปั๊มกังหันโมเลกุล (Turbomolecular pump)

ปั๊มกังหัน โมเลกุลจะใช้ในการสร้างสุญญากาศตั้งแต่ 10^{-3} - 10^{-10} มิลลิบาร์ หลักการทำงานคือ แก๊สหรืออากาศในภาชนะจะถูกขับออกเนื่องจากการหมุนของใบพัด ปั๊มกังหันโมเลกุลจะประกอบด้วยโรเตอร์และสเตเตอร์หลายชั้น ซึ่งแก๊สภายในภาชนะจะถูกขับออกจากใบพัดชั้นบนสุดลงสู่ชั้นล่างและถูกขับออกสู่ภายนอก ประสิทธิภาพของปั๊มขึ้นอยู่กับ

- 1.) ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งจะอยู่ในช่วง 20,000 – 30,000 รอบต่อ นาที (Revolutions per minute ; rpm)
- 2.) น้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส ซึ่งแก๊สที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะถูกขับออกจากภาชนะได้ดีกว่าแก๊สที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า เช่น แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สฮีเลียมจะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยจึงถูกขับออกจากภาชนะได้ดียาก

ลักษณะของปั๊มกังหัน โมเลกุลแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะของปั๊มกังหัน โมเลกุล

3.1.2.3 เกจพิรานี (Pirani gauge)

ใช้วัดความดันในช่วงความดันบรรยากาศถึง 10^{-3} มิลลิบาร์ ภายในเกจพิรานีมีเส้นลวดซึ่งถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของเส้นลวดจะเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากความร้อนถูกพาไปโดยโมเลกุลของแก๊สที่มาปะทะ ที่ความดันต่ำอุณหภูมิของเส้นลวดจะสูงขึ้นทำให้ค่าความต้านทานของเส้นลวดสูงขึ้นด้วย ความต้านทานของเส้นลวดที่เปลี่ยนแปลงจะวัดได้โดยใช้วงจรวีตสโตนบริจด์ (Wheatstone bridge) ลักษณะของเกจพิรานีแสดงดังรูปที่ 3.5



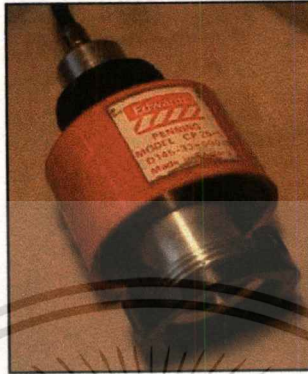
รูปที่ 3.5 ลักษณะของเกจพิรานี

3.1.2.4 เกจเพนนิง (Penning gauge)

เรียกอีกอย่างว่า เกจไอออไนเซชัน (Ionization gauge) หรือ เกจแบบขั้วแคโทดเย็น (Cold cathode ionisation gauge) ใช้วัดความดันบรรยากาศในช่วง $10^{-3} - 10^{-10}$ มิลลิบาร์ หลักการทำงานคือใช้สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดเย็นทำให้เกิดการแตกตัวของแก๊สทำให้เกิดอิเล็กตรอนและไอออนบวก อิเล็กตรอนที่เกิดจากการแตกตัวจะถูกเร่งไปยังขั้วแอโนด และจะถูกบังคับให้วิ่งกลับป้อนมาระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนดโดยสนามแม่เหล็ก จนกระทั่งถูกจับไว้โดยขั้วแอโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนไอออนบวจะวิ่งไปปะทะขั้วแคโทดแล้วปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สองและอะตอมที่เป็นกลาง ซึ่งกระแสไฟฟ้าในการแตกตัวของแก๊สจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของความดัน ลักษณะของเกจเพ็นนิ่งแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะของเกจเพ็นนิ่ง

3.1.3 แผงควบคุมการทำงานของระบบระเหยสาร

แผงควบคุมการทำงานของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน ในสุญญากาศแสดงดังรูปที่

3.7



รูปที่ 3.7 แผงควบคุมการทำงานของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของแผงควบคุมการทำงานของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศประกอบด้วย

- Main Switch
ใช้ในการเปิด/ปิดแผงควบคุมการทำงาน
- Status Control
ใช้ควบคุมและแสดงค่าความดันภายในห้องสุญญากาศ
- Thickness Monitor
ใช้ในการวัดและแสดงผล อัตราการเคลือบและความหนาของฟิล์มในขณะที่ทำการระเหยฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ
- Rotary Workholder Control
ใช้ในการควบคุมการหมุนของตัวยึดจับแผ่นฐานรองรับ
- Source Control
ใช้ในการควบคุมการทำงานของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน
- Sweep Control
ใช้ในการควบคุมลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปตามแนวได้ 2 ทิศทางได้แก่
 - ทิศทาง X คือทิศทางที่อยู่ในแนวเดียวกับ Source
 - ทิศทาง Y คือทิศทางที่อยู่ตามขวางกับ Source
- Substrate Heater Control
ใช้ในการควบคุมตัวให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ
- Turret Control
ใช้ในการควบคุมการหมุนปรับตำแหน่งของเบ้าหลอมสาร
- Shutter Control
ใช้ในการควบคุมการเปิด/ปิดของชัตเตอร์

3.1.4 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอน

เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอนของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอนของระบบระเหยสาร

3.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ (Substrate cleaning)

แผ่นฐานรองรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นกระจกสไลด์ของบริษัท Micro Slides ขนาด 75×25 มิลลิเมตร ในการทำความสะอาดกระจกสไลด์จะมีขั้นตอนการทำความสะอาด โดยการนำกระจกสไลด์มาล้างให้สะอาดด้วยวิธีอัลตราโซนิกส์ (Ultrasonics) ซึ่งทำการล้างคราบสกปรกด้วยน้ำไร้ไอออน (De-ionized water) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการล้างน้ำด้วยการล้างในไอโซโพรพานอล (Isopropanal) เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปล้างไขมันบนแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำอะซิโตน (Acetone) เป็นเวลา 15 นาที สุดท้ายทำการล้างด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ (Methanol) เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดไขมันที่เหลือ แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน เครื่องอัลตราโซนิกส์และน้ำยาเคมีในการทำความสะอาดแผ่นสไลด์แสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 เครื่องอัลตราโซนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 น้ำยาเคมีในการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ

3.3 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยลำอิเล็กตรอนจะทำในระบบสุญญากาศสูงประมาณ 10^{-6} มิลลิบาร์ ฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ไนต์ที่ใช้มีความบริสุทธิ์ 99.995% ขนาดของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ไนต์ที่เตรียมได้คือ 1.5×1.5 ตารางเซนติเมตร อุปกรณ์ที่ใช้ในการระเหยสาร โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูงแสดงดังรูปที่ 3.11 และเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ไนต์โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูงคือ



รูปที่ 3.11 สารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟด์ไนต์และอุปกรณ์ในการระเหยสาร

3.3.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ

ในการปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ในค้จะทำการปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับตั้งแต่ 300 เคลวิน 373 เคลวิน 423 เคลวินและ 473 เคลวิน ที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร จากนั้นนำฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้ไปทำการตรวจสอบสมบัติทาง โครงสร้างและสมบัติทาง ไฟฟ้า

3.3.2 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของซิงค์ซัลไฟด์

ในการปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ในค้จะทำการปลูกที่ความหนาตั้งแต่ 100 นาโนเมตร 300 นาโนเมตร 500 นาโนเมตรและ 1 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน จากนั้นนำฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้ไปตรวจสอบสมบัติทาง โครงสร้าง

3.4 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยวิธีการเจือด้วยแก๊สในโตรเจน

3.4.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยวิธีการทำปฏิกิริยากับแก๊สในโตรเจน

ในขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยวิธีการทำปฏิกิริยากับแก๊สในโตรเจน จะเริ่มจากการปล่อยแก๊สในโตรเจนเข้าไปในห้องสุญญากาศในขณะที่ทำการระเหยฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ แก๊สในโตรเจนที่ปล่อยเข้าไปจะมีความดันอยู่ในช่วง 6×10^{-5} ถึง 1.5 มิลลิบาร์ โดยแก๊สในโตรเจนที่ใช้มีความบริสุทธิ์ 99.999 % อะตอมของไนโตรเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟด์มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมของไนโตรเจนกับอะตอมของซิงค์เกิดการสร้างพันธะขึ้น ความหนาของฟิล์มบางที่ทำการระเหยเท่ากับ 500 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 300 เคลวิน จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทาง โครงสร้างและสมบัติทาง ไฟฟ้า

3.4.2 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยการฝังไอออนของแก๊สในโตรเจน

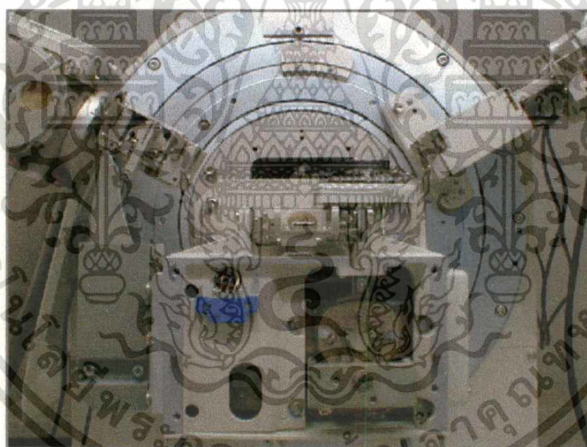
ในขั้นตอนของการปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยการฝังไอออนของแก๊สในโตรเจน จะเริ่มจากการปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่ความหนา 500 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 300 เคลวิน แล้วนำไปทำการฝังอะตอมของไนโตรเจนที่ค่าโดส (dose) ตั้งแต่ 1.4×10^{16} ถึง 5.8×10^{16} ions/cm² ที่ความแตกต่างของพลังงานศักย์ไฟฟ้าที่ห้องกำเนิดไอออนและขั้วคิ่งมีค่าประมาณ 30-60 KeV โดยเครื่อง Ion Implanter รุ่น 200-DF5 ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย เชียงใหม่ จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทาง โครงสร้าง

3.5 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนต์

ในขั้นตอนของการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนต์จะทำการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยวิธีการวัดค่าความหนาแน่นและสภาพคล่องตัวพาหะจากปรากฏการณ์ฮอลล์

3.5.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

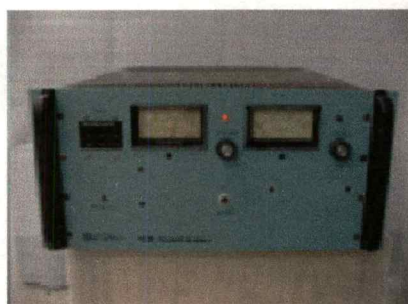
การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมของการเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน ซึ่งธาตุและสารประกอบแต่ละชนิดจะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนเฉพาะตัว ในการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะใช้เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance ของบริษัท Bruker แสดงดังรูปที่ 3.12 ซึ่งค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์เท่ากับ 1.5406 อังสตรอม



รูปที่ 3.12 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance

3.5.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความหนาแน่นและสภาพคล่องตัวพาหะจากปรากฏการณ์ฮอลล์

ในการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความหนาแน่นและสภาพคล่องตัวพาหะจากปรากฏการณ์ฮอลล์จะใช้แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก รุ่น TCR power supply แสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองจะใช้ขนาด 1.6 KGauss และใช้แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 9 โวลต์



รูปที่ 3.13 แสดงแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

3.6 ขั้นตอนในการเตรียมและตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร

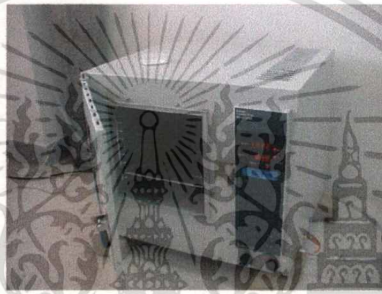
ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร โดยเริ่มจากการเตรียมแผ่นฐานรองรับซึ่งในการทดลองนี้ใช้ซิลิกอน (Si) ชนิดที่เป็นแผ่นฐานรองรับและทำการปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีความหนา 500 นาโนเมตร 1 ไมโครเมตร และ 3 ไมโครเมตร บนแผ่นฐานรองรับ

3.6.1 ขั้นตอนในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร

การทำขั้วโลหะของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร ในงานวิจัยนี้จะใช้ทองคำ (Au) เป็นวัสดุในการทำขั้วโลหะ การเตรียมขั้วโลหะนี้จะเตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยสปัตเตอริงกระแสตรง (DC Sputtering) หลังจากนั้นทำการแอนนัลภายในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เครื่องสปัตเตอริงกระแสตรงและขั้วโลหะที่เตรียมได้แสดงดังรูปที่ 3.14 และเตาอบที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.15

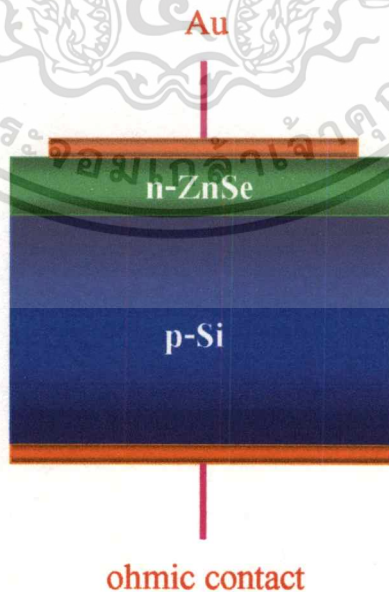


รูปที่ 3.14 แสดงเครื่องสปีดเตอริงกระแสตรงและขั้วโลหะที่เตรียมได้



รูปที่ 3.15 แสดงเตาอบที่ใช้ในการแอนนีลขั้วโลหะ

โครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโรแสดงดังรูปที่ 3.16

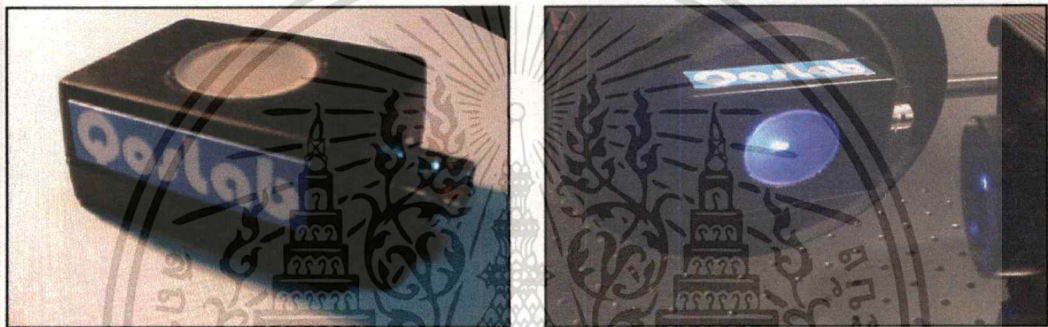


รูปที่ 3.16 โครงสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 ขั้นตอนในการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโรแบบเฮเทอโร

การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร เริ่มจากการต่อขั้วไฟฟ้ากับขั้วโลหะของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร จากนั้นนำไปวัดค่ากระแส-แรงดันซึ่งแรงดันในการไบอัสอยู่ในช่วง 0-8 โวลต์และวัดช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโรในช่วงความยาวคลื่น 350-1300 นาโนเมตร สิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโรของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์และซิลิกอนแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 สิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร

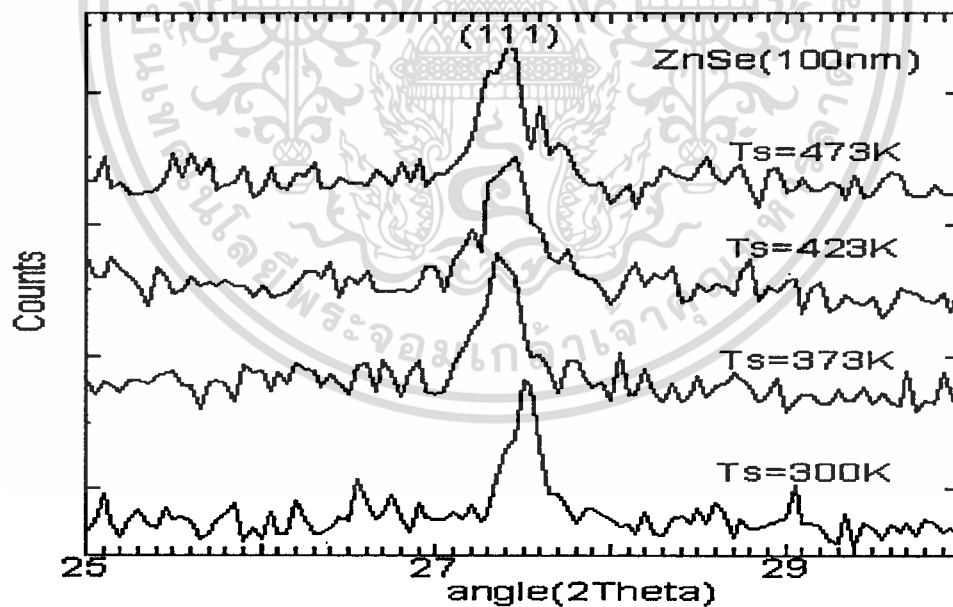
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

4.1.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ

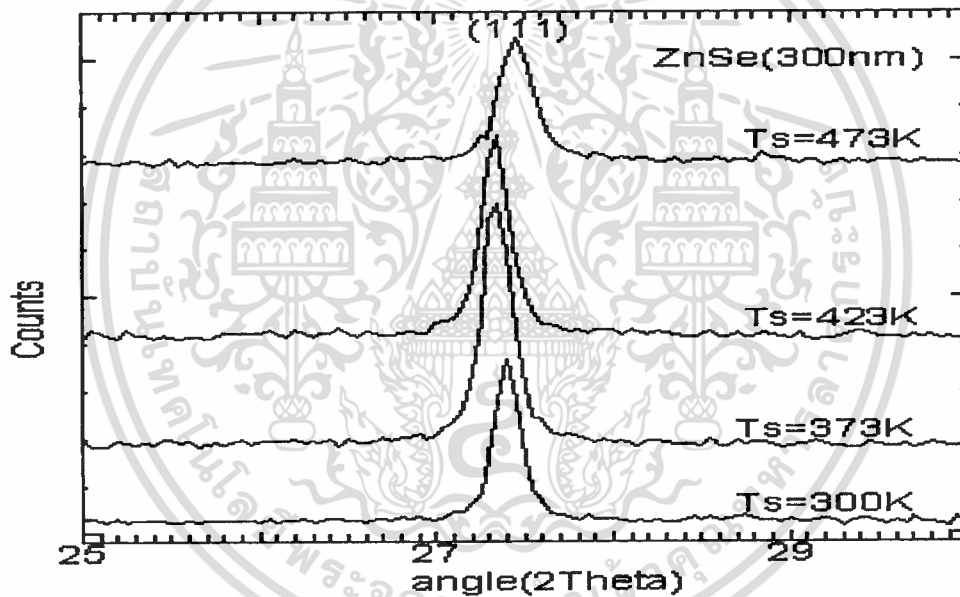
เมื่อนำฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่อุณหภูมิต่างๆของฐานรองรับที่มีความหนา 100 นาโนเมตร 300 นาโนเมตร 500 นาโนเมตร และ 1 ไมโครเมตร ไปตรวจสอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ และผลการหาค่าตัวแปรที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มีความหนา 100 นาโนเมตร 300 นาโนเมตร 500 นาโนเมตร และ 1 ไมโครเมตร จะแสดงดังตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่มีความหนา 100 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่ความหนา 100 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน

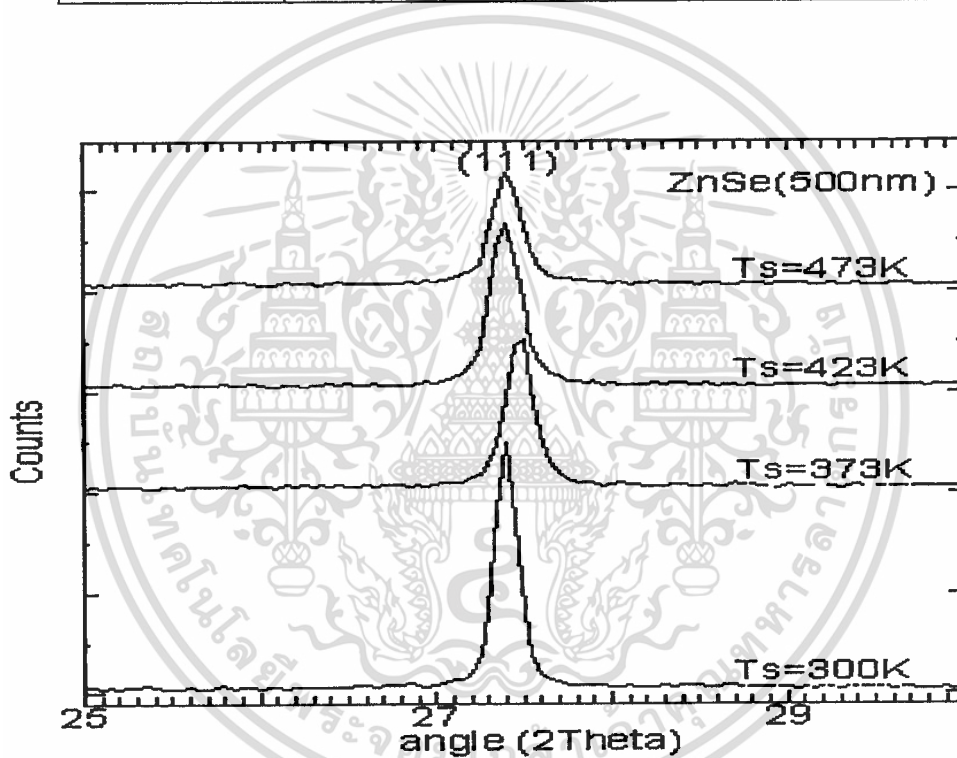
| Zinc Selenide $T_s(K)$ | 2θ (องศา) | FWHM (องศา) | d (Å) | a (Å) | D (Å) |
|---------------------------|---------------------|----------------|----------|----------|----------|
| 300 | 27.509 | 0.199 | 3.257 | 5.611 | 457.695 |
| 373 | 27.363 | 0.257 | 3.239 | 5.641 | 353.592 |
| 423 | 27.436 | 0.269 | 3.249 | 5.627 | 338.296 |
| 473 | 27.442 | 0.304 | 3.247 | 5.624 | 330.435 |



รูปที่ 4.2 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่ความหนา 300 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่ความหนา 300 นาโนเมตรที่อุณหภูมิพื้นฐานรองรับ ระหว่าง 300-473 เคลวิน

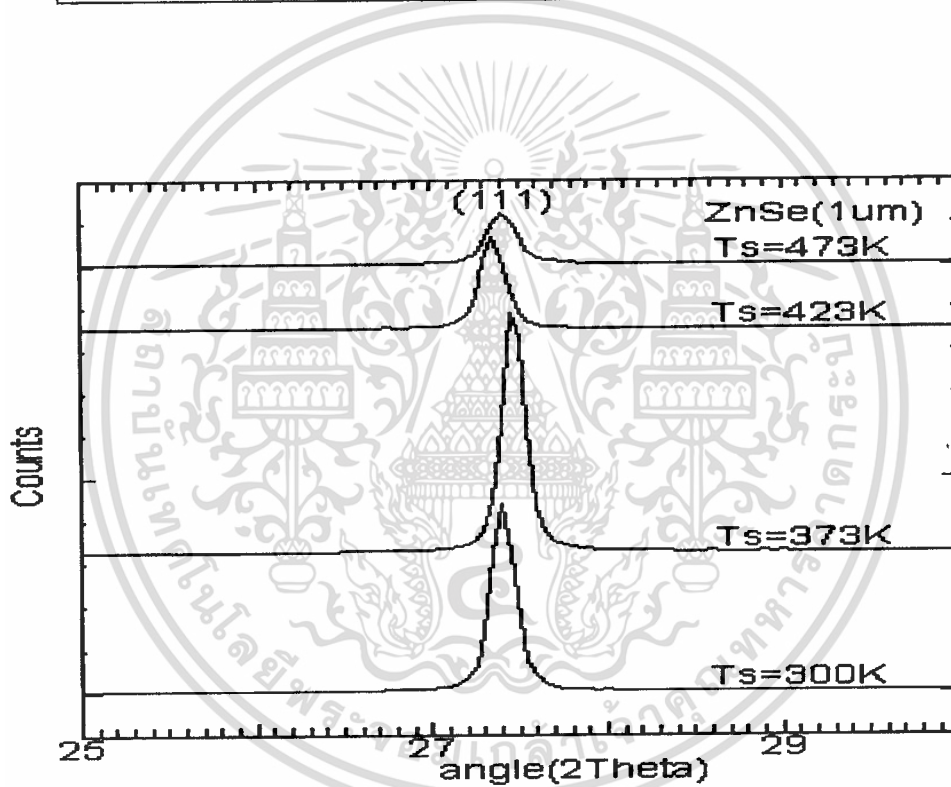
| Zinc Selenide $T_s(K)$ | 2θ (องศา) | FWHM (องศา) | d (Å) | a (Å) | D (Å) |
|---------------------------|---------------------|----------------|----------|----------|----------|
| 300 | 27.411 | 0.176 | 3.251 | 5.632 | 516.287 |
| 373 | 27.341 | 0.187 | 3.259 | 5.645 | 485.076 |
| 423 | 27.350 | 0.199 | 3.258 | 5.642 | 456.069 |
| 473 | 27.445 | 0.238 | 3.247 | 5.624 | 318.148 |



รูปที่ 4.3 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง ซิงค์ซีลีไนด์ที่ความหนา 500 นาโนเมตรที่อุณหภูมิพื้นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่ความหนา 500 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน

| Zinc Selenide $T_s(K)$ | 2θ (องศา) | FWHM (องศา) | d (Å) | a (Å) | D (Å) |
|---------------------------|---------------------|----------------|----------|----------|----------|
| 300 | 27.399 | 0.143 | 3.253 | 5.634 | 633.471 |
| 373 | 27.492 | 0.188 | 3.242 | 5.615 | 484.618 |
| 423 | 27.404 | 0.191 | 3.253 | 5.633 | 433.605 |
| 473 | 27.408 | 0.209 | 3.251 | 5.631 | 433.483 |



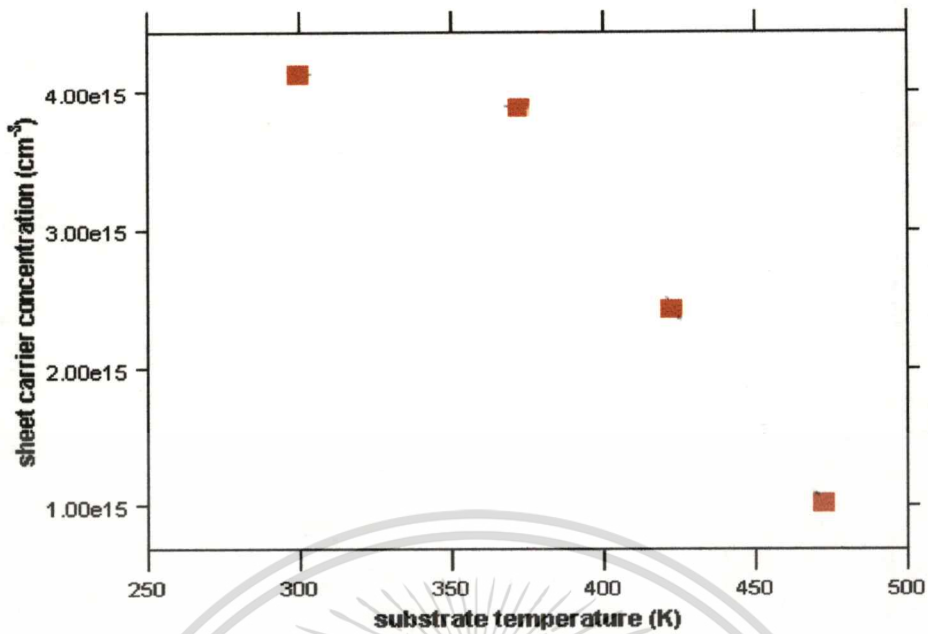
รูปที่ 4.4 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่ความหนา 1 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนต์ที่ความหนา 1 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน

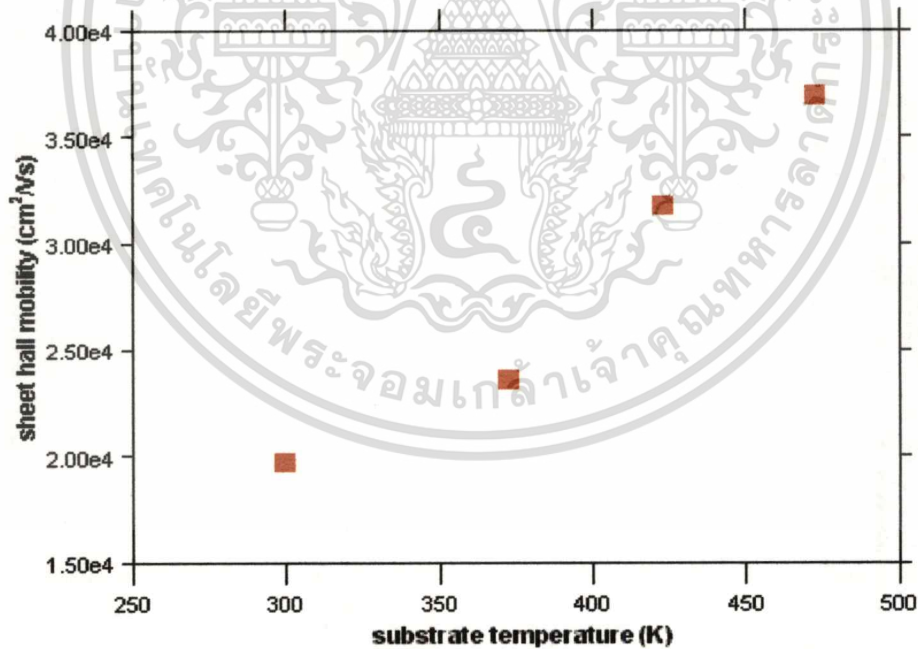
| Zinc Selenide $T_s(K)$ | 2θ (องศา) | FWHM (องศา) | d (Å) | a (Å) | D (Å) |
|---------------------------|---------------------|----------------|----------|----------|----------|
| 300 | 27.394 | 0.159 | 3.253 | 5.634 | 571.471 |
| 373 | 27.447 | 0.168 | 3.247 | 5.623 | 540.795 |
| 423 | 27.359 | 0.176 | 3.257 | 5.641 | 516.175 |
| 473 | 27.412 | 0.203 | 3.251 | 5.631 | 447.572 |

จากรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนต์จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับตั้งแต่ 300 เคลวิน 373 เคลวิน 423 เคลวินและ 473 เคลวิน ที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตรตามลำดับ พบว่าสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (111) เพียงระนาบเดียวและมุมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะมีค่าประมาณ 27.359-27.509 องศา ซึ่งจากการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า ฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนต์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนแบบลูกบาศก์ชนิดเฟซเซ็นเตอร์และเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับค่าความเข้มของสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะมีค่าลดลง

จากตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 แสดงค่าตัวแปรที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนต์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับตั้งแต่ 300 เคลวิน 373 เคลวิน 423 เคลวินและ 473 เคลวิน ที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตรตามลำดับ พบว่ามีค่าคงที่โครงสร้างผลึกประมาณ 5.6315-5.645 อังสตรอม และจะมีขนาดของเม็ดผลึกลดลงเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองรับมากขึ้น

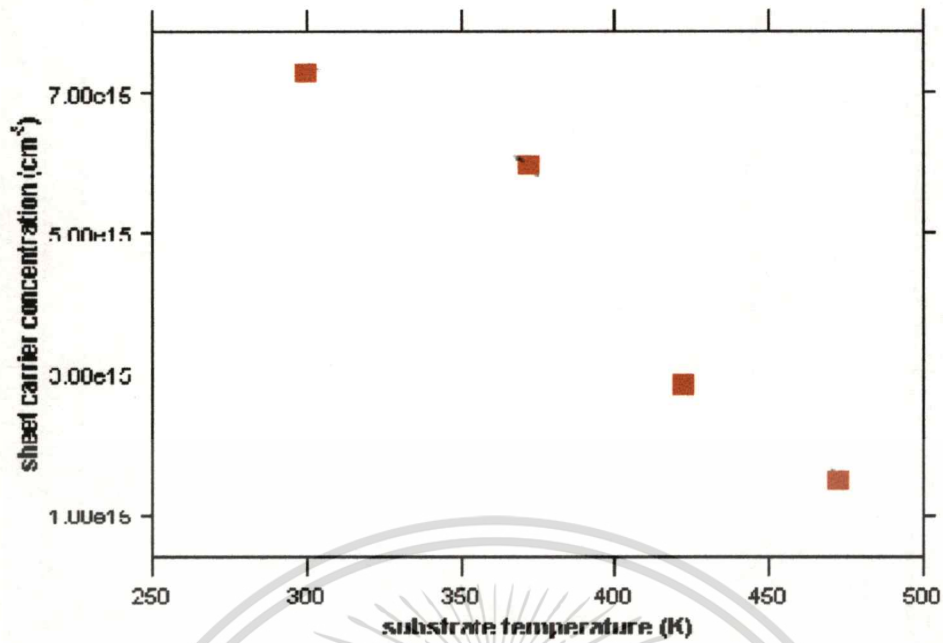


รูปที่ 4.5 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่ความหนา 500 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน

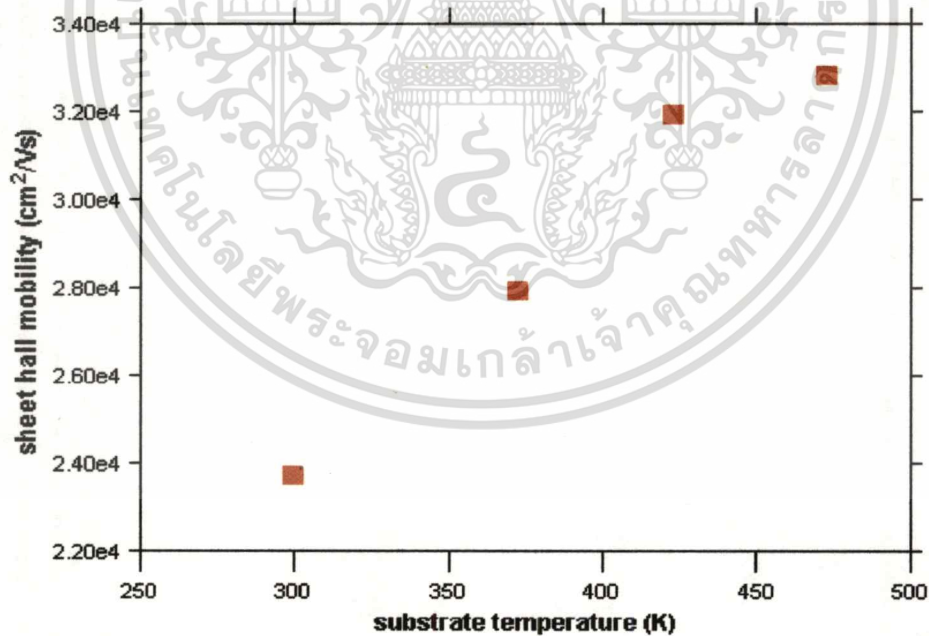


รูปที่ 4.6 แสดงค่าสภาพคล่องตัวพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่ความหนา 500 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซลีไนต์ที่ความหนา 1 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน



รูปที่ 4.8 แสดงค่าสภาพคล่องตัวพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซลีไนต์ที่ความหนา 1 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.7 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดที่ อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน ที่ความหนา 500 นาโนเมตร และ 1 ไมโครเมตร ตามลำดับ พบว่าพาหะข้างมากของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดเป็นชนิดเอ็นและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิฐานรองรับค่าความหนาแน่นพาหะจะมีค่าลดลงและที่ความหนา 1 ไมโครเมตรจะมีความหนาแน่นพาหะมากกว่าที่ความหนา 500 นาโนเมตร

4.1.2 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มบาง

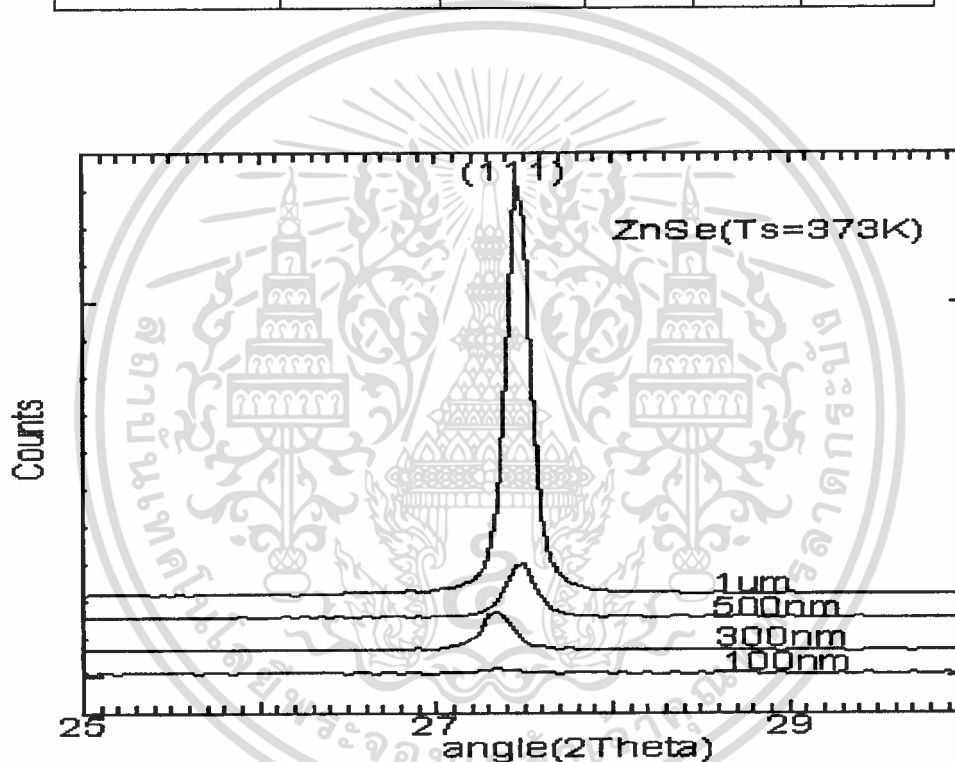
เมื่อนำฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดที่ความหนา 100 นาโนเมตร 300 นาโนเมตร 500 นาโนเมตร และ 1 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน ไปตรวจสอบสมบัติด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ได้รับผลการทดลองดังรูปที่ 4.9, 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ และผลการหาค่าตัวแปรที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะแสดงดังตารางที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในดัดที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 300 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 300 เคลวินที่ความหนา ระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร

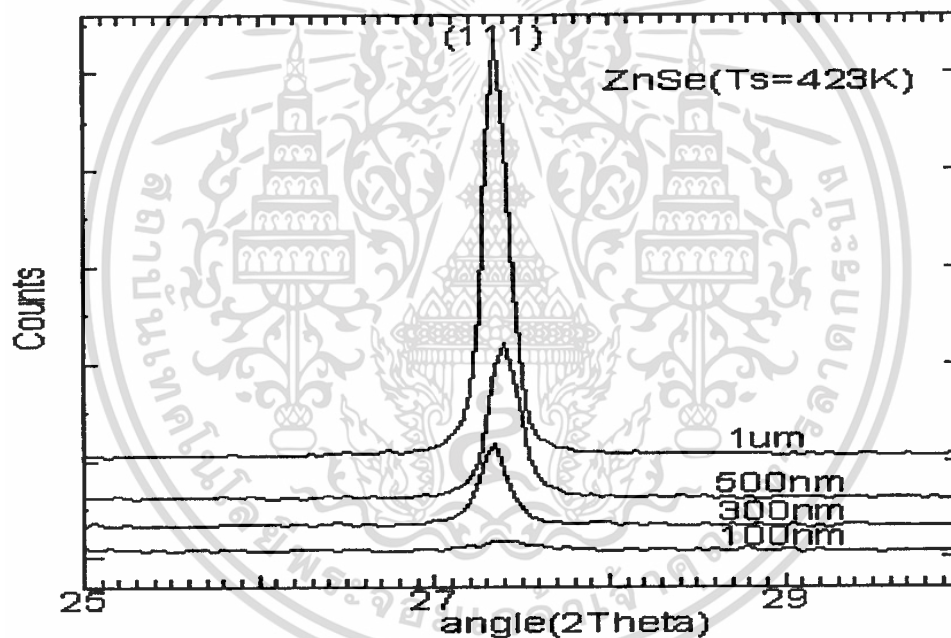
| Zinc Selenide (nm) | 2θ (องศา) | FWHM (องศา) | d (Å) | a (Å) | D (Å) |
|-----------------------|---------------------|----------------|----------|----------|----------|
| 100 | 27.509 | 0.176 | 3.239 | 5.624 | 457.695 |
| 300 | 27.411 | 0.171 | 3.251 | 5.631 | 516.287 |
| 500 | 27.411 | 0.158 | 3.251 | 5.631 | 531.427 |
| 1000 | 27.411 | 0.151 | 3.251 | 5.631 | 633.471 |



รูปที่ 4.10 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 373 เคลวินที่ความหนา ระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 373 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร

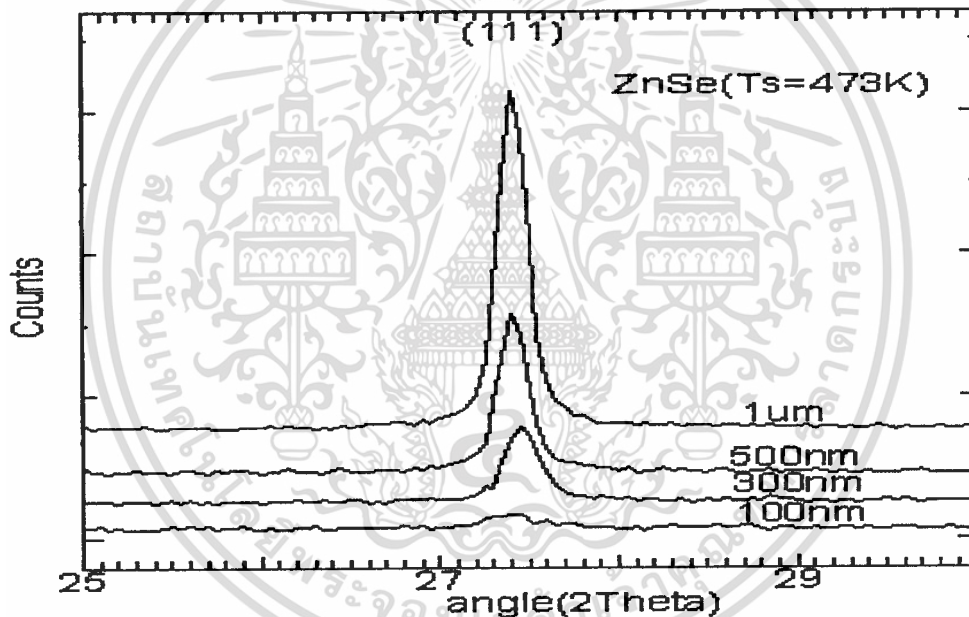
| Zinc Selenide (nm) | 2θ (องศา) | FWHM (องศา) | d (Å) | a (Å) | D (Å) |
|-----------------------|---------------------|----------------|----------|----------|----------|
| 100 | 27.363 | 0.257 | 3.257 | 5.641 | 413.592 |
| 300 | 27.341 | 0.199 | 3.259 | 5.645 | 433.605 |
| 500 | 27.492 | 0.188 | 3.242 | 5.634 | 456.069 |
| 1000 | 27.454 | 0.165 | 3.246 | 5.639 | 549.429 |



รูปที่ 4.11 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 423 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 423 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร

| Zinc Selenide (nm) | 2θ (องศา) | FWHM (องศา) | d (Å) | a (Å) | D (Å) |
|-----------------------|---------------------|----------------|----------|----------|----------|
| 100 | 27.438 | 0.303 | 3.249 | 5.627 | 425.259 |
| 300 | 27.350 | 0.209 | 3.255 | 5.641 | 433.483 |
| 500 | 27.404 | 0.187 | 3.253 | 5.634 | 485.076 |
| 1000 | 27.356 | 0.182 | 3.258 | 5.643 | 499.282 |



รูปที่ 4.12 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 473 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีสลีในค้ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 473 เคลวินที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร

| Zinc Selenide (nm) | 2θ (องศา) | FWHM (องศา) | d (Å) | a (Å) | D (Å) |
|-----------------------|---------------------|----------------|----------|----------|----------|
| 100 | 27.442 | 0.269 | 3.247 | 5.626 | 439.148 |
| 300 | 27.445 | 0.235 | 3.244 | 5.623 | 465.256 |
| 500 | 27.408 | 0.187 | 3.251 | 5.631 | 484.318 |
| 1000 | 27.405 | 0.182 | 3.253 | 5.632 | 499.384 |

จากรูปที่ 4.9, 4.10, 4.11 และ 4.12 แสดงสเปกตรัมของฟิล์มบางซิงค์ซีสลีในค้จากการตรวจสอบสมบัติด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ความหนาดังแต่ 100 นาโนเมตร 300 นาโนเมตร 500 นาโนเมตรและ 1 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการเพิ่มความหนาของฟิล์มบางซิงค์ซีสลีในค้ค่าความเข้มของสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะมีค่ามากขึ้น

จากตารางที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 แสดงค่าตัวแปรที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ซีสลีในค้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ความหนาดังแต่ 100 นาโนเมตร 300 นาโนเมตร 500 นาโนเมตรและ 1 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน ตามลำดับ พบว่าจะมีค่าคงที่โครงสร้างประมาณ 5.623-5.645 อังสตรอม และเม็ดผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มบาง

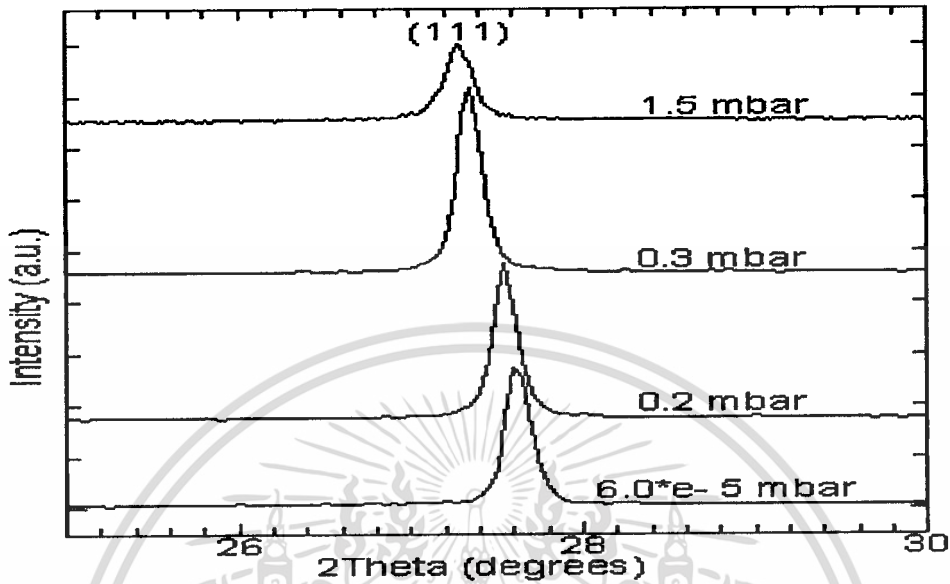
4.2 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซีสลีในค้โดยวิธีการเจือด้วยแก๊สในโตรเจน

4.2.1 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซีสลีในค้ที่มีการทำปฏิกิริยากับแก๊สในโตรเจน

ในการปลูกผลึกของซิงค์ซีสลีในค้เนื่องจากซิงค์ซีสลีในค้ที่ไม่มีการเจือสารจะมีพาหะข้างมากเป็นชนิดเอ็น ดังนั้นถ้าต้องการผลึกของซิงค์ซีสลีในค้ที่มีพาหะข้างมากเป็นชนิดพี จึงต้องทำการเจือด้วยอะตอมของไนโตรเจน ซึ่งการเจือด้วยอะตอมของไนโตรเจนจะมีหลายวิธี เช่นการเจือด้วยวิธีการทำปฏิกิริยาและการเจือโดยการฝังไอออน จากการทดลองเมื่อนำฟิล์มบางซิงค์ซีสลีในค้ที่มีการเจือด้วยแก๊สในโตรเจนโดยวิธีการทำปฏิกิริยากับแก๊สในโตรเจนที่ความดันตั้งแต่ 6×10^{-5} มิลลิบาร์ 0.2 มิลลิบาร์ 0.3 มิลลิบาร์ และ 1.5 มิลลิบาร์ ที่ความหนา 500 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า ผลการตรวจสอบโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่มีการเจือด้วยแก๊สไนโตรเจน แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่มีการทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร

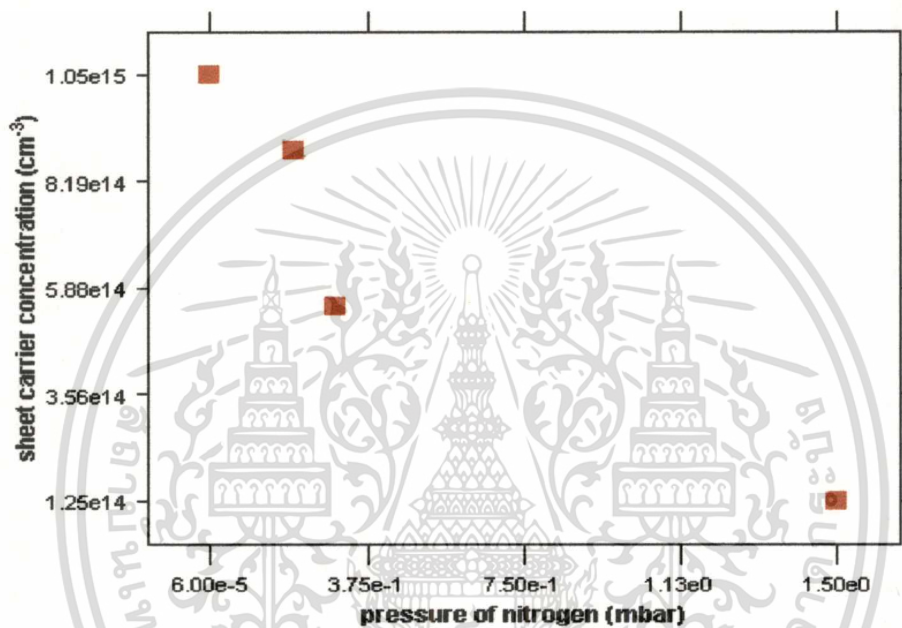
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่มีการทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร

| N doped ZnSe (mbar) | 2θ (องศา) | FWHM (องศา) | d (Å) | a (Å) | D (Å) |
|------------------------|---------------------|----------------|----------|----------|----------|
| 6×10^{-5} | 27.608 | 0.168 | 3.228 | 5.591 | 541.043 |
| 0.2 | 27.556 | 0.176 | 3.234 | 5.601 | 522.328 |
| 0.3 | 27.353 | 0.174 | 3.258 | 5.643 | 522.100 |
| 1.5 | 27.254 | 0.171 | 3.269 | 5.662 | 511.992 |

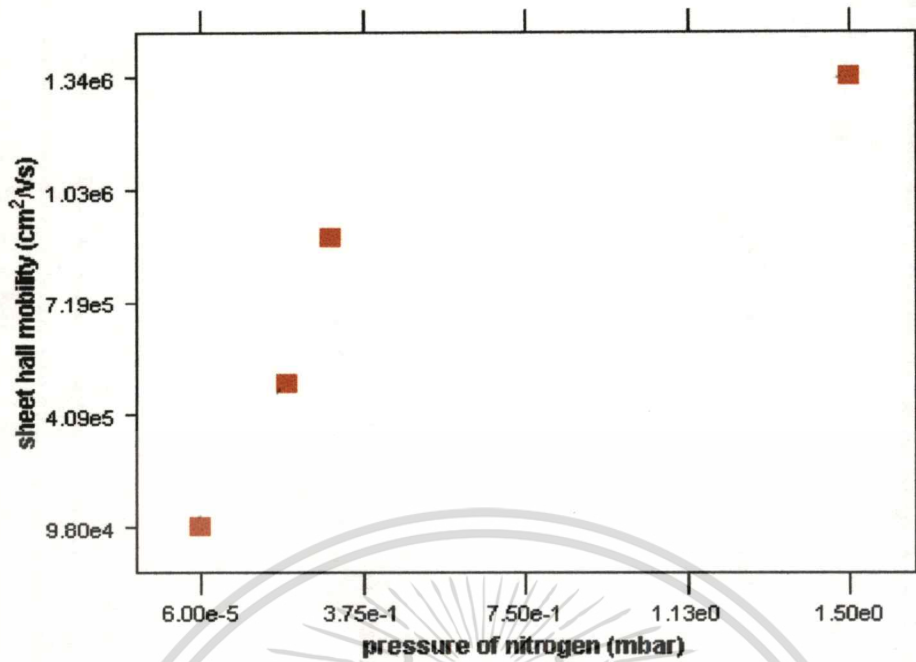
จากรูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์ที่มีการทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจน จากการตรวจสอบสมบัติด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อมีการเจือด้วยอะตอมของแก๊สไนโตรเจนโดยวิธีการทำปฏิกิริยาที่ความหนา 500 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 300

เคลวิน พบว่าเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สไนโตรเจนมากขึ้นสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะเกิดบนระนาบ (111) และมีค่ามุมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ลดลง

จากตารางที่ 4.9 แสดงค่าที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีการทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึกจะมีค่าประมาณ 5.591-5.662 อังสตรอมและขนาดของเม็ดผลึกจะเล็กลงเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 4.14 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีการทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร

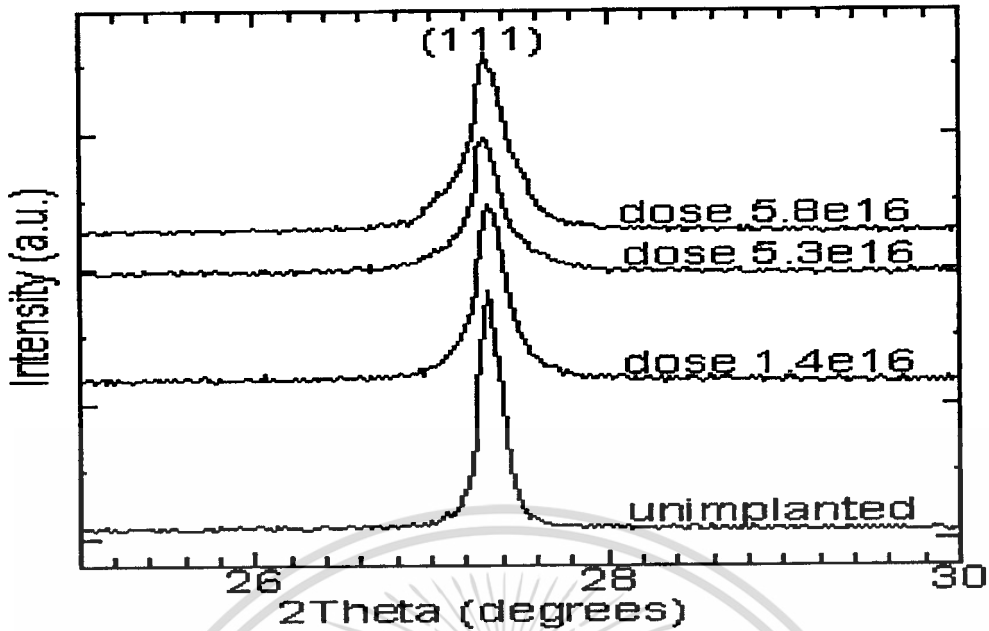


รูปที่ 4.15 แสดงค่าสภาพคล่องตัวพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีการทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร

จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีการเจือด้วยอะตอมของแก๊สไนโตรเจน โดยวิธีการทำปฏิกิริยาที่ความหนา 500 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 300 เคลวินพบว่า เมื่อเพิ่มความดันของแก๊สไนโตรเจนมากขึ้นพาหะข้างมากของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ชนิดชนิดเอ็นมีค่าลดลง

4.2.2 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีการฝังไอออนของแก๊สไนโตรเจน

วิธีการเจือสารอีกวิธีหนึ่งคือ การฝังไอออน ซึ่งวิธีการคือ จะมีไอออนที่เดิมเข้าไปรวมตัวกับอะตอมของก๊อมนิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง จากการทดลองเมื่อนำฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ไนต์ที่ความหนา 500 นาโนเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 300 เคลวิน เมื่อมีการฝังอะตอมของไนโตรเจนที่ค่าโดสตั้งแต่ 1.4×10^{16} ions/cm² 5.3×10^{16} ions/cm² และ 5.8×10^{16} ions/cm² ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีการฝังไอออนแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงผลการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง ซิงค์ซัลไฟไนต์ที่มีการฝังไอออนของแก๊สไนโตรเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่มีการฝังไอออนของแก๊สไนโตรเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร

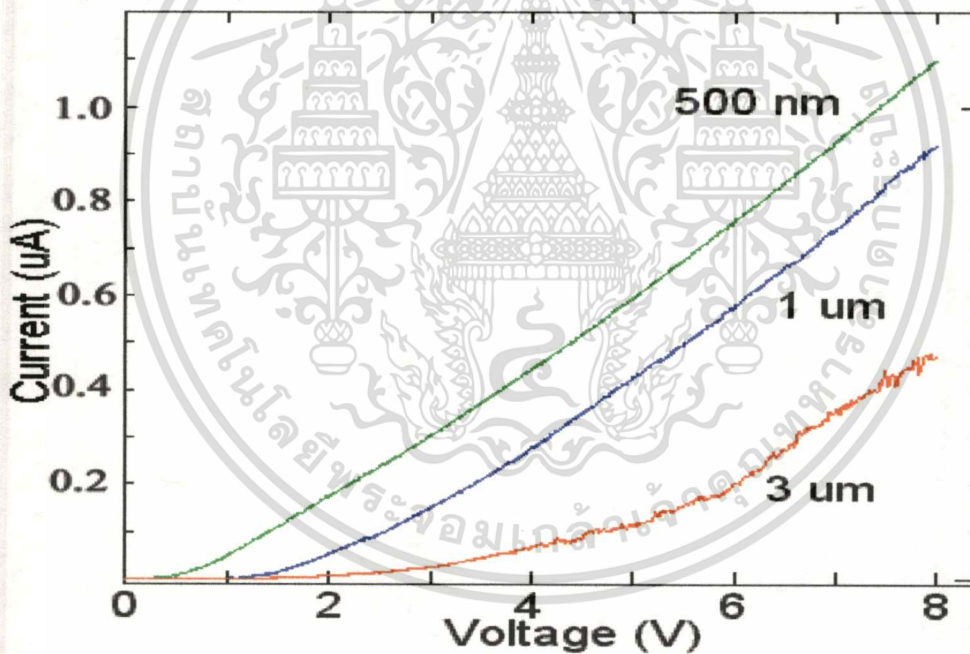
| Implantation (ions/cm ²) | 2θ (องศา) | FWHM (องศา) | d (Å) | a (Å) | D (Å) |
|---|--------------|----------------|----------|----------|----------|
| unimplanted | 27.325 | 0.160 | 3.261 | 5.648 | 567.752 |
| 1.4×10 ¹⁶ | 27.325 | 0.161 | 3.261 | 5.648 | 564.225 |
| 5.3×10 ¹⁶ | 27.325 | 0.193 | 3.261 | 5.648 | 470.657 |
| 5.8×10 ¹⁶ | 27.325 | 0.214 | 3.261 | 5.648 | 424.471 |

จากรูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่มีการฝังไอออนของอะตอมของไนโตรเจนพบว่า จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบ (111) ที่มุม 27.325 องศา และจากตารางที่ 4.10 แสดงค่าตัวแปรจากการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่มีการฝังไอออนของแก๊สไนโตรเจนที่ความหนา 500 นาโนเมตร พบว่าค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบนจะมีการเปลี่ยนแปลง

ตามค่าโคสของไอออนของไนโตรเจนคือ เมื่อโคสของไอออนของไนโตรเจนมากขึ้นค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบนจะมากขึ้นทำให้ขนาดของเม็ดผลึกมีค่าลดลง

4.3 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร

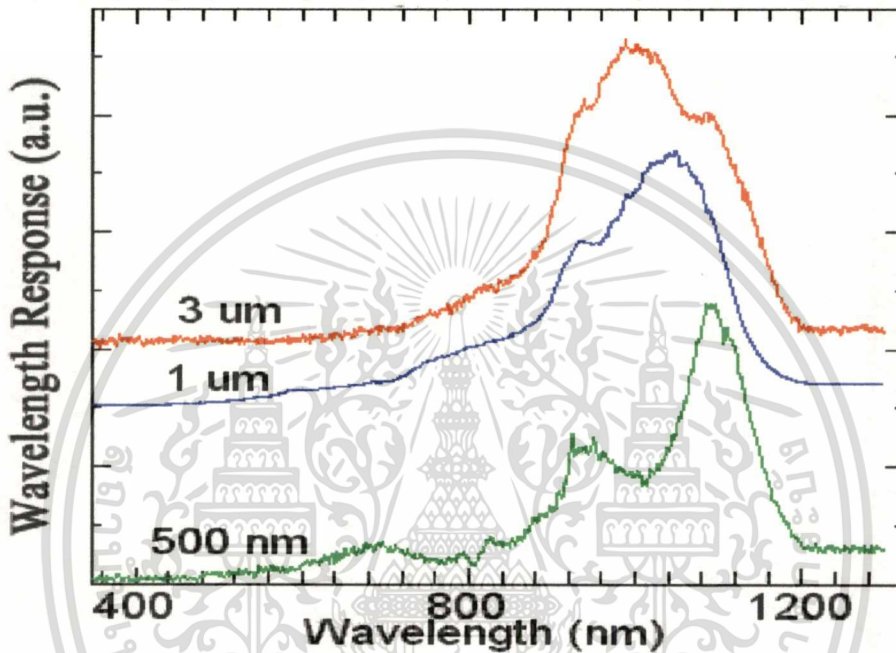
การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโรจะสามารถตรวจสอบได้โดยการวัดสมบัติของค่ากระแส-แรงดันของสิ่งประดิษฐ์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่า เมื่อเพิ่มความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์จะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) ในการฉีดกระแสที่รอยต่อมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-แรงดันของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์

สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์คือ การวัดช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์พบว่า สิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโรของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีจะมีช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นประมาณ 800 -1200 นาโนเมตร ซึ่งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงของความยาวคลื่นที่มีค่าระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์และสารกึ่งตัวนำซิลิกอน และเมื่อความหนาของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์มากขึ้นถึงประติมาตรโฟโตนิกเทคโนโลยีจะมีความถี่หนึ่งของความกว้างสูงสุดของการตอบสนองมากขึ้นและมีช่วงของการตอบสนองเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นของสีน้ำเงินมากขึ้น ช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของสิ่งประติมาตรโฟโตนิกเทคโนโลยีที่ความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ค่าต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของสิ่งประติมาตรโฟโตนิกเทคโนโลยี

4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับตั้งแต่ 300 เคลวิน 373 เคลวิน 423 เคลวิน และ 473 เคลวิน ที่ความหนา 100 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่าฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์มีสมบัติเป็นผลึกบนระนาบ (111) และมียอดของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ประมาณ 27.359-27.509 องศา เมื่อนำไปตรวจสอบกับฐานข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าฟิล์มบางซิงค์ซีลีไนด์มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนแบบลูกบาศก์ชนิดเฟซเซนเตอร์ เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเพิ่มขึ้นค่าความเข้มของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะมีค่าลดลง ซึ่งการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงของความเข้มของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเกิดจากการเกิดข้อบกพร่องของผลึก (crystal defect) เนื่องจากอุณหภูมิกล่าวคือ เกิดช่องว่าง (atomic vacancies) ของอะตอมซิลิเนียมและเกิดการแทรก (interstitial atom) ของอะตอมสังกะสีภายในผลึกทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกขึ้น เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบระนาบของผลึกที่ไม่เป็นระเบียบทำให้เกิดการกระเจิงในทุกทิศทางทำให้ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ลดลง

จากตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 แสดงค่าตัวแปรที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในค้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับตั้งแต่ 300 เคลวิน 373 เคลวิน 423 เคลวินและ 473 เคลวิน ที่ความหนาระหว่าง 100 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตรตามลำดับ พบว่ามีค่าคงที่โครงสร้างผลึกประมาณ 5.6315-5.645 องศา ซึ่งใกล้เคียงกับค่าคงที่แลตทิซของซิงค์ซัลไฟในค้จากการหาค่าคงที่แลตทิซของ Tight binding method (มีค่าประมาณ 5.6676 องศา) และจะมีขนาดของเม็ดผลึกลดลงเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองรับมากขึ้น

เมื่อเพิ่มความหนาในการปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในค้ตั้งแต่ 100 นาโนเมตร 300 นาโนเมตร 500 นาโนเมตร และ 1 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน ผลของการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างของผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงดังรูปที่ 4.9, 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ พบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในค้มากขึ้นความเข้มของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก เมื่อความหนาของฟิล์มบางมากขึ้นฟิล์มบางจะมีความเป็นระเบียบ (uniform) มากขึ้น ทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ได้ดี

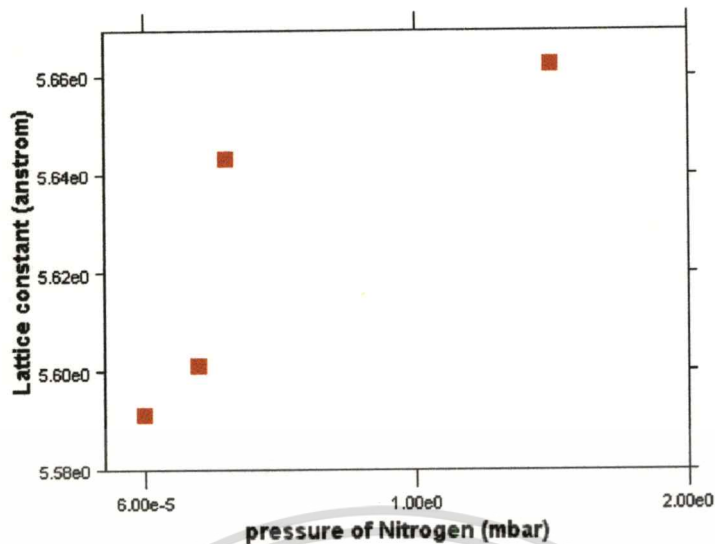
จากตารางที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 แสดงค่าตัวแปรที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในค้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ความหนาดังแต่ 100 นาโนเมตร 300 นาโนเมตร 500 นาโนเมตรและ 1 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน ตามลำดับ พบว่าจะมีค่าคงที่โครงสร้างผลึกประมาณ 5.623-5.645 องศา และมีขนาดของเม็ดผลึกจะใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มบาง

จากรายงานการวิจัยของ Pradip K.R. Kalita, B.K. Sarma and H.L. Das [5] พบว่าการปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในค้โดยระบบระเหยสารด้วยความร้อนที่ความหนา 200 นาโนเมตรและอุณหภูมิฐานรองรับระหว่าง 423-623 เคลวินจะมีสมบัติเป็นพหุผลึก (polycrystalline) มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนแบบลูกบาศก์ชนิดเฟซเซ็นเตอร์ ซึ่งเกิดมุมของการเลี้ยวเบนที่ 27.1 องศา 45.1 องศา และ 53.3 องศา ที่ระนาบ (111), (220) และ (311) ตามลำดับ และค่าตัวแปรที่คำนวณจากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเพิ่มขึ้น คือค่าตัวแปรจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิฐานรองรับมากขึ้นจนถึงอุณหภูมิฐานรองรับ 473 เคลวินจะมีค่าสูงสุด การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่แลตทิซระหว่าง 5.676-5.707 องศา และขนาดของเม็ดผลึกมีค่าระหว่าง 170-200 องศา

จากรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะและค่าสภาพคล่องตัวพาหะของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ที่ความหนา 500 นาโนเมตร และ 1 ไมโครเมตรตามลำดับ พบว่าฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์มีพาหะข้างมากเป็นชนิดเอ็นและความหนาแน่นพาหะชนิดเอ็นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิฐานรองรับเพิ่มขึ้นทำให้สภาพคล่องตัวของพาหะมากขึ้น เนื่องจากการเกิดช่องว่างอะตอมของซัลไฟเนียมทำให้เกิดการจับ (capture) อิเล็กตรอน ทำให้ปริมาณของอิเล็กตรอนอิสระลดลง ความหนาแน่นพาหะชนิดเอ็นของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์จะมีค่าประมาณ 10^{15} cm^{-3} และที่ความหนา 1 ไมโครเมตรจะมีความหนาแน่นพาหะชนิดเอ็นมากกว่าที่ความหนา 500 นาโนเมตร

เนื่องจากจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทกเตอร์รอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นจึงต้องทำการเจือฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ให้มีพาหะข้างมากเป็นชนิดพี โดยการเจืออะตอมของไนโตรเจนเข้าไปในฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ ซึ่งการเจือสารมีด้วยกันหลายวิธี ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการเจือสารด้วยการทำปฏิกิริยาและการฝังไอออนของสารเจือ

ผลการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของการเจือฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ด้วยวิธีการทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนแสดงดังรูปที่ 4.13 และค่าตัวแปรจากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังตารางที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สไนโตรเจนจะทำให้ค่าความเข้มของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มีค่ามากขึ้นและมุมของการเลี้ยวเบนลดลงเป็นผลให้ค่าคงที่โคโรสลิคมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.19 และเมื่อความดันของแก๊สไนโตรเจนมากขึ้นทำให้ขนาดของเม็ดผลึกลดลง เนื่องจากรัศมีอะตอมของไนโตรเจนมีขนาดเล็กกว่ารัศมีอะตอมของซัลไฟเนียมเมื่อเกิดการเจือของอะตอมไนโตรเจนซึ่งเป็นการเจือแบบแทนที่ ทำให้มีการเลื่อนตำแหน่งจากการเปลี่ยนขนาดของอะตอมและระยะห่างระหว่างระนาบเปลี่ยนแปลงเป็นผลให้มุมของการเลี้ยวเบนเปลี่ยนแปลง เมื่อนำไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าความหนาแน่นพาหะและค่าสภาพคล่องตัวพาหะแสดงดังรูปที่ 4.15 และ รูปที่ 4.15 ตามลำดับ พบว่าความหนาแน่นพาหะลดลงเมื่อความดันของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเจือฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ด้วยอะตอมไนโตรเจนจะมีพาหะข้างมากเป็นชนิดพี เมื่อเพิ่มความดันของแก๊สไนโตรเจนมากขึ้นจะเกิดการเจือของอะตอมไนโตรเจนมากขึ้นดังนั้นพาหะชนิดเอ็นจึงลดลง



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันของแก๊สไนโตรเจนและค่าคงที่โครงผลึก

ผลจากการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของการเจือฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ด้วยวิธีการฝังไอออนของแก๊สไนโตรเจนแสดงดังรูปที่ 4.16 และค่าตัวแปรจากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังตารางที่ 4.10 พบว่าค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบนจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าโคสของไอออนของไนโตรเจนคือ เมื่อโคสของไอออนของไนโตรเจนมากขึ้นค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบนจะมากขึ้นทำให้ขนาดของเม็ดผลึกลดลง เนื่องจากรัศมีอะตอมของไนโตรเจนมีขนาดเล็กกว่ารัศมีอะตอมของซิงค์ซัลไฟไนต์เมื่อเกิดการเจือของไอออนของไนโตรเจนซึ่งเป็นการเจือแบบแทนที่ จึงทำให้ขนาดของเม็ดผลึกที่มีการสร้างพันธะระหว่างอะตอมของสังกะสีและอะตอมของไนโตรเจนมีขนาดเล็กกว่าขนาดเม็ดผลึกของพันธะระหว่างอะตอมของสังกะสีและอะตอมของซิงค์ซัลไฟไนต์

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำการเจือฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟไนต์ให้มีพาหะข้างมากเป็นชนิดพีได้ ดังนั้นจึงมีการนำสารกึ่งตัวนำซิลิกอนซึ่งมีพาหะข้างมากเป็นชนิดพีมาทำการสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นกับสารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟไนต์ซึ่งมีพาหะข้างมากเป็นชนิดเอ็น เรียกว่าโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร เมื่อนำสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดสมบัติของค่ากระแส-แรงดันของสิ่งประดิษฐ์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่า เมื่อเพิ่มความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟไนต์จะทำให้ค่าแรงดันขั้วเริ่มในการฉีดกระแสที่รอยต่อมีค่ามากขึ้น เนื่องจากเมื่อความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟไนต์มากขึ้นค่าความกว้างของกำแพงศักย์ของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟไนต์มีค่ามากขึ้น ทำให้การฉีดกระแสทะลุผ่านกำแพงศักย์ยากขึ้นจึงต้องทำการป้อนแรงดันไบอัสให้มีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไปทำการวัดช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่น พบว่าสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโรของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีมีช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นประมาณ 800 –1200 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงของความยาวคลื่นที่มีค่าระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์และสารกึ่งตัวนำซิลิกอน และเมื่อความหนาของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์มากขึ้นสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์จะมีค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของการตอบสนองมากขึ้นและมีช่วงของการตอบสนองเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นของสีน้ำเงินมากขึ้น เนื่องจากในการตอบสนองต่อแสงของโฟโตดีเทคเตอร์จะเกิดขึ้นที่ช่วงของเขตปลอดพาหะ เมื่อมีแสงตกกระทบสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำ คือ $h\nu \geq E_g$ แสงจะถูกดูดกลืน ซึ่งค่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์มีค่าประมาณ 2.82 อิเล็กตรอนโวลต์ (ความยาวคลื่นประมาณ 439 นาโนเมตร) แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 439 นาโนเมตรจะสามารถทะลุผ่านชั้นของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ได้และเข้าไปกระตุ้นชั้นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนทำให้เกิดการตอบสนองของแสงในช่วงความยาวคลื่นของค่าแถบพลังงานระหว่างสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์และสารกึ่งตัวนำซิลิกอน และถ้าความหนาของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์มากขึ้นทำให้ความกว้างของเขตปลอดพาหะทางด้านสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์มากขึ้นจึงมีการตอบสนองที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์มากขึ้นด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง เป็นการศึกษาการปลูกฟิล์มบางโดยการบังคับลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าให้ตกลงบนสารกึ่งตัวนำซึ่งบรรจุอยู่ในเบ้าหลอมสาร เมื่อลำอิเล็กตรอนชนเข้ากับผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจนที่มีอยู่ในตัวเป็นพลังงานความร้อน จากนั้นสารกึ่งตัวนำจะเกิดการระเหยขึ้นไปเกาะบนแผ่นฐานรองรับและคริสตอล ไอระเหยของสารที่ขึ้นไปเกาะติดกับคริสตอลจะทำให้ความถี่ของคริสตอลเปลี่ยนแปลงไป ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะสามารถนำมาแปรค่าเป็นความหนาของฟิล์มบางได้

ในงานวิจัยนี้มีการทดลองปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีความหนา 100 นาโนเมตร 300 นาโนเมตร 500 นาโนเมตร และ 1 ไมโครเมตร ที่ค่าอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับระหว่าง 300-473 เคลวิน และนำฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่ได้ไปศึกษาสมบัติทาง โครงสร้างและสมบัติทาง ไฟฟ้าพบว่า ฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์มี โครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนแบบลูกบาศก์ชนิดเฟซเซ็นเตอร์ และเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบ (111) ตัวแปรที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงถึงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ซึ่งจากการคำนวณจะพบว่า ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์มีค่าประมาณ 5.631-5.645 อังสตรอมและมีขนาดของเม็ดผลึกอยู่ในระดับนาโนเมตร และพบว่าความเป็นผลึกของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์มากขึ้น ในขณะที่ความเป็นผลึกของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ลดลงเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองรับสูงขึ้น และจากการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ พบว่ามีพหุขั้วมากเป็นชนิดเอ็น และจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองรับสูงขึ้น เมื่อทำการเจือฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ด้วยอะตอมของไนโตรเจนด้วยวิธีการทำปฏิกิริยาและวิธีการฝังไอออน พบว่าฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีการเจือด้วยอะตอมของไนโตรเจนจะมีพหุขั้วชนิดเอ็นลดลงเมื่อความดันของแก๊สไนโตรเจนมากขึ้น

เมื่อทำการปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ลงบนแผ่นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีเพื่อสร้างถึงประติศรัฟโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพี-เอ็นแบบเฮเทอโร พบว่าจะมีช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นประมาณ 800 –1200 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงของความยาวคลื่นที่มีค่าระหว่างค่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟด์และสารกึ่งตัวนำซิลิกอน และเมื่อความหนาของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซัลไฟด์มากขึ้นถึงประติศรัฟโฟโตดีเทคเตอร์จะมีค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของการตอบสนองมากขึ้นและมีช่วงของการตอบสนองไปทางด้านความยาวคลื่นของสีน้ำเงินมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะ

ในการปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟในคืบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแก้วและมีการให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ เนื่องจากแก้วไม่สามารถทนความร้อนได้สูงมากนัก เมื่อให้ความร้อนแก่แก้วจะเกิดการขยายตัว ซึ่งการขยายตัวของแก้วและฟิล์มบางที่ปลูกบนแก้วมีค่าไม่เท่ากันทำให้เมื่อนำฟิล์มบางออกมาจากห้องสุญญากาศเกิดการแยกตัวของฟิล์มบางและแก้วทำให้ได้ฟิล์มบางที่ไม่สมบูรณ์ ควรใช้แผ่นฐานรองรับที่ทำจากแก้วที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่านี้



เอกสารอ้างอิง

ดร.บัญชา ธนบุญสมบัติ, การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคไฟฟ้าพรกซ์, พิมพ์ครั้งที่ 1 สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, หน้า 25-26.

M. Grasserbauer and H.W. Werner, **Analysis of Microelectronic Materials and Devices**, Austria.

กรกฎ วัฒนวิเชียร, โพลีคริสตัลไลน์ทรานซิสต์, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2540, กรุงเทพฯ.

Harry E. Ruda, **Widegap II-VI Compounds for Opto-electronic Applications**, university of Toronto, Canada.

Pradip K.R. Kalita, B.K. Sarma and H.L. Das, **Structural characterization of vacuum evaporated ZnSe thin films**, Bull. Mater. Sci., Vol. 23, No. 4, August 2000, pp. 313-317.

Charles Kittel, **Introduction to Solid State Physics**, 4th Edition, The United States of America.

คู่มือ เครื่องาม, สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการทำงาน , เล่ม 1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542 , กรุงเทพฯ.

Jaspri Singh, **Physics of Semiconductors and their Heterostructures**, university of Michigan, The United States of America.

L.M.Caicedo, G. Cediell, A. Dussan, J.W. Sandino, C. Calderon and G. Gordillo, **Study of Optical, Morphological and Structural Properties of ZnSe Thin Films Deposited by Evaporation**, phys. stat. sol. (b) 220, 249 (2000).

V.A. Kasiyan, D.D. Nedeoglo and N.D. Nedeoglo, **Electrical Activity of Transition Metal Impurities in Zinc Selenid e**, phys. stat. sol. (a) 178, 721 (2000).

S.M.Sze, **Semiconductor Devices Physics and Technology**, Murray Hill, New Jersey, January 1985.

คู่มือ เครื่องาม, สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการทำงาน , เล่มที่ 2, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542 , กรุงเทพฯ.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกรรณิกา อุประ โครตร เกิดวันที่ 7 สิงหาคม พ. ศ. 2521 ที่จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีราชินูทิศ จังหวัดอุดรธานี ในปีการศึกษา 2538 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2542 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2543



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้