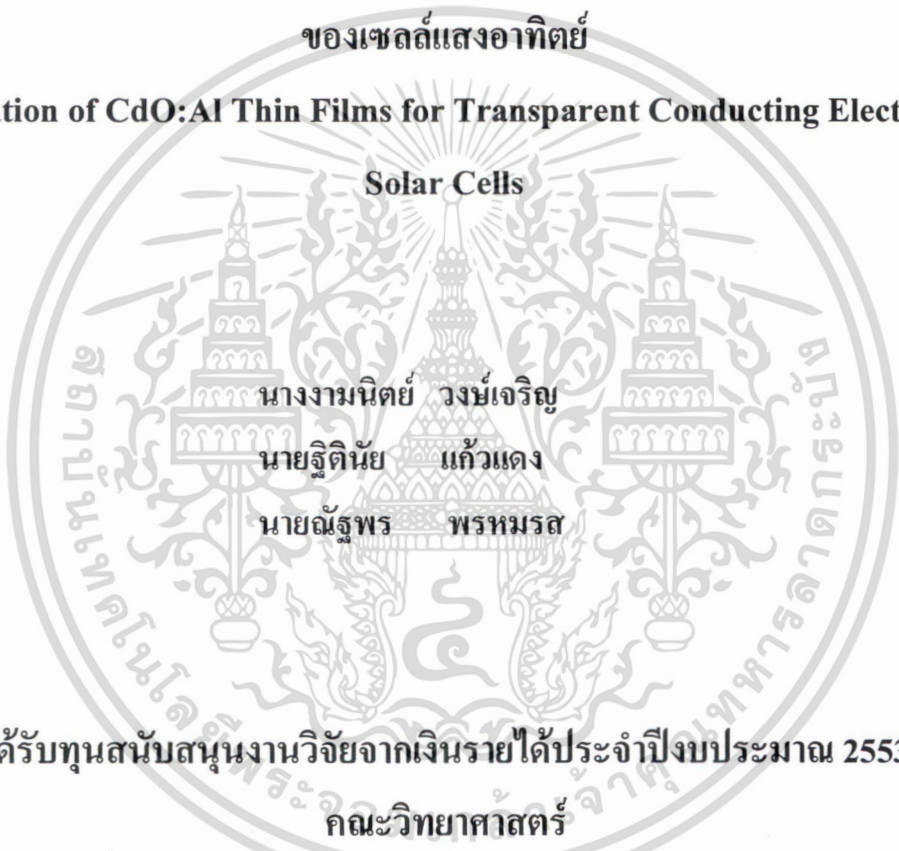


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัย

การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วยอะตอม Al สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง
ของเซลล์แสงอาทิตย์

Preparation of CdO:Al Thin Films for Transparent Conducting Electrode of
Solar Cells



นางงามนิศย์ วงษ์เจริญ

นายฐิตินัย แก้วแดง

นายณัฐพร พรหมรส

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2553

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCB

TA

418.9

.T45

0337ก

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 115863

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่หอสมุดกลางให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b. 12298402
1

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยความอนุเคราะห์จาก ดร.ชาญวิทย์ จิตบุททการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ ด้านทฤษฎี การออกแบบ และการสร้างเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อนุพงศ์ สรงประภา สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ อิเล็กโตรมิเตอร์ ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอัดเม็ดสาร

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปลอดประจุมารใช้งานวิจัยนี้

ขอขอบคุณนายทศพร ชันตยาภรณ์ นายณัฐพล แก้วแสน นายวิชา จันท์ทอง และนายอดิศร นพรุจิกุล นักศึกษาของสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลของการทดลองและช่วยทำรูปเล่มรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสสิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น He λ ios α ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสง โดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน $\text{Cu}_{K\alpha}$ 1.5406 Å ในการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบรายได้ประจำปีงบประมาณ 25523 ของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ภาษาอังกฤษ Cadmium oxide (CdO) semiconductor films in pure state and doped with different metallic ions has been used extensively in transparent conducting oxide (TCO), solar cells, smart windows and in many other optoelectronic applications. In this research, undoped and Al-doped CdO semiconducting ceramics have been prepared by solid state reaction at 800°C for 24 h. Effect of Al dopant on the structural and electrical properties of CdO ceramics have been investigated. 7% Al-doped CdO ceramics show the lowest resistivity and highest mobility values. Undoped, 7% Al-doped and 9% doped CdO thin films have been prepared on slide glass substrate by thermal evaporation method in vacuum. Effect of undoped and Al dopant on the structural , optical and electrical properties have been also investigated. Undoped and Al-doped films have polycrystalline structure with (111) preferential orientation. The optical band gap value was found to increase with increase in Al dopant content. The variation of resistivity as a function of temperature of Al-doped CdO film was performed in range 10-300 K. The transition from semiconductor to metallic behavior occurs around 180 °C and 120 °C for the undoped and temperature coefficient resistivity below the transition temperature indicates localization of electrons and the positive temperature coefficient resistivity above the transition temperature shows delocalization ones. This delocalization of electrons leads to metallic conductivity, which is the characteristic of a degenerate semiconductor. The localization of electrons reveals the characteristic of insulating behavior.

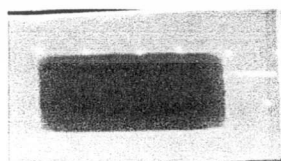


Fig. 1 Photograph of CdO thin films.

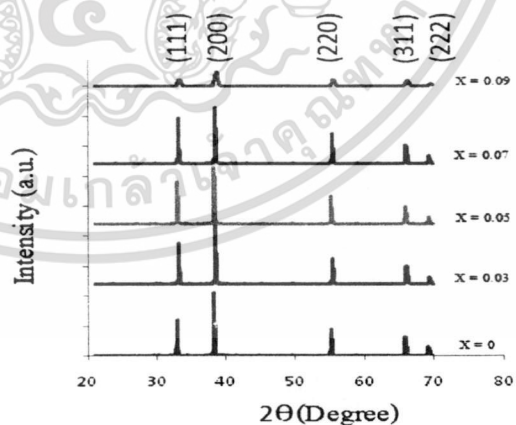


Fig. 2 XRD patterns of CdO ceramic samples.

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| กิตติกรรมประกาศ | ก |
| บทคัดย่อภาษาไทย | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ช |
| สารบัญรูป | ฅ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาของ โครงการพิเศษ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 4 |
| 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนิน | 4 |
| 1.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค | 5 |
| 1.4.2 การศึกษาสมบัติทางแสง | 6 |
| 1.4.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า | 6 |
| 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ | 6 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ | 7 |
| 2.1 สารกึ่งตัวนำ | 7 |
| 2.2 โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ | 8 |
| 2.3 สมบัติพื้นฐานของแคดเมียมออกไซด์ | 9 |
| 2.4 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก | 10 |
| 2.4.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติ หรือแบบจุด | 11 |
| 2.4.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบแถว | 13 |
| 2.4.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ | 15 |
| 2.4.3.1 ขอบเขตของเกรน | 15 |
| 2.4.3.2 ระนาบทวิน | 15 |
| 2.4.3.3 การจัดเรียงระนาบผิคลำดับ | 16 |
| 2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ | 17 |
| 2.6 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ | 21 |
| 2.6.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน | 21 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.6.1.1 ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง | 21 |
| 2.6.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง | 22 |
| 2.6.2 การส่งผ่านแสง | 23 |
| 2.6.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ | 25 |
| 2.6.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง | 25 |
| 2.6.5 การหาความหนาของฟิล์มบางจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง | 27 |
| 2.7 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ | 29 |
| 2.7.1 สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่อง | 29 |
| 2.7.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ | 31 |
| 2.7.3 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ | 36 |
| 2.7.4 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ | 39 |
| 2.8 การศึกษา โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 40 |
| 2.9 การเตรียมฟิล์มบาง | 42 |
| 2.9.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 42 |
| 2.9.1.1 อัตราการระเหยสาร | 43 |
| 2.9.1.2 ความดันไอของธาตุ | 43 |
| 2.9.1.3 การระเหยสารประกอบ | 45 |
| 2.9.1.4 อิทธิพลของ โครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร | 46 |
| 2.10 พิสูจน์พื้นฐานของวัสดุกึ่งตัวนำประเภทดีเจนนอร์เรต | 48 |
| บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย | 56 |
| 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย | 56 |
| 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกซ์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ | 56 |
| 3.1.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ | 57 |
| 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ | 58 |
| 3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ | 58 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 3.2.1. ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ | 58 |
| 3.2.2 ขั้นตอนในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ | 63 |
| 3.2.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่น | 63 |
| 3.2.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ | 63 |
| 3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารตัวอย่างที่เป็นสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ | 65 |
| 3.3.1 การศึกษาเชิงจุลภาค | 65 |
| 3.3.2 การศึกษาเชิงมหภาค | 66 |
| 3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง | 66 |
| 3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า | 66 |
| 3.3.4.1 วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอเพอร์ | 66 |
| 3.3.4.2 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ | 68 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล | 71 |
| 4.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเซรามิกส์ของสาร $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 71 |
| 4.1.1 เซรามิกส์ของสาร $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) ที่เตรียมโดยวิธี ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 71 |
| 4.1.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกส์ของสาร $Cd_{1-x}Al_xO$ | 73 |
| 4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดของเซรามิกส์ของสาร $Cd_{1-x}Al_xO$ | 75 |
| 4.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ของสาร $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 76 |
| 4.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง CdO โดยวิธีการระเหย ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ | 78 |
| 4.2.1 ลักษณะของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Al_xO$ โดยวิธีการระเหย ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ | 79 |
| 4.2.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Al_xO$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ | 80 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน | 82 |
| 4.2.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่เตรียมโดย วิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ | 89 |
| 4.2.5 ผลการศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ | 92 |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ | 94 |
| 5.1 ปัญหาและข้อเสนอแนะ | 95 |
| เอกสารอ้างอิง | 95 |
| ภาคผนวก | 100 |
| ประวัติผู้เขียน | 101 |



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 แสดงเปอร์เซ็นต์, เลขออกซิเดชันและการจัดเรียงตัวของ อิเล็กตรอนของธาตุ Cd กับ O | 10 |
| ตารางที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ | 46 |
| ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารตั้งต้นที่มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัมที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกส์ ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง | 62 |
| ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ โครงผลึกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ จากสารตั้งต้น ที่เป็นผงผลึก ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง | 73 |
| ตารางที่ 4.2 ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่นของโฮล และ สภาพคล่อง ของพาหะของเซรามิกส์ของสาร $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้น ที่เป็นผงผลึก ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง | 77 |
| ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่ของ โครงผลึกขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdO ที่เตรียมโดยวิธี การระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ | 81 |
| ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอน โวลต์ ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ ที่ความดันบรรยากาศที่ 10^{-4} และ 10^{-2} มิลลิบาร์ เมื่อมีการแอนนัล และ ไม่มีการแอนนัล | 89 |
| ตารางที่ 4.5 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่นของ โฮลและสภาพคล่องของพาหะ ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} และ 10^{-2} มิลลิบาร์ เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงการแอนนัล | 91 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 แสดงค่าสภาพต้านทานและสภาพนำไฟฟ้าของตัวนำ สารกึ่งตัวนำและฉนวน | 7 |
| รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ NaCl ที่มีพันธะเคมีแบบออกตะฮีดรอล | 8 |
| รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของแคดเมียมออกไซด์ | 10 |
| รูปที่ 2.4 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบต่างๆ | 12 |
| รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กีและแบบเฟรนเคิล | 13 |
| รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นแถวในแบบ ดิสโลเคชันแบบขอบ | 14 |
| รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นแถวในแบบ ดิสโลเคชันแบบสกรู | 14 |
| รูปที่ 2.8 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดขอบเขตของเกรน | 15 |
| รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบระนาบทวิน | 16 |
| รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเรียงระนาบผิดพลาด | 16 |
| รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก | 18 |
| รูปที่ 2.12 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ | 20 |
| รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงาน อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$) | 22 |
| รูปที่ 2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอน กับพลังงาน โฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$) | 23 |
| รูปที่ 2.15 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง | 23 |
| รูปที่ 2.16 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนแสงกับพลังงาน โฟตอน | 26 |
| รูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น ที่พิจารณาถึงรีฟรากรแทรกสอดของฟิล์มบาง | 28 |
| รูปที่ 2.18 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี | 32 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.19 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่น และวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบแวนเดอร์เพาว์ | 37 |
| รูปที่ 2.20 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบแวนเดอร์เพาว์ | 38 |
| รูปที่ 2.21 แสดงการต่อวงจรการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ | 39 |
| รูปที่ 2.22 แสดงส่วนประกอบของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด | 41 |
| รูปที่ 2.23 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว | 44 |
| รูปที่ 2.24 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว | 45 |
| รูปที่ 2.25 แสดงรูปแบบการระเหยของสาร | 47 |
| รูปที่ 2.26 แสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ผิวฟิล์ม โปร่งแสง ที่เป็ฟังก์ชัน กับ ความหนาแน่นของอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความยาวคลื่นใน 400 ถึง 700 นาโนเมตร | 54 |
| รูปที่ 2.27 แสดงคอนทัวร์ของระยะความลึกที่เป็นฟังก์ชัน กับ ความหนาแน่นของอิเล็กทรอนิกส์และสภาพคล่องของพาหะในฟิล์มบาง โปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 800 นาโนเมตรในสภาพยังคอนทัวร์ของสภาพต้านทานไฟฟ้า | 55 |
| รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.03, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการสถานะของแข็ง | 57 |
| รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับทั้งในกรณีที่ใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 65 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 3.3 แสดงการวางขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเวนเดอเพาว์ | 66 |
| รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{12} กับ V_{43} | 68 |
| รูปที่ 3.5 แสดงวิธีการต่อวงจรวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ | 68 |
| รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_H กับกระแสไฟฟ้า I | 69 |
| รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง | 72 |
| รูปที่ 4.2 พิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง | 73 |
| รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึก a เมื่อเทียบกับปริมาณของอะตอมสารเจือ Al ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง | 74 |
| รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง | 76 |
| รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I_{12}) กับศักย์ไฟฟ้า (V_{43}) ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($x = 0.03$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง | 76 |
| รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I_{23}) กับศักย์ไฟฟ้า (V_{14}) ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($x = 0.03$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง | 77 |
| รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($x = 0.03$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งที่เป็นผลึก | 78 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง สภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นอิเล็กตรอน และสภาพคล่องของพาหะของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียม โดยวิธีปฏิบัติกริยาสถานะของแข็ง | 77 |
| รูปที่ 4.9 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์เมื่อ ไม่ได้มีการแอนนีสและมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง | 79 |
| รูปที่ 4.10 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่เตรียมได้ภายใต้ความดัน 10^{-2} และ 10^{-4} มิลลิบาร์ เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง | 79 |
| รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-2} และ 10^{-4} มิลลิบาร์ เมื่อ ไม่ได้มีการแอนนีสและมีการแอนนีส ภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง | 80 |
| รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0, x = 0.07$ และ $x = 0.09$ จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์และจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกภายใต้ความดัน 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง | 81 |
| รูปที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่น ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อไม่มีการแอนนีส | 82 |
| รูปที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง | 83 |
| รูปที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่น ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-2} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง | 83 |

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ – จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 84
- รูปที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่น ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0.07$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 84
- รูปที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0.07$ จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 85
- รูปที่ 4.19 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0.09$ จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 85
- รูปที่ 4.20 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงาน โฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อไม่มีการแอนนัล 86
- รูปที่ 4.21 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงาน โฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์ เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 86
- รูปที่ 4.22 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงาน โฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์ เมื่อไม่มีการแอนนัล 87

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 4.23 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์ เมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 87
- รูปที่ 4.24 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0.07$ จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 88
- รูปที่ 4.25 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงาน โฟตอน($h\nu$)ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0.09$ จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 88
- รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I_{12}) กับศักย์ไฟฟ้า (V_{43}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($x = 0.07$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันบรรยากาศที่ 10^{-4} เมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 89
- รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I_{23}) กับศักย์ไฟฟ้า (V_{14}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($x = 0.07$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันบรรยากาศที่ 10^{-4} เมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 90

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($x = 0.07$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันบรรยากาศที่ 10^{-4} เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 90
- รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า กับ อุณหภูมิของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ความดัน 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 92
- รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า กับ อุณหภูมิของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0.07$ จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 93

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

| | |
|-----------------|--|
| $Cd_{1-x}Al_xO$ | แคดเมียมออกไซด์เจือด้วยอะตอมอลูมิเนียม |
| XRD | การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ |
| SEM | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด |
| μ | สภาพคล่องของพาหะ |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันนี้พลังงานเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากสามารถนำมาจ่ายให้กับเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำงาน เพื่อเอื้อต่อการดำรงชีวิต ไม่ว่าจะเป็นเครื่องสร้างสิ่งตอบสนองพื้นฐานความต้องการของมนุษย์ (ปัจจัยสี่) เครื่องมือเพื่ออำนวยความสะดวกสบายและเพื่อความบันเทิง (เช่น ยวดยานพาหนะเพื่อการคมนาคม เครื่องมือสื่อสาร โทรคมนาคม) หรือจนไปถึงเครื่องมือทางการแพทย์เพื่อช่วยชีวิต พลังงานในรูปแบบที่แพร่หลายที่สุดรูปแบบหนึ่งในปัจจุบันคือพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากความสะดวกในการกักเก็บและการแปลงรูปให้เป็นพลังงานอื่นในการใช้งานโดยทั่วไป พลังงานไฟฟ้ามักจะผลิตจากพลังงานความร้อน จากเชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงในทุกวันนี้มีราคาที่สูงขึ้นและเป็นพลังงานสิ้นเปลืองอันจะหมดสิ้นไปในเวลาไม่นานเมื่อเทียบกับอายุไขของโลกที่เหลืออยู่และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโลกในแง่ของปรากฏการณ์เรือนกระจก (ทำให้โลกร้อนขึ้น) ดังนั้นจึงเริ่มพิจารณาถึงแหล่งพลังงานอื่น ๆ ที่สะอาด (ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม) ที่สามารถนำมาทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้และเป็นพลังงานใช้ไปได้ยาวนาน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ (เช่นจากเขื่อน) พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานที่ได้จากโรงงานไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามสืบเนื่องจากความแปรปรวนของทั้งบรรยากาศโลกและตัวโลกเองทำให้การสร้างโรงไฟฟ้าจากพลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานความร้อนใต้พิภพเองไม่สามารถกระทำได้โดยสะดวก เช่น การเปลี่ยนทิศของลมมรสุมเนื่องจากอุณหภูมิโลกที่เปลี่ยนแปลงและยังต้องเลือกบริเวณที่มีปริมาณลมเพียงพอต่อการผลิตพลังงานกระแสไฟฟ้า หรือการเลื่อนของเปลือกโลกที่ก่อให้เกิดแผ่นดินไหวอันจะทำความเสียหายต่อเขื่อนผลิตไฟฟ้าและยังทำลายสมดุลธรรมชาติ ส่วนพลังงานความร้อนใต้พิภพเมื่อเทียบกับพลังงานอื่น ๆ จัดอยู่ในสเกลที่นำมาใช้งานได้น้อยมากและยังขึ้นกับสภาวะภูมิประเทศเป็นหลัก ส่วนพลังงานจากโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ก็ยังมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนในการก่อสร้าง และถอดทิ้ง ทำลายเตาปฏิกรณ์สูงมาก และยังไม่สามารถสร้างความเชื่อมั่นในความปลอดภัย ที่ประชาชนทั่วไปยอมรับได้ ด้วยเหตุนี้พลังงานทดแทนที่จัดได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญในทศวรรษนี้คือพลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดไร้มลภาวะเป็นพิษใดๆ สาดส่องไปทุกที่ และดวงอาทิตย์ยังอยู่กับมนุษย์ไปอีกนาน และอายุการใช้งานของเซลล์ แสงอาทิตย์ยาวนานกว่า 20 ปี เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการลงทุน เพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงาน โดยรวมถึงผลกระทบที่อาจมีต่อสิ่งแวดล้อมด้วยแล้ว จะเห็นได้ว่าต้นทุนพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงอาทิตย์ มีราคาถูกกว่า แหล่งพลังงานประเภทอื่น เมื่อติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในครั้งแรก ก็แทบจะไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกต่อไป และประการสำคัญก็คือ พลังงานจากแสงอาทิตย์ เป็นหนึ่งในพลังงานที่มีความยั่งยืน ไม่มีที่สิ้นสุด ปัจจุบันระบบพลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในอาคาร ระบบสูบน้ำ ระบบแสงสว่าง ระบบทำความร้อน ระบบทำความเย็น ประจุแบตเตอรี่และขายคืนให้กับสายส่ง เป็นต้น (ขงยุทธ,2548)

เซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic หรือ solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ (หรือแสงจากหลอดแสงสว่าง) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงทันทีที่มีแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะผลิตไฟฟ้าได้ทันทีและไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (direct current) (คูสิต, 2542)

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะใช้ธาตุซิลิคอนเป็นวัตถุดิบในการผลิต ทั้งนี้เนื่องจากเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลก โดยมีตัวอย่างดังนี้

1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (single crystalline silicon solar cell or monocrystalline silicon solar cell) มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 10-14 (Gangopadhyay, U.;et. al.,2004) และ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกพหุพันธุ์ซิลิคอน (polycrystalline silicon solar cell) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 9-12 (Aberle, 2006)
2. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous silicon solar cell) ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในเครื่องคิดเลข จะมีลักษณะสีม่วงน้ำตาล มีความบางเบาราคาถูก ผลิตให้เป็นพื้นที่เล็ก ไปจนถึงใหญ่หลายตารางเมตรได้ ใช้ธาตุซิลิคอนเช่นกันแต่เคลือบให้เป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มิลลิเมตร) และประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 5-9 เปอร์เซ็นต์(Sonobe, 2006)
3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) (Abderrahmane, 2006), แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) (Abderrahmane,2006) และคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CuInSe₂:CIS) (Khrypunov,2006) เป็นต้น โดยจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 12 เปอร์เซ็นต์

ฟิล์มบาง CdO มีความเหมาะสมที่จะนำไปทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ CdO เป็นสารกึ่งตัวนำจำพวกโลหะออกไซด์ที่น่าสนใจเพราะมีสภาพคล่องพาหะ (carrier mobility) สูง และ มีความเป็นได้สูงในการทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง โดยที่ CdO มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ที่ 2.53 อิเล็กตรอน โวลต์ การเตรียมฟิล์มบาง CdO สามารถเตรียมได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น สเป็คเตอริง (sputtering) การระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (evaporation) วิธีการอบสารละลายเคมี (chemical bath deposition) และการพ่นละอองสารเคมี (spray pyrolysis) เป็นต้น การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุญญากาศ มีข้อดีคือฟิล์มที่ได้จะมีความสม่ำเสมอมากกว่าวิธีการพ่นละอองสารเคมีและวิธีการอบสารละลายเคมีเพราะทำที่อุณหภูมิสูงกว่า การเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีการระเหิดด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ $CdO : Al$ เป็นปฏิกิริยาระหว่าง แคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) กับ ออกไซด์ไอออน (O^{2-}) และ (Al^{3+})

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกสกัดจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งและที่เป็นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก และที่เป็นเม็ดเซรามิกที่ถูกละลายบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหิดด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง CdO ทั้งที่ไม่ได้เจือและเจือด้วยอะตอมของ Al และศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางที่เตรียมได้ดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $CdO/CuAlO_2$ ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกสกัดจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และที่เป็นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกที่ถูกละลายบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหิดด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการแอนนิลฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ที่เตรียมได้ทั้งหมดภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกและที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-rays diffraction method)
- 1.2.4 เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกและที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.2.5 เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ที่เตรียมได้ทั้งหมด โดยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเมื่อทำการฉายแสงที่มีค่าความยาวคลื่น 300 ถึง 1000 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Eg)
- 1.2.6 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกส์และที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ในช่วง 10-300 เคลวิน ตลอดจนทำการหาค่าสภาพคล่องของพาหะและความหนาแน่นของพาหะด้วยการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกส์จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งและที่เป็นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 1.3.2 ทำการการแอนนิลฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ที่เตรียมได้ทั้งหมด ภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีทดลองผลงานวิจัยที่ผ่านการตีพิมพ์และเผยแพร่มาแล้วที่เกี่ยวข้องเรื่องการเตรียมสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกส์จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งและที่เป็นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 1.4.2 ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งโดยทำการอัดผงผลึกด้วยแรงอัดขนาด 4 ตันเพื่อทำให้ได้เป็นเม็ดผลึกแผ่นกลมที่มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตรและมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตรต่อจากนั้นจึงนำไปเผาภายใต้บรรยากาศด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเสร็จแล้ว

จึงนำเม็ดเซรามิกส์ที่ได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วย XRD โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM และสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชัน กับ อุณหภูมิในช่วง 10-300 เคลวิน ตลอดจนทำการหาค่าสภาพคล่องของพาหะและความหนาแน่นของพาหะด้วยการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งจากข้อมูลของผลการทดลองที่ได้พบว่าเซรามิกส์ของ CdO:Al (7%) เป็นผลการทดลองที่ดีที่สุด

- 1.4.3 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศโดยที่ในการทดลองนี้เลือกทำภายใต้ความดันทั้งที่ 10^{-2} มิลลิบาร์และความดันช่วง 4×10^{-4} ถึง 2×10^{-6} มิลลิบาร์เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่เรียบมีความหนาสม่ำเสมอและติดแน่นกับกระจกสไลด์
- 1.4.4 ทำการแอนนิลฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับที่เตรียมได้ทั้งหมดภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 1.4.5 ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกส์จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งและที่เป็นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศดังนั้นการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคนำสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกส์และที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอมโดยกระแส 40 มิลลิแอมป์และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์

1.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกส์และที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไป ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400

1.4.2 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสง โดยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสลิเบิล - เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR spectrophotometer) ของ Shimadzu รุ่น 3101PC เมื่อทำการฉายแสงที่ค่าความยาวคลื่น 300 ถึง 1000 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)

1.4.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกส์และที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 10-300 เคลวิน ตลอดจนทำการหาค่าสภาพคล่องของพาหะและความหนาแน่นของพาหะด้วยการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

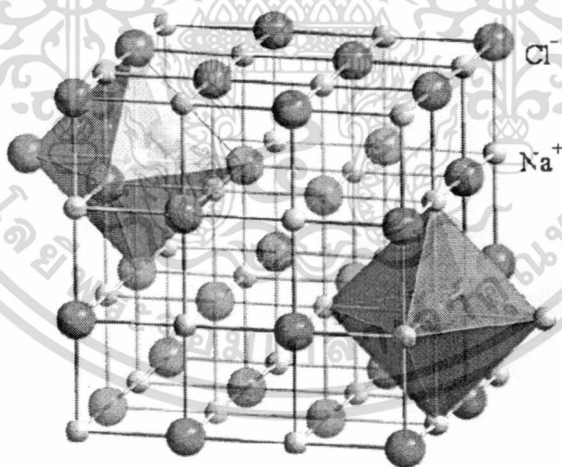
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของสารเจือที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกส์และที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมด
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงวิธีการแอนนัลฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ที่เตรียมได้ทั้งหมดภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 1.5.3 ทำให้ทราบถึงเงื่อนไขของวิธีการเตรียมและการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกส์และที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมด เพื่อที่จะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

2. มีสมบัติยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านทางเดียวหรือเปลี่ยนกระแสไฟสลับให้เป็นกระแสไฟตรง (rectifying effect)
3. สภาพนำไฟฟ้าของสารจะขึ้นกับปริมาณของสารเจือหรืออาจกล่าวได้ว่าสารเจือทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป
4. เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะทำให้สภาพนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง (อาจจะเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้น) กล่าวได้อีกนัยหนึ่ง เมื่อมีแสงตกกระทบจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง
5. เมื่อได้รับความร้อนจะให้กำลังงานทางไฟฟ้าสูง (high thermoelectric power)
6. จะคงรักษาโครงสร้างผลึกแบบพันธะสี่หน้า (tetrahedral bond) แม้ลักษณะของหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกจะแตกต่างกันไปก็ตาม

2.2 โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ

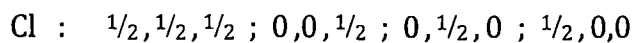
โครงสร้างแถบพลังงานของสาร ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของสารนั้นๆ เรียกว่าโครงสร้างผลึก (crystal structure) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอะตอมในของแข็ง โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdO มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในหน่วยของเซลล์ของผลึกเป็นโครงสร้างสามัญแบบโซเดียมคลอไรด์ (rock salt)



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ NaCl ที่มีพันธะเคมีแบบออกตะฮีดรัล

โครงสร้างผลึกแบบโซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride, NaCl structure) แสดงดังรูปที่ 2.1 บราวายส์แลตทิซ (bravais lattice) เป็นแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face-centered cubic lattice : fcc : $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) หนึ่งหน่วยเซลล์มี 4 อะตอม เบสิส (basis) ประกอบด้วยอะตอมของ Na และ Cl อะตอมของโครงสร้างผลึกอยู่ที่ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คลอไรด์ไอออนมีโครงสร้างแบบการบรรจุชิดที่สุดรูปลูกบาศก์ (cnp) และมีโซเดียมไอออนบรรจุอยู่ในช่องว่างของออกตะฮีดรัลแต่ละคลอไรด์ไอออนจะสัมผัสกับโซเดียมหกไอออน และแต่ละโซเดียมไอออนจะสัมผัสกับคลอไรด์ไอออน ทำให้โซเดียมคลอไรด์มีจำนวนโคออร์ดิเนชันแบบ 6:6 และหน่วยเซลล์มีการซ้อนทับกันระหว่าง ทรงเหลี่ยมสี่หน้า (face-center cubic structure) ของคลอไรด์ไอออนกับทรงสี่เหลี่ยมสี่หน้าของโซเดียมไอออน

ในหน่วยเซลล์ของโซเดียมคลอไรด์จะมีช่องออกตะฮีดรอลอยู่ตรงกลางของหน่วยเซลล์ 1 ช่อง และ อีก 12 ช่องอยู่ตามขอบของลูกบาศก์และช่องว่างที่อยู่ขอบจะต้องแบ่งให้หน่วยเซลล์ที่อยู่ติดกันจึงมีปริมาตรของช่องว่างแต่ละหน่วยเซลล์เท่ากับ $1/4$ ในหน่วยเซลล์ของออกตะฮีดรัล เท่ากับ $1 + 12 \times 1/4 = 4$ ช่อง ดังนั้น มี $\text{Na} = 4$ ไอออนต่อหน่วยเซลล์

ส่วนคลอไรด์ไอออนจะมี 6 ไอออนที่หน้าของรูปลูกบาศก์จะถูกแบ่งให้ 2 หน่วยเซลล์ที่อยู่ติดกันและที่มุมทั้ง 8 จะถูกแบ่งให้แปดหน่วยเซลล์ที่อยู่ติดกัน Cl ในหนึ่งหน่วยจะเท่ากับ $(6 \times 1/2) + (8 \times 1/8) = 4$ ไอออน ในหน่วยของเซลล์ NaCl จึงมีอัตราส่วน $\text{Na}:\text{Cl} = 1:1$

2.3 สมบัติพื้นฐานของแคดเมียมออกไซด์

แคดเมียมออกไซด์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออกตะฮีดรัล (octahedral) รูปแบบของโครงสร้างเป็นแบบ NaCl (rock salt)

แคดเมียมออกไซด์ : CdO

เลขมวล : 128.41

คลาส : ออกไซด์

สมบัติทางกายภาพ

สี : น้ำตาล

สถานะ : ของแข็ง

จุดหลอมเหลว : 1500 องศาเซลเซียส

จุดเดือด : 1559 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่น : 8150 กิโลกรัม ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

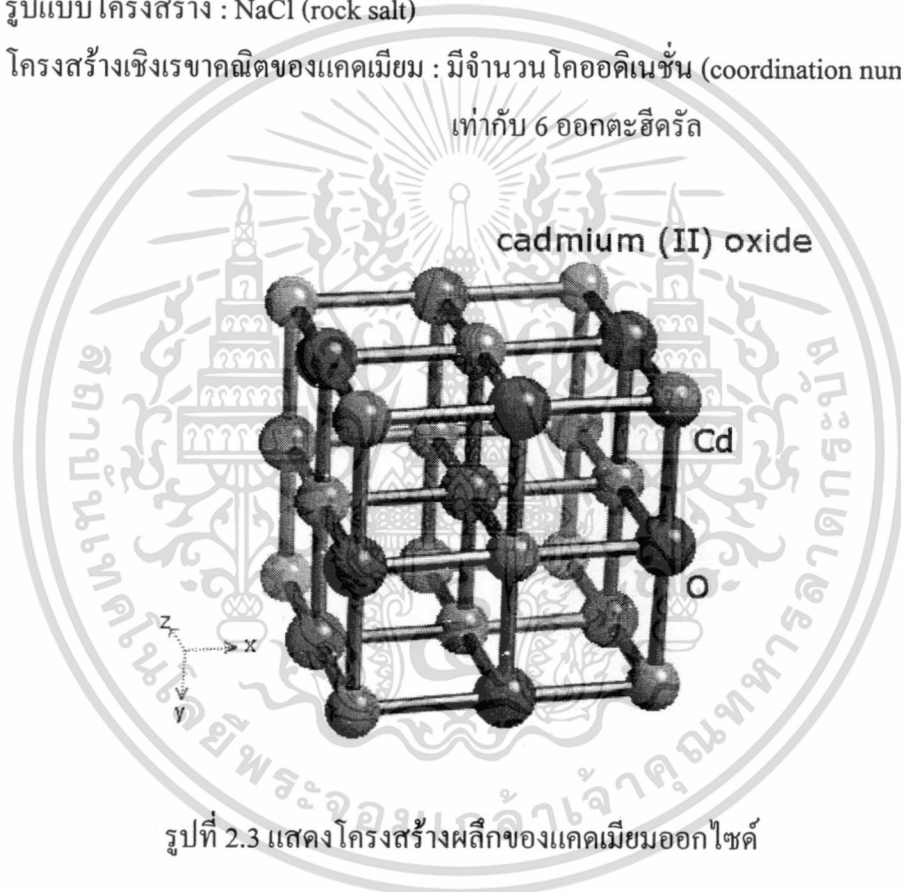
ตารางที่ 2.1 แสดงเปอร์เซ็นต์,เลขออกซิเดชันและการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนของธาตุ Cd กับ O

| ธาตุ | เลขออกซิเดชัน | การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน |
|------|---------------|---------------------------------------|
| Cd | 2 | [Kr].4d ¹⁰ |
| O | -2 | [He].2s ² .2p ⁶ |

โครงสร้างสถานะของแข็ง

รูปแบบโครงสร้าง : NaCl (rock salt)

โครงสร้างเชิงเรขาคณิตของแคดเมียม : มีจำนวน โคออดิเนชัน (coordination number) เท่ากับ 6 ออกตะฮีดรัล



รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างผลึกของแคดเมียมออกไซด์

2.4 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก (งามนิตย์,2531;งามนิตย์,2545;Kittel,1971;Runyan,1975;แมน และสมชัย 2541;Tilley, 2004)

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอดแต่ในความเป็นจริงแล้ว มักจะพบความไม่สมบูรณ์ของผลึกในโครงสร้างผลึกเสมอ โดยความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นเหล่านี้มักจะมีผลทำให้สมบัติต่างๆของสารเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

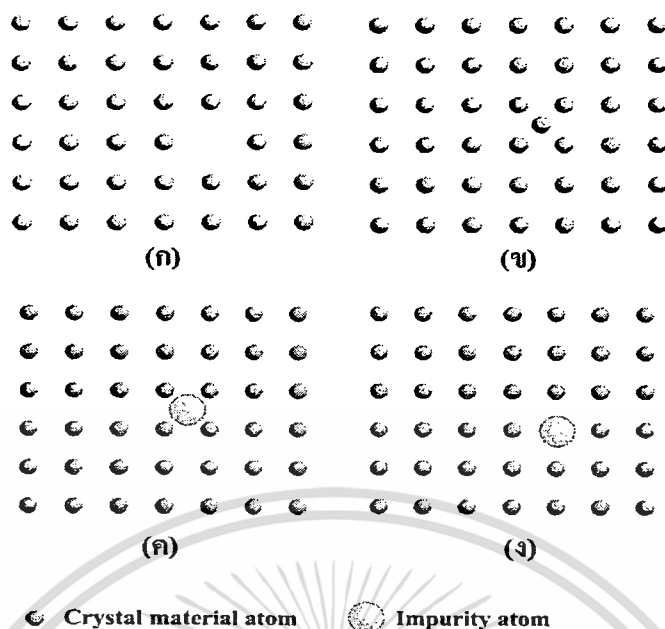
เราสามารถแบ่งความไม่สมบูรณ์ของผลึกตามรูปทรงเรขาคณิตและรูปร่างได้เป็น 3 แบบ ดังนี้ คือ

1. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติ หรือ แบบจุด (zero-dimension or point defect)
2. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติ หรือ แบบแถว (one-dimension or line defect)
3. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติ หรือ แบบระนาบ (two-dimension or plane defect)

2.4.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะ ดังนี้

- ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบช่องว่างหรือแวกแคนซี (vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ในโครงผลึก จึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น
- ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเซลล์ อินเตอร์สติเชียล (self interstitial) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมเข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอม
- ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอินเตอสติเชียล อิมพิวริตีอะตอม (interstitial impurity atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมชนิดอื่นเข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอม
- ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบซบสติติวชันนัล อิมพิวริตีอะตอม (substitutional impurity atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมชนิดอื่นเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมเดิม

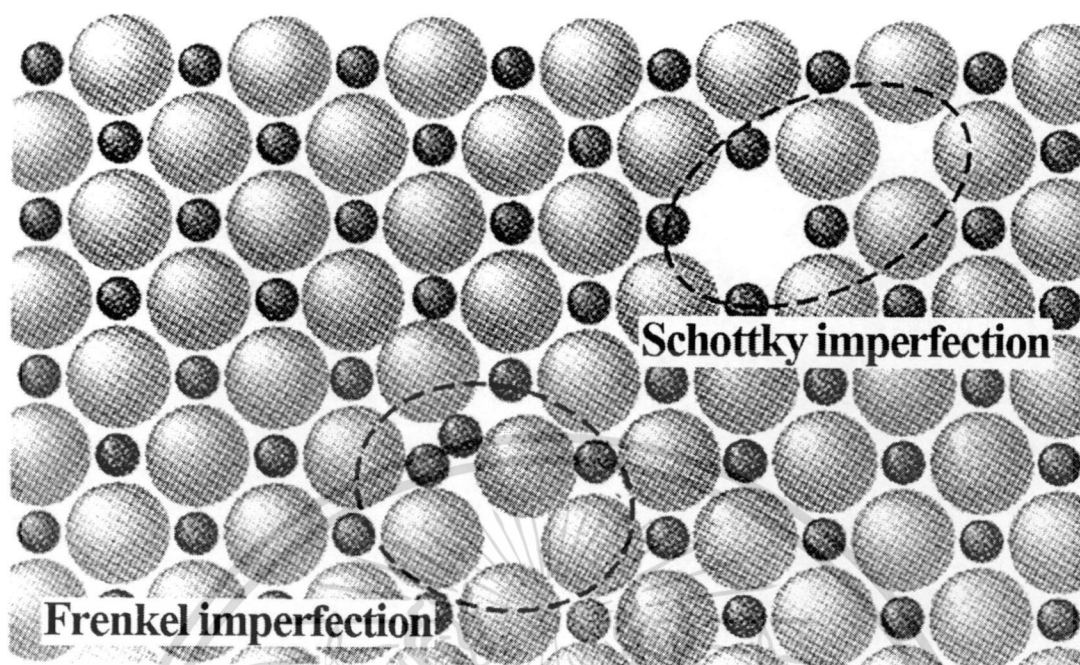


รูปที่ 2.4 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึก

- ก. แบบแวนแคนซี
 ข. แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเซลล์ฟีนเตอร์สติเซียม
 ค. แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอินเตอสติเซียม อิมเพียวริตีอะตอม
 ง. แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบซับสติติวชันนัล อิมเพียวริตีอะตอม

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ใน โครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ดังนี้

- ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กี (Schottky imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้น เนื่องจากทั้งไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกไปจากโครงผลึก เพื่อรักษาประจุของโครงผลึกให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดแวนแคนซี 2 ช่องของไอออนบวก-ไอออนลบ (cation-anion divacancy)
- ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล (Frenkel imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดช่องว่างขึ้น เนื่องจากไอออนบวกที่มีขนาดเล็กกว่าไม่ได้หลุดหายไปจากโครงผลึก แต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างที่อยู่ระหว่างไอออนลบกับไอออนบวกอีกตัวหนึ่งทำให้เกิดแวนแคนซีของไอออนบวก (cation vacancy)



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล

2.4.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบแถว

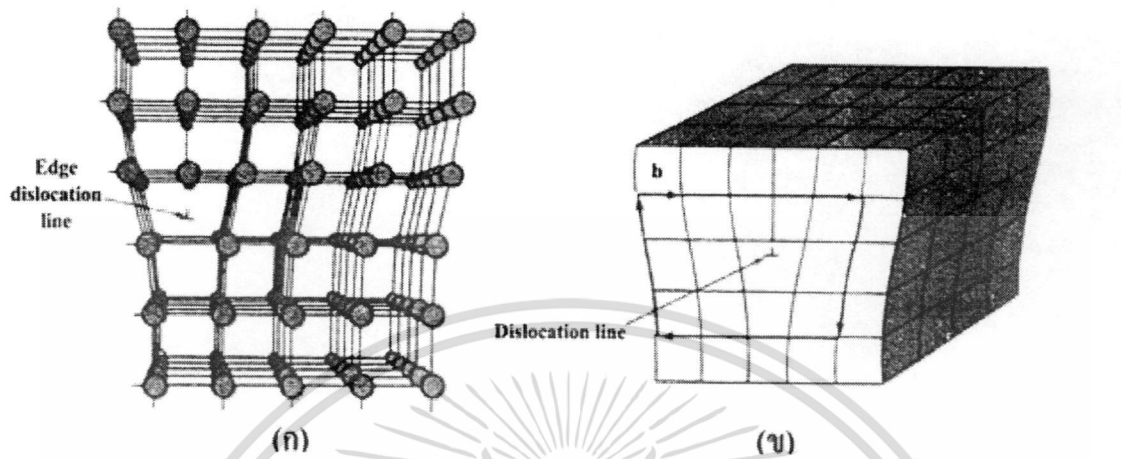
เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นแถว (line imperfection) หรือสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งคือ ดิสโลเคชัน (dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากอะตอมของโครงผลึก ณ ที่จุดต่างๆ อยู่ในแนวหรือแถวเดียวกัน ไม่อยู่ตามตำแหน่งที่ถูกต้องทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของโครงผลึกขึ้น โดยมี 2 ลักษณะดังนี้

ก. ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของระนาบหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของโครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือดันออกไปจากแนวปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ก) ระยะที่เพิ่มขึ้นรอบๆ การเคลื่อนของขอบนี้เรียกว่า สลิป (slip) หรือเบอร์เกอร์เวกเตอร์ (Burgers vector : \vec{b}) ซึ่งจะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนของขอบ (edge dislocation line) ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ข)

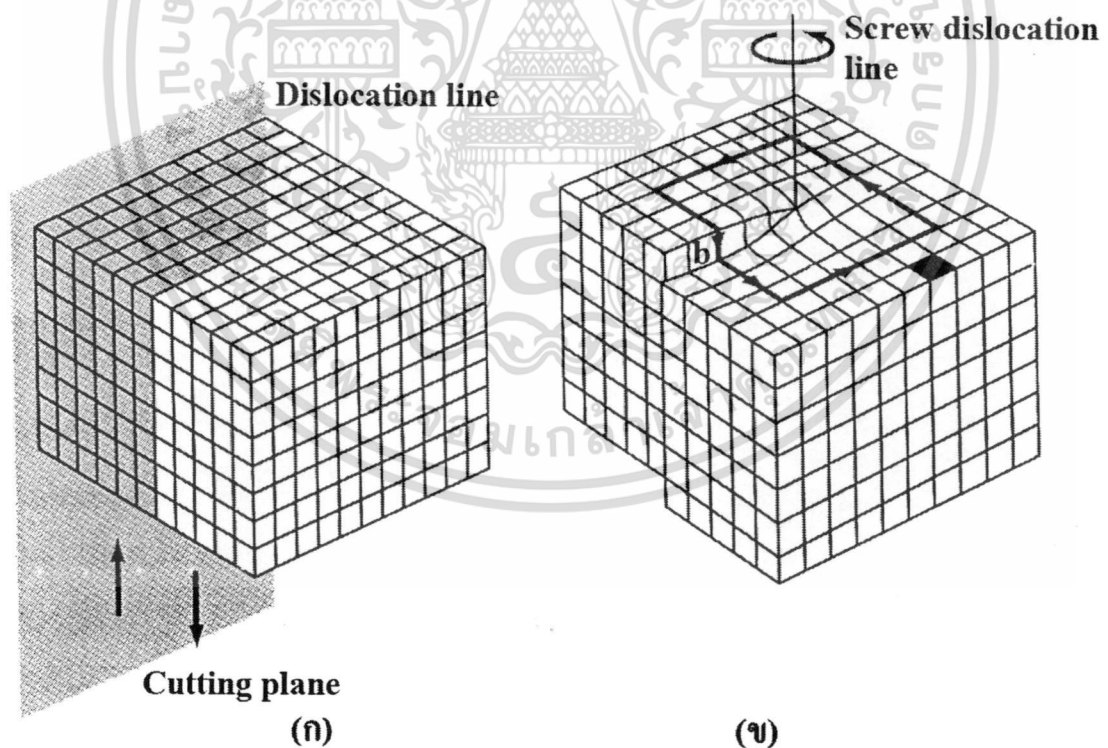
ข. ดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นจากการใส่แรงเฉือนเข้าไปในโครงผลึกที่สมบูรณ์ ทำให้โครงผลึกที่สมบูรณ์เกิดการบิดเบี้ยวหรือผิดรูปไป ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ก) ในบริเวณที่โครงผลึกเกิดการบิดเบี้ยวขึ้นนี้ จะมีพลังงานสะสมอยู่มาก สลิป หรือเบอร์เกอร์เวกเตอร์ที่เกิดขึ้นในการเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบสกรูจะขนานกับแนวดิสโลเคชันหรือทิศทางการเคลื่อนแบบสกรู (screw dislocation line) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ข)



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นแนวในแบบดิสโลเคชันแบบขอบ



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นแนวในแบบดิสโลเคชันแบบสกรู

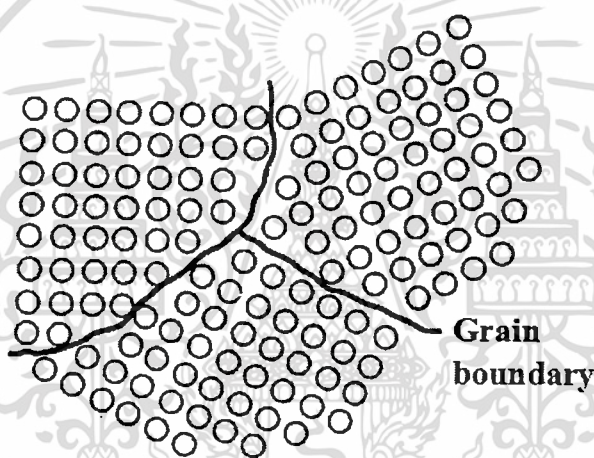
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิตินี้คือ ความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิว (surface imperfection) ของโครงสร้างผลึกตามธรรมชาติ เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมมีการจัดเรียงตัวเปลี่ยนจากรูปแบบหนึ่งไปสู่อีกรูปแบบหนึ่ง สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆคือ ขอบเขตของเกรน (grain boundary) ระนาบทวิน (twin plane) และการเรียงระนาบผิดลำดับ (stacking faults)

2.4.3.1 ขอบเขตของเกรน (grain boundary)

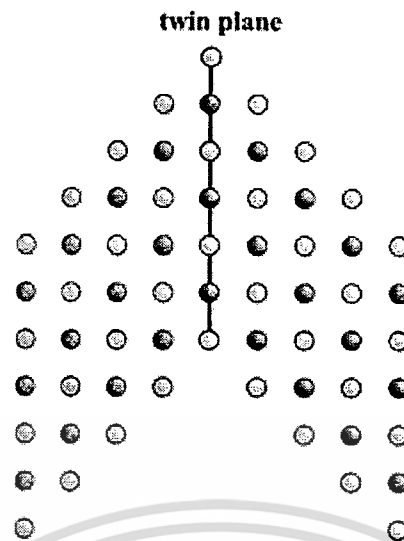
เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เกิดขึ้นในวัสดุที่เป็นผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ขอบของเกรนเกิดขึ้นได้เนื่องจากการจัดเรียงตัวของแต่ละหน่วยเซลล์ (unit cell) ในวัสดุมีทิศทางที่แตกต่างกัน ในขณะที่ผลึกเติบโตขึ้นเป็นเกรน เมื่อเกรนแต่ละเกรนมาสัมผัสกัน จึงทำให้เกิดขอบเขตของเกรนขึ้น ซึ่งเป็นบริเวณแคบๆระหว่างเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.8 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดขอบเขตของเกรน

2.4.3.2 ระนาบทวิน (twin plane)

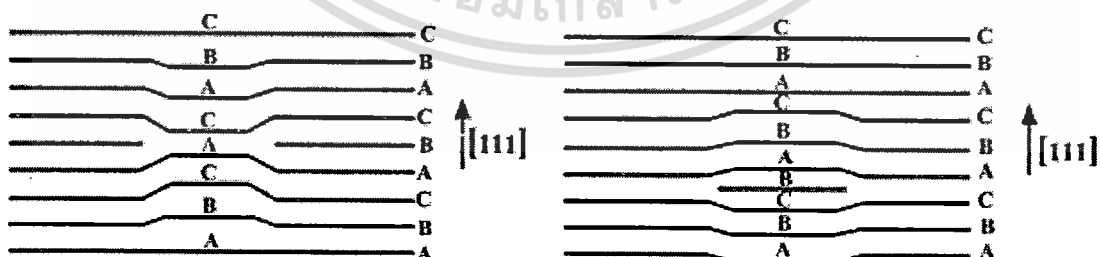
จากความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิว ที่มีระนาบที่แบ่งการเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกเป็น 2 บริเวณ โดยมีสมมาตรแบบกระจก ลักษณะนี้จึงทำให้โครงสร้างผลึกมีลักษณะเป็น “ทวิน (twin)” ส่วนระนาบที่แบ่งการเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกเรียกว่า “ระนาบทวิน (twin plane)” ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบระนาบทวิน

2.4.3.3 การจัดเรียงระนาบผิกลำดับ (stacking faults)

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่ระนาบของอะตอมระนาบหนึ่งไม่เรียงลำดับกับระนาบอื่น ๆ ในขณะที่โครงสร้างผลึกบนด้านใดด้านหนึ่งของระนาบอื่นนั้นสมบูรณ์ เช่น การเรียงลำดับในผลึก fcc มีลักษณะเป็น ABCABCABC... ถ้าเกิดการจัดเรียงระนาบผิกลำดับจะเปลี่ยนเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิกลำดับจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก (face center cubic : fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิดผลึกและอาจเป็นผลจากการเกิดดิสโลเคชันย่อย (partial dislocation) สองส่วน



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบผิกลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงคุณภาพด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ฐิตินัย,2530;งามนิตย์, 2531;งามนิตย์ 2545;Kitte I,1971;แมนและสมชัย,2541;อุปถัมภ์,2548;สุกฤษฎี,2547;ชาญวิทย์, 2538 Eze,2005;Hammond,1997)

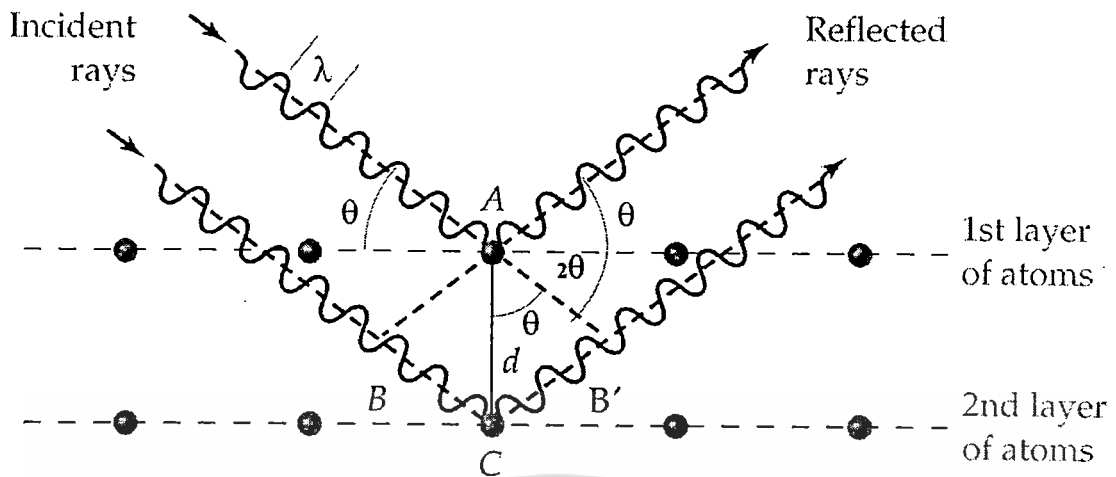
การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกสมบูรณ์ เป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์ อื่นๆ ต่อไป

ในปี 1912 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ มากซ์ ฟอน เลาเอ (Max Von Laue) ได้ค้นพบการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึก (มีระยะห่างระหว่างอะตอมประมาณ 10^{-10} เมตร) โดยการผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในผลึกแล้วศึกษาถึงวิธีการแทรกสอดของแสงบนแผ่นฟิล์ม โดยสังเกตว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่รังสีเอกซ์ถูกกระเจิงด้วยอะตอมหรือโมเลกุลภายในผลึก

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ชาวอเมริกันชื่อ วิลเลียม เฮนรี แบริก และ วิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบริก (William Henry Bragg และ William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดว่า เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน และได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's Law) ดังสมการที่ (2.1)

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

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



รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เราสามารถนำมาหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ ในกรณีของผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก (cubic system, $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90$ องศา) มีความสัมพันธ์ดังนี้

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

จากสมการที่ (2.1) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a) เมื่อทราบมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ ($h k l$) ดังสมการ

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.3)$$

ส่วนผลึกคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ จัดอยู่ในระบบเตตระโกนอล (tetragonal system, $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) มีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} + \frac{1}{c^2} \quad (2.4)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.1) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.4) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a, c) เมื่อเราทราบขนาดมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และคัมมิเตอร์ (h k l) ดังสมการ

$$\frac{4\sin^2\theta}{\lambda^2} = \frac{h^2+k^2+l^2}{a^2} \quad (2.5)$$

นอกจากนั้นเรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปหาสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก texture coefficient) ของระนาบ (h k l) ขนาดของเกรน ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (dislocation density) ความเครียด (strain) และความน่าจะเป็นของสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผิดพลาด (stacking fault probability) ได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึกหาได้จากสมการ

$$TC(hkl) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}{\frac{1}{N} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}} \quad (2.6)$$

| | | | |
|-------|------------------------|-----|---|
| เมื่อ | TC(h k l) | คือ | สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (h k l) |
| | I(h k l) | คือ | ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ปรากฏ |
| | I ₀ (h k l) | คือ | ความเข้มมาตรฐาน ASTM ของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ |
| | N | คือ | จำนวนพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏ |

ขนาดของเกรน (D) และ ความเครียด (ε_s) เราสามารถหาได้จากสมการ

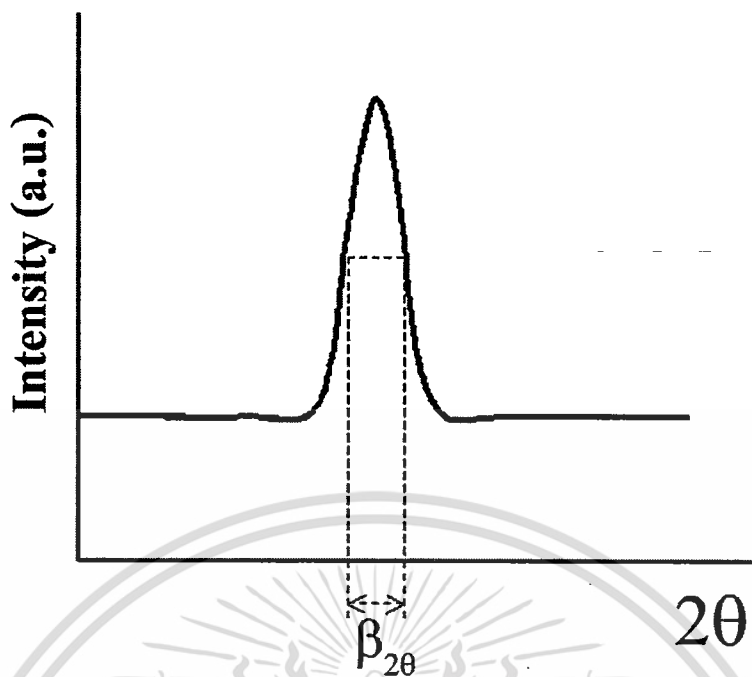
$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos\theta} - \varepsilon_s \tan\theta \quad (2.7)$$

ดังนั้น

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

| | | | |
|-------|----------------|-----|--|
| เมื่อ | D | คือ | ขนาดของเกรน |
| | β | คือ | ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum, FWHM) |
| | θ | คือ | มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก |
| | ε _s | คือ | ความเครียด |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

จากสมการที่ (2.8) ถ้าเราให้ $\sin\theta = 0$ แล้วเราจะสามารถหาขนาดของเกรนได้ ส่วนขนาดของความเครียดสามารถหาได้จากความชันของกราฟที่วัดระหว่าง $\beta\cos\theta$ และ $\sin\theta$

จำนวนของดิสโลเคชันในหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือที่เราเรียกว่า “ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (γ)” จะหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (2.9)

$$\gamma = \frac{c}{D^2} \quad (2.9)$$

โดยที่ γ มีหน่วยเป็นแถวต่อตารางเมตร (line/m^2) , D มีหน่วยเป็นเมตรและ c เป็นค่าค่าคงที่ที่ทำความหนาแน่นของดิสโลเคชันมีค่าน้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้เราให้ค่าเท่ากับ 1

ความน่าจะเป็นของสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผิดลำดับ (S_f) หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.10)

$$S_f = \frac{2\pi^2\beta}{45(3\tan\theta_{hkl})^2} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ β คือ ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum, FWHM)
- θ_{hkl} คือ มุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูงสุด ในงานวิจัยนี้คือ θ_{112}

2.6 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์,2545;Kittel,1971;Tilley,2004;อุปถัมภ์,2548; ลูกฤษฏี,2547;วีรชัย,2547;Manifacier;Gasiot and Fillard 1976;Zribi;Kanzari and Rezig 2005;สมเกียรติ, 2542)

เมื่อแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำ พฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านของแสง จากผลของสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถหา ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของสารกึ่งตัวนำได้ โดยจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ การส่งผ่านแสงและการคำนวณหา ค่าช่องว่างแถบพลังงาน

2.6.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (งามนิตย์,2545;Kittel,1971;Tilley,2004;อุปถัมภ์,2548;ลูกฤษฏี,2547;วีรชัย,2547;Manifacier;Gasiot and Fillard,1976;Zribi ;Kanzari and Rezig,2005;สมเกียรติ,2542)

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่มาก 3 ส่วน คือ แถบนำไฟฟ้า (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และ แถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และ เรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำ กับ แถบวาเลนซ์นั้นว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็น ฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal หรือ conductor) และ สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้ โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกัน ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

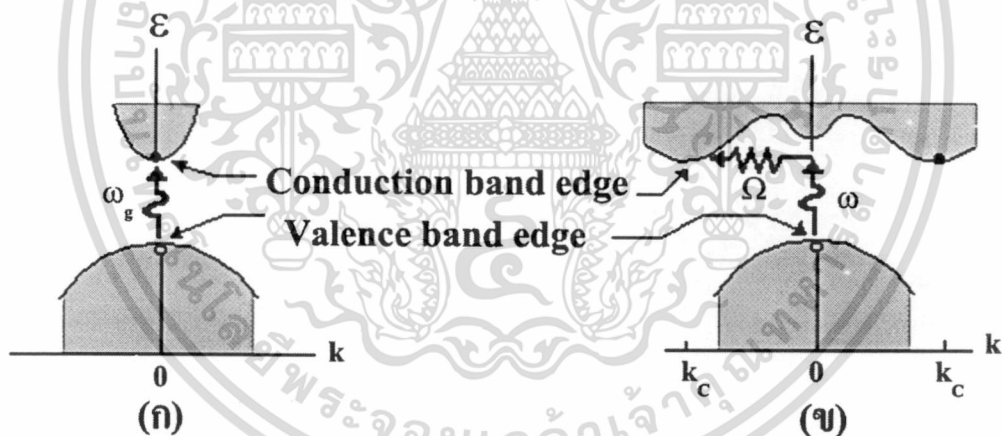
2.6.1.1 ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน $\hbar\omega = E_g$ อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ก)และเมื่อเขียนกราฟ

ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก)

2.6.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

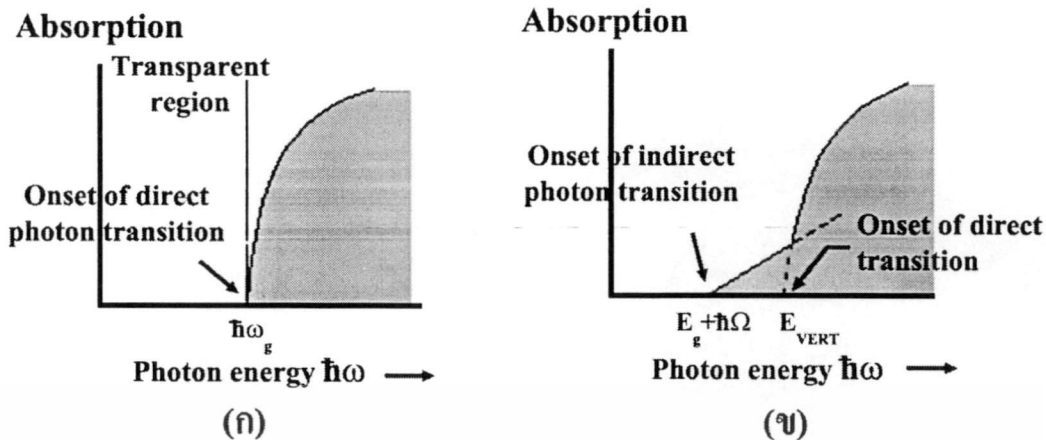
ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$ เมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน $\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$ นั่นคือ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน $E_g = \hbar\Omega$ และ การสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข) และ เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.13(ข)



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



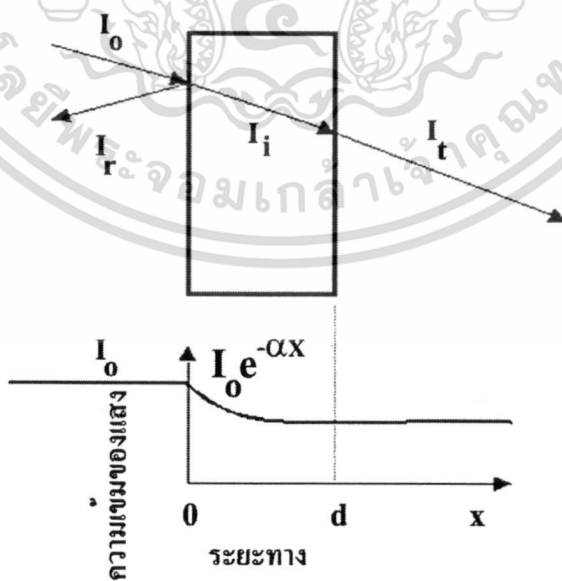
รูปที่ 2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอนกับพลังงาน โฟตอน ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)

ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.6.2 การส่งผ่านแสง (งามนิตย์, 2531; งามนิตย์ 2545; Kittel, 1971; สุกฤษฎี, 2547)

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้ จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.11)$$

หรือ
$$I_r = RI_0 \quad (2.12)$$

| | | | |
|-------|----------|-----|--|
| เมื่อ | I_0 | คือ | ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง |
| | I_r | คือ | ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง |
| | I_t | คือ | ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง |
| | I_i | คือ | ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง |
| | R | คือ | สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity) |
| | T | คือ | สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance) |
| | α | คือ | สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient) |
| | d | คือ | ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง |

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.13)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.14)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.15)$$

2.6.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์,2531;งามนิตย์,2545;Kittel,1971; สุกฤษฏี,2547)

เมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วน ถูกดูดกลืน และส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T + A + R = 1 \quad (2.16)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
 A คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่
$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.17)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก
$$n_c = n - iK \quad (2.18)$$

เมื่อ n คือ จำนวนจริง
 K คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสียนิว (extinction coefficient)
 โดยที่ n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

2.6.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง (งามนิตย์,2531; งามนิตย์,2545; Kittel,1971; สุกฤษฏี,2547)

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าช่องว่างพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็น การกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

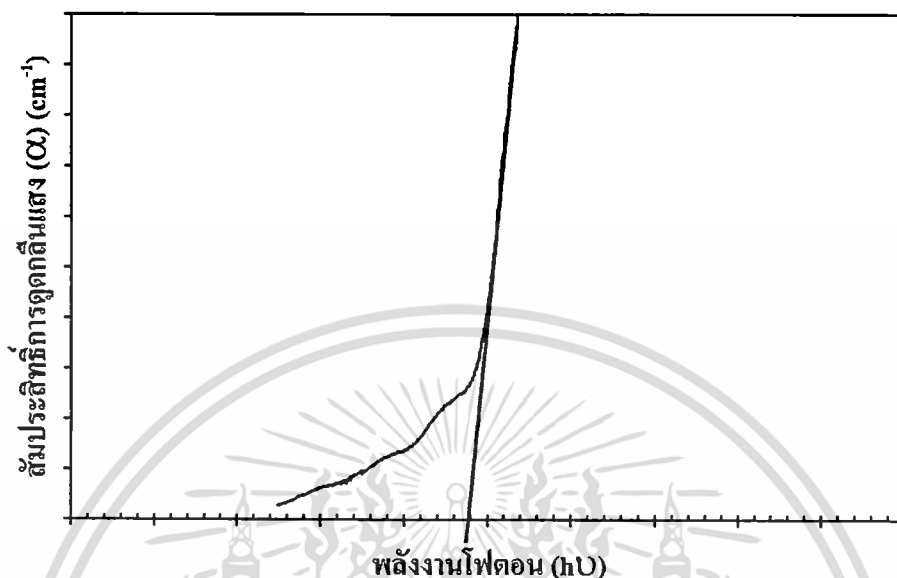
การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.14 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.16 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$(\alpha_{hv}) = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha_{hv}) = B(h\nu - E_g)^2 \quad (2.22)$$

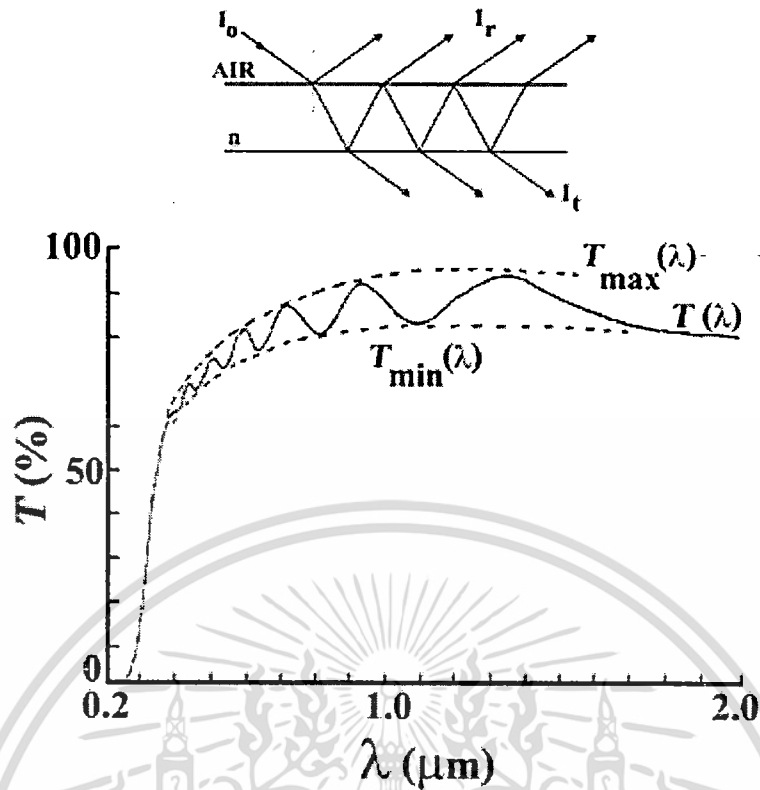
และสำหรับกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha_{hv}) = C(h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.23)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 $h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน
 A, B และ C คือ ค่าคงที่
 h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

2.6.5 การหาความหนาของฟิล์มบางจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง (Manificier; Gasiot and Fillard, 1976; Zribi; Kanzari and Rezig, 2005)

เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบาง จะมีแสงส่วนหนึ่งสะท้อนที่ผิวหน้าและแสงอีกส่วนจะส่งผ่านเข้ามาในฟิล์มบาง หลังจากนั้นจะเกิดการสะท้อนที่ผิวทั้งสองด้านของฟิล์มบางและทะลุผ่านออกจากฟิล์มบาง โดยแสงที่สะท้อนและหักเหออกไปจากฟิล์มนี้ก็จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน (constructive interference) และการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (destructive interference) ทำให้เกิดริ้วของการแทรกสอดดังรูปที่ 2.16 จากความสัมพันธ์นี้เราสามารถนำมาคำนวณหาขนาดความหนาของฟิล์มบางได้ดังสมการ (2.24)



รูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นที่พิจารณาถึงรีฟลักทีวิตีของฟิล์มบาง

$$t = \frac{M\lambda_1\lambda_2}{2(n\lambda_1\lambda_2 - n\lambda_1\lambda_2)} \tag{2.24}$$

เมื่อ M คือ จำนวนลูกคลื่นที่อยู่ระหว่างคลื่นสองลูกที่ถูกเลือกพิจารณา (M = 1 สำหรับ สันคลื่นหรือท้องคลื่นที่อยู่ติดกัน)

λ_1, λ_2 คือ ความยาวคลื่นของสันคลื่นหรือท้องคลื่นที่ถูกเลือกพิจารณา

$n(\lambda_1), n(\lambda_2)$ คือ ดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ณ สันคลื่นหรือท้องคลื่นที่ถูกเลือกพิจารณา (ประมาณว่ามีค่าเท่ากัน)

ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสามารถหาได้จากสมการที่ (2.23)

$$n^2 = \frac{n_a^2 + n_g^2}{2} + 2n_a n_g T^n + \left[\frac{(n_a^2 + n_g^2 + 4n_a n_g T^n)}{4} - n_a^2 n_g^2 \right] \tag{2.25}$$

โดยที่ $T^n = \frac{(T_{max} - T_{min})}{(T_{max} T_{min})} \tag{2.26}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ n คือ ดัชนีหักเหของฟิล์มบาง
 n_a คือ ค่าดัชนีหักเหของอากาศ (= 1)
 n_g คือ ค่าดัชนีหักเหของกระจก (= 1.5)
 T_{\max} และ T_{\min} คือ ตำแหน่งของรีฟการแทรกสอดสูงสุด และ ต่ำสุดดังแสดงใน
 รูปที่ 2.20 และ มีค่าสูงสุดเป็น 1

2.7 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (งานนิตย,2531;งานนิตย,2545;Kittel,1971;Runyan,1975; Tilley,2004;อุปถัมภ์,2548;สมฤทธิ,2538;Sze,1981;van der Pauw,1958)

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงาน
 ต้องห้ามและแถบการนำ สารกึ่งตัวนำซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่
 อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอน และ โฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยัง
 แถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใด ๆ ของสารกึ่งตัวนำจะ
 ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และ ความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

2.7.1 สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพคล่อง (งานนิตย,2531;งานนิตย,2545;Kittel,1971 อุปถัมภ์,2548;สมเกียรติ,2542;สมฤทธิ,2538;Sze,1981;van der Pauw,1958)

ในผลึกอุดมคติหรือผลึกสมบูรณ์ (ideal or perfection crystal) การเคลื่อนที่ของพาหะ
 เป็นไปอย่างอิสระ สนามไฟฟ้าภายนอก (ϵ) จะทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v มี
 ความเร่งคงที่นั่นคือ

$$m_e \frac{dv}{dt} = e\epsilon \quad (2.27)$$

แต่สำหรับผลึกจริงหรือผลึกไม่สมบูรณ์จะเป็นผลึกที่ประกอบด้วยข้อบกพร่องผลึกแบบ
 ต่าง ๆ ได้แก่ โครงผลึกที่มีอะตอมของสารเจือปน โครงผลึกที่ผิดรูปหรือบิดเบี้ยวไป และ โฟนอน
 เป็นต้น การที่พาหะชนเข้ากับสิ่งเหล่านี้ย่อมทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของพาหะถูกจำกัด
 ที่สภาวะคงตัว (steady state) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อช่วงเวลาผ่านไปนานมากจนประมาณได้ว่าเข้าสู่
 อนันต์ ($t \rightarrow \infty$) หรือที่เรียกว่าระบบดำเนินเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน (thermal equilibrium)
 หรือเข้าสู่สภาวะคงตัว ดังนั้นจะได้ค่าเฉลี่ยของความเร็วลอยเลื่อนของพาหะ คือ

$$\langle v \rangle = e\epsilon \frac{\langle \tau \rangle}{m_e} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ τ คือ ช่วงเวลาเฉลี่ยปลอดการกระเจิง (mean free time) ซึ่งเป็นเวลาที่พาหะเคลื่อนที่ได้ ก่อนที่จะมีการกระเจิงกัน โดยที่

$$\tau = \frac{1}{v} \quad (2.29)$$

เมื่อ l คือ ระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดการกระเจิง (mean free path) ซึ่งเป็นระยะทางที่ พาหะเคลื่อนที่ได้ก่อนที่จะมีการกระเจิงกัน

v คือ ความเร็วลอยเลื่อนของพาหะ

นิยามความหนาแน่นของกระแส

$$J = ne\langle v \rangle \quad (2.30)$$

จะได้

$$J = \frac{ne^2\langle \tau \rangle}{m_e} \quad (2.31)$$

นี่คือกฎของโอห์มซึ่งนิยามโดย

$$J = \sigma \mathcal{E} \quad (2.32)$$

เมื่อ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity)

นิยามสภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity: ρ) ว่าเป็นส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เพราะฉะนั้นจะได้

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m_e}{ne^2\langle \tau \rangle} \quad (2.33)$$

พิจารณาสมการที่ (2.38) ค่าเฉลี่ยของความเร็วลอยเลื่อน $\langle v \rangle$ เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ สนามไฟฟ้านั้นคือ

$$\langle v \rangle = \mu \mathcal{E} \quad (2.34)$$

และ $\mu = \frac{e\langle \tau \rangle}{m_e}$ (2.35)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ μ คือ สภาพคล่องของพาหะ (mobility)

โดยนิยามว่าเป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วลอยเลื่อนของพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าขนาดหนึ่งหน่วย มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร ต่อ โวลต์วินาที ซึ่งเป็นจริงเมื่อสนามไฟฟ้าที่มาจากรายนอกมีค่าไม่มาก ($E < 1$ กิโลโวลต์ ต่อ เซนติเมตร)

สภาพคล่องของพาหะ (μ) ช่วงเวลาเฉลี่ยที่ปลอดการกระเจิง (τ) และ ระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดการกระเจิง (l) ขึ้นกับกลไกที่สำคัญ 2 ประการ คือ ประการที่หนึ่ง เป็นกรณีที่พาหะมีการกระเจิงกับโฟนอน (phonon scattering) ซึ่งมักเด่นชัดที่อุณหภูมิสูงและประการที่สอง เป็นกรณีที่พาหะมีการกระเจิงกับรูปทรงทางเรขาคณิตของสาร (geometric scattering) ซึ่งมักเด่นชัดที่อุณหภูมิต่ำ ได้แก่ ขนาดและรูปร่างขอบเขตของโครงสร้างผลึก การมีอะตอมของธาตุไอโซโทปในผลึก การมีข้อบกพร่องผลึกแบบต่างๆ ในผลึกไม่สมบูรณ์ การกระเจิงกับโฮลหรืออิเล็กตรอนด้วยกันเอง และการกระเจิงกับอะตอมของสารเจือปน เป็นต้น

2.7.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) (งามนิตย์,2531;งามนิตย์,2545;Kittel,1971;

อุปถัมภ์,2548;สมเกียรติ,2542;สมฤทธิ,2538;Sze,1981;van der Pauw,1958)

จากสมการที่ (2.33) และ (2.35) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.36)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{p\mu_h} \quad (2.37)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{(en\mu_e + p\mu_h)} \quad (2.38)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

p คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ

μ_e และ μ_h คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.39) และ (2.40) คือ

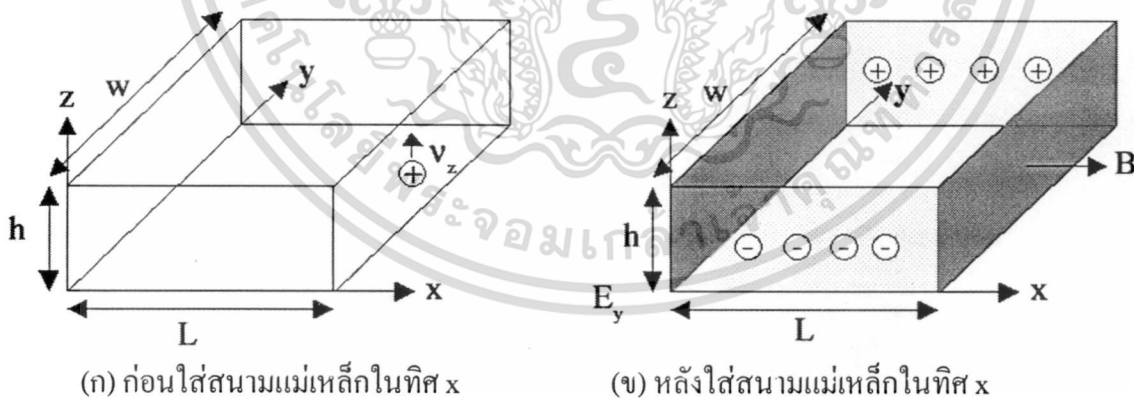
กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$\text{ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน} \quad (n) = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.39)$$

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$\text{ความหนาแน่นของโฮล} \quad (p) = \frac{1}{e\rho\mu_h} \quad (2.40)$$

เราสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพคล่องของพาหะได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต ฮอลล์ (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.18 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว z หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ z ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_z เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง z คือ I_z ดังสมการที่ (2.41)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $I = nqvA$ (2.41)

ดังนั้น $I_z = qnwhv_z$ (2.42)

จากกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (2.43)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.44)$$

จากรูปที่ 2.17

$$A = wh \quad (2.45)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_z) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.43) (2.44) และ (2.45)

$$\rho = \frac{V_z A}{I_z L} = \frac{V_z wh}{I_z L} \quad (2.46)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก (B_x) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ x อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ y สะสมในบริเวณขอบด้านนอก ($y = 0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดโวลต์จันที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (Hall field: E_y หรือ E_H) และเกิดความต่างศักย์ฮอลล์หรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ y (Hall voltage: V_H) ขึ้น ทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_z + B_z) + qE_y \quad (2.47)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่ออิเล็กตรอนมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อนหรือสภาวะคงตัว ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศ $-z$ ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_z B_x = \frac{1}{qn} \frac{I_z}{wh} B_x \quad (2.48)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.48) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H J_z B_x \quad (2.49)$$

เมื่อ
$$J_z = \frac{I_z}{wh} \quad (2.50)$$

แล้ว
$$R_H = \frac{E_y}{J_z B_x} = \frac{1}{qn} \quad (2.51)$$

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \frac{I_z B_x}{wh} dy = \frac{1}{qn} \frac{I_z B_x}{h} \quad (2.52)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H h}{I_z B_x} \quad (2.53)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_z B_x}{V_H qh} \quad (2.54)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.55)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น $R_H = \frac{r}{nq}$ (2.56)

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี $R_H = \frac{r}{pq}$ (2.57)

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์

ซึ่งสามารถนิยามค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.58)$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่นการกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนไนซ์ สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมากดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B=\infty)} \quad (2.59)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10,000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่

จากสมการที่ (2.37) และ (2.57) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r\mu \quad (2.60)$$

หรือ จากสมการที่ (2.53) $\mu_H = \frac{V_H}{I_z} \frac{h}{B_x} \frac{1}{\rho}$ (2.61)

สภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

(งามนิตย์,2531;งามนิตย์,2545;Kittel,1971;อุปถัมภ์,2548;สมเกียรติ,2542;สมฤทธิ์, 2538;Sze,1981;van der Pauw,1958)

วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้หลายวิธี โดยมีทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของ อุปกรณ์สัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง เราสามารถจำแนกวิธีการวัด สภาพต้านทานไฟฟ้าได้หลายวิธีดังนี้

1. วิธีวัดโดยตรง (direct method)
2. วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว (two points probe method)
3. วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง (linear four-point probe method)
4. วิธีวัดด้วยขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน (non-collinear probe spacing method) เป็นวิธีที่การจัดวางตำแหน่งของขั้วสัมผัสจะเป็นไปตามลักษณะชิ้นสารตัวอย่าง หรือตาม ความเหมาะสมที่ผู้จัดเห็นสมควรได้แก่
 - 4.1 รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (square array)
 - 4.2 รูปสี่เหลี่ยมคางหมู (delta four-point probe)
 - 4.3 ขั้วสัมผัสอยู่ด้านบน-ด้านล่าง (over-under probe)
 - 4.4 วิธีแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw method)

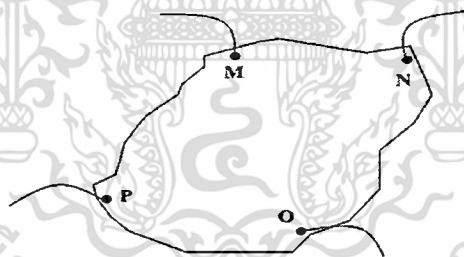
สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะวิธีแวนเดอร์เพาว์ เพราะเป็นวิธีที่ใช้กับสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบาง รูปร่างไม่แน่นอนหรือไม่จำกัดรูปร่างของสารตัวอย่าง มีความหนาสม่ำเสมอ โดยการวางขั้วสัมผัสให้อยู่กับขอบของสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้า และ ออกจากสารกึ่งตัวนำจะต้องเป็นรอยต่อที่ไม่ขัดขวางการไหลของกระแส (nonblocking contact) เพื่อให้ได้รอยต่อแบบนี้จำเป็นต้องเตรียมผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำให้เหมาะสม รวมทั้งชนิด และ รูปร่างของขั้วสัมผัส จะต้องทำขึ้นจากวัสดุที่แข็งแรง มีปลายแหลมสามารถแตะสัมผัสกับ ขั้วสัมผัสโลหะที่อยู่บนผิวของสารกึ่งตัวนำได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวหน้าของชิ้นสาร กึ่งตัวนำนั้น

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีนี้จะให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ โดยจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

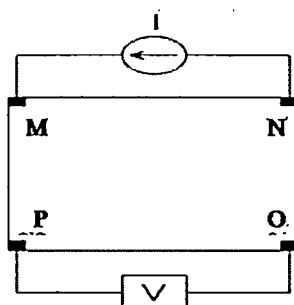
1. ขั้วสัมผัสต้องมีสมบัติที่ดี มิฉะนั้นจะทำให้เส้นสมศักย์ (equipotential line) บิดเบี้ยวหรือ ผิดรูป (distorted) ไปและยังช่วยลดปัญหาเรื่องความต้านทานที่รอยต่อด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขั้วไฟฟ้าต้องสัมผัสที่ขอบของสารกึ่งตัวนำและต้องมีขนาดเล็กมากๆ เมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าคิดว่าสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆที่มีความยาวของเส้นรอบรูปเป็นแบบกึ่งอนันต์ (semi-infinite plate) คือ ให้กระแสที่ไหลและค่าความต่างศักย์บนชั้นสารตัวอย่างเสมือนอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน
3. ความหนาของสารตัวอย่างจะต้องมีความสม่ำเสมอตลอด และ เนื้อสารตัวอย่างจะต้องไม่มีรอยแตกหรือรอยแยกใดๆ
4. ไม่ควรออกแรงกดขั้วสัมผัสแรงเกินไป เพราะอาจทำให้ผิวหน้าของสารตัวอย่างเสียหายแตกร้าวได้
5. ไม่ควรใช้กระแสไฟฟ้าสูงเกินไป เนื่องจากสารกึ่งตัวนำจะเกิดความร้อนทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน นอกจากนี้ โวลต์มิเตอร์จะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) สูงๆ ด้วย
6. รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำควรเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี
7. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปของสารกึ่งตัวนำจะช่วยลดปัญหาความคลาดเคลื่อนของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.20 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว M-N ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว P-O จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.62)

$$R_1 = \frac{V_{PO}}{I_{MN}} \quad (2.63)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว N-O แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-P จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.63)

$$R_2 = \frac{V_{MP}}{I_{NO}} \quad (2.64)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.65)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

โดย
$$f = \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{2R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.66)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} d \quad (2.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

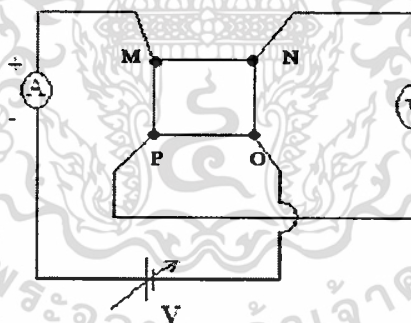
เมื่อ d คือ ความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

2.7.4 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (งามนิตย์,2531;งามนิตย์,2545; Kittel,1971;อุปลักษณ์,2548;สมเกียรติ,2542;สมฤทธิ,2538;Sze,1981;van der Pauw,1958)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สารสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้ อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหล ภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชั้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชั้นสาร
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาเท่ากันตลอด
4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชั้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M N O และ P กระจายอยู่ที่ บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.21 แสดงการต่อวงจรการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจะเข้าไปในแนวทะแยงมุมขั้ว M , O และวัดความต่างศักย์จากขั้ว N , P

นิยาม $R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}}$ (2.68)

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

$$R_H = -\left(\frac{V_H}{I}\right) \left(\frac{d}{B}\right) \quad (2.69)$$

| | | | |
|-------|-------|-----|--|
| เมื่อ | V_H | คือ | ผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก |
| | d | คือ | ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง |
| | B | คือ | ความเข้มของสนามแม่เหล็ก |

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.70)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดภัยการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$1 = \left(\frac{h}{2e}\right) \left(\frac{3n}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.71)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

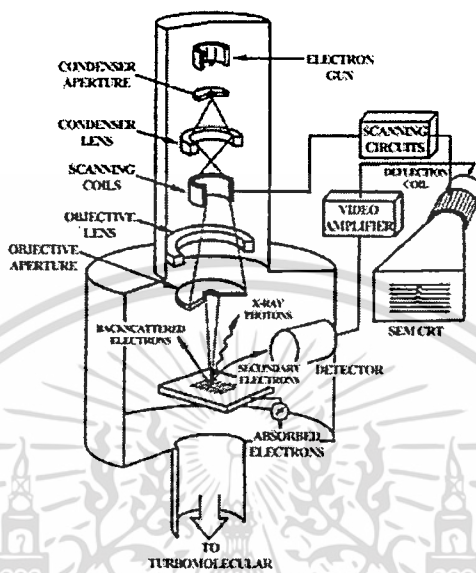
ในทางปฏิบัติกรเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของข้อสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (สุกฤษฎี, 2547; วีรัชย์, 2547; Schroder, 1990)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ถูกใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคมีหลักการทํางาน คือ ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวทางกายภาพปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภาพที่เกิดจาก SEM มีลักษณะเป็นภาพสามมิติ SEM ถูกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2472-2474 แต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากอุปกรณ์ที่รวบรวมสัญญาณที่เกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ มีการแจกแจง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดต่ำ (low resolution) ภาพที่ปรากฏที่จอภาพจึงมีลักษณะพร่ามัวขาดรายละเอียด ในปี พ.ศ. 2508 SEM ได้รับการปรับปรุงระบบเลนส์สนามแม่เหล็กและระบบภาพให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มสนใจและได้รับความนิยมนับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา



รูปที่ 2.22 แสดงส่วนประกอบของเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

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

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กัน โดย d_p แปรผกผันตรงกับ i_p แต่แปรผันแบบผกผันกับ α_p ตัวอย่างเช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง i_p จะมีค่าน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การเตรียมฟิล์มบาง

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางในปัจจุบันมีหลายวิธีที่นิยมใช้กัน โดยเราสามารถแบ่งตามลักษณะการเตรียมได้ดังนี้

1 กระบวนการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ (vacuum processes)

- การระเหยสารในสุญญากาศ (Evaporation, PVD, TE)
- เทคนิคผนังร้อน (Hot wall technique, HWT)
- การระเหิดในระยะประชิด (Close spaced sublimation, CSS)
- สปีดเตอร์ (Sputter deposition, SD)

2 กระบวนการเตรียมฟิล์มที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีจากสถานะแก๊ส (Processes with chemical reactions from the gas phase)

- ซีวีดี (Chemical vapour deposition, CVD)
- พลาสมาซีวีดี (Plasma enhanced CVD, PECVD)
- เอ็ม โอซีวีดี (Metal-organic CVD, MOCVD)
- ซีเอสวีที (Close spaced vapour transport, CSVT)

3 เทคนิคการเตรียมอื่น ๆ (Other techniques)

- การพ่นละอองสารเคมี (Spray pyrolysis, SPL)
- การอบสารละลายเคมี (Chemical bath deposition, CBD)
- การเตรียมโดยวิธีไฟฟ้าเคมี (Electrodeposition, ED)
- เตรียมฟิล์มโดยทำให้เป็นชั้น ๆ ของสาร (Stacked layer reaction, SLR)
- วิธีการพิมพ์สกรีน (Screen printing and sintering, SP)

ในงานวิจัยนี้เราเลือกใช้กระบวนการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (Thermal Evaporation Method: TE) เนื่องจากฟิล์มที่เตรียมได้ มีคุณภาพดี เหมาะสำหรับนำมาศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง

2.9.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (สุกฤษฎี, 2547; Schroder, 1990; Ohring, 2002)

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร ซึ่งต้องเตรียมในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-4} ถึง 10^{-5} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อน ไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้วเกิดเป็นฟิล์มบาง

2.9.1.1 อัตราการระเหยสาร

จากการทดลองของ Hertz และ Knudsen พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุล ในสูญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\phi_e = \frac{3.513 \times 10^{22}}{(MT)^{\frac{1}{2}}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.72)$$

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

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate : T_e) สามารถหาได้จาก

$$T_e = 5.84 \times 10^{-2} \left(\frac{M}{T}\right)^{\frac{1}{2}} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.73)$$

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

2.9.1.2 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.74)$$

ถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และเมื่อแก๊สเป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.73) ใหม่ได้เป็น

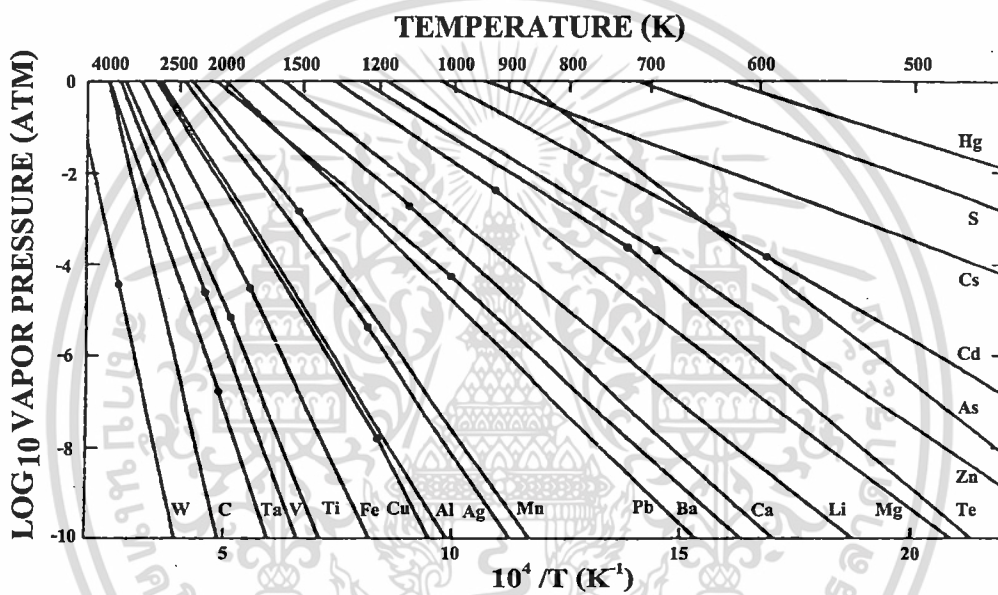
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.75)$$

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

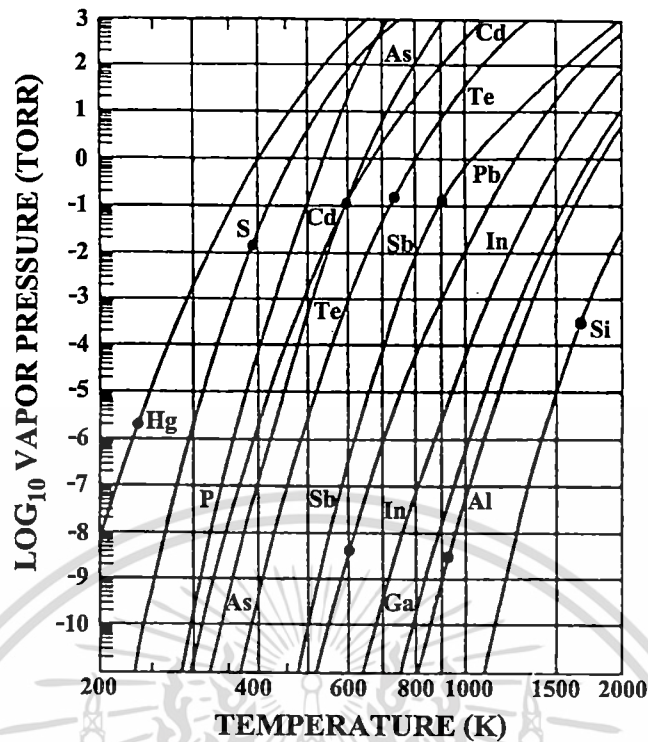
$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_e}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp -\frac{\Delta H_e}{RT} \quad (2.76)$$

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



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

2.9.1.3 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อสารประกอบระเหิดกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว ตัวอย่างเช่น การระเหยสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหยเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้ $MX_{(s)} \rightarrow M_{(g)} + \frac{1}{2}X_{2(g)}$ โดยที่ X คือ S, Te และ Se และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น $MX_{(g)}$ เหมือนเช่นเดียวกับการระเหย แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

| ชนิดของปฏิกิริยา | ปฏิกิริยาทางเคมี | สารตัวอย่าง |
|---------------------------|---|--|
| การระเหยโดยไม่มีการแตกตัว | $MX(s \text{ หรือ } l) \rightarrow MX(g)$ | SiO, GeO, SnO, AlN, CaF ₂ , MgF ₂ |
| การแยกส่วนประกอบ | $MX(s) \rightarrow M(s) + 1/2 X_2(g)$ | Ag ₂ S, Ag ₂ Se |
| | $MX(s) \rightarrow M(l) + 1/n X_n(g)$ | สารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-IV |
| การระเหยโดยการแตกตัว | $MX(s) \rightarrow M(g) + 1/2 X_2(g)$ | |
| (ก) ซาล์โคจีไนต์ | X = S, Se, Te | CdS, CdTe, CdSe |
| (ข) ออกไซด์ | $MO_2(s) \rightarrow MO(s) + 1/2 O_2(g)$ | SiO ₂ , GeO ₂ , TiO ₂ , SnO ₂ , ZrO ₂ |

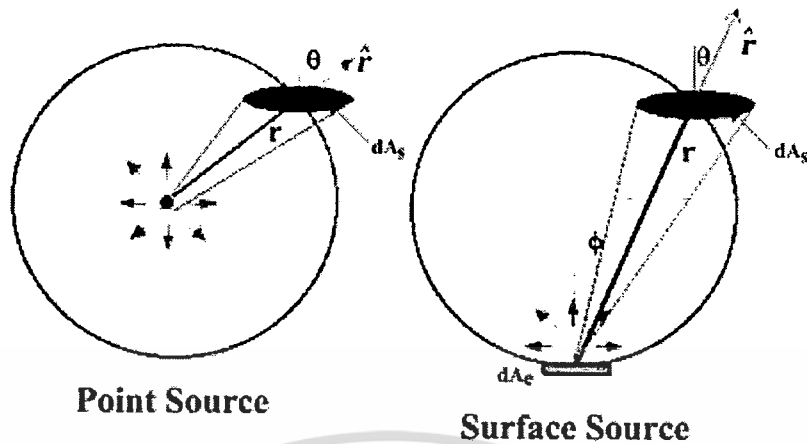
M = โลหะ X = อโลหะ

2.9.1.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหย รวมถึงฐานรองรับที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจากการระเหย (total evaporation mass : \bar{M}_e) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหยแต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดจากพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\bar{M}_e = \int_0^t \int_{A_e} \frac{M}{N_A} \phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_e} dA_e dt \quad (2.77)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงรูปแบบการระเหยของสาร

โดยที่ A_E คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหย ปริมาณของมวล $d\bar{M}_s$ ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่ dA_s จากรูปที่ 2.22 dA_c คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า $dA_c = dA_s \cos \theta$ ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\bar{M}_s = dA_s \left(\frac{\bar{M}_e \cos \theta}{4\pi r^2} \right) \quad (2.78)$$

เมื่อ r คือ ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบมวลตกกระทบบนพื้นที่เล็กน้อย dA_c โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด ϕ และอยู่ห่างเป็นระยะ r จะได้

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

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

ดังนั้น

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

จาก

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

จะได้

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, r)}{dA_s} = \frac{\bar{M}_e \cos \phi \cos \theta}{\pi r^2} \quad (2.79)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \bar{M}_e \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi r^2} \quad n \geq 0 \quad (2.80)$$

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

2.10 ฟิสิกส์พื้นฐานของวัสดุกึ่งตัวนำประเภทดีเจเนอเรต

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำดีเจเนอเรต เช่น ซิลิคอน โพรเซสเซอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ประพฤติเป็นหน้าตาต่างเชิงแสงได้โดยสมบัติของหน้าตา เริ่มจากช่วงความยาวคลื่นสั้นที่สอดคล้องกับช่องว่างแถบพลังงาน 3.75 อิเล็กตรอนโวลต์ ย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต ไปจนถึงช่วงความยาวคลื่นยาวที่สอดคล้องกับความถี่พลาสมาซึ่งจะอยู่ในช่วงอินฟราเรด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ (n) แต่ก็ไม่เกินค่า 2.6×10^{21} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการเจือสารชนิดเอ็นที่เกินระดับบรรทัดฐานของมอตต์ (Mott criterion) ซึ่ง ซิลิคอน โพรเซสเซอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีค่าความหนาแน่นวิกฤตของอิเล็กตรอน (n_c) ประมาณ 10^{19} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อาจจะพิจารณาได้ว่าแถบวาเลนซ์ของ ซิลิคอน โพรเซสเซอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ มีอิเล็กตรอนครอบคลุมอยู่เต็ม ส่วนแถบนำจะมีอิเล็กตรอนครอบครองอยู่บางส่วน ซึ่งอิเล็กตรอนในแถบนำ

ดังกล่าวนี้จะเรียกว่า ดีเจนเนอเรตก๊าซอิเล็กตรอน (degenerate electron gas) และระดับเฟอร์มิ E_f จะมีค่าดังนี้

$$E_f = \frac{\hbar^2(3\pi^2n)^{2/3}}{2m^*} \quad (2.81)$$

เมื่อ \hbar และ m^* คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (\hbar)หารด้วย 2π และ มวลยังผลของอิเล็กตรอนตามลำดับสมบัติเชิงแสงของขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซกส์แสงอาทิตย์ สามารถที่จะอธิบายด้วยแบบจำลองของครูด แต่การกระเจิงของอิเล็กตรอนในขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซกส์แสงอาทิตย์ มาจากสาเหตุ เช่น การกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือที่เป็นกลางทางไฟฟ้าการกระเจิงเนื่องจากโฟนอน และการกระเจิงเนื่องจากข้อบกพร่องผลึก เป็นต้น โดยเฉพาะการกระเจิงเนื่องจากไอออนของอะตอมสารเจือจะแสดงผลอย่างโดดเด่นกว่าอย่างอื่น

ความหนาแน่นของกระแสท้องถิ่น (local current density, J) ของตัวนำที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านเข้ามาจะอธิบายอย่างง่ายด้วยแบบจำลองของครูดดังนี้ คือ

$$\frac{d\vec{J}}{dt} + \frac{1}{\tau}\vec{J} = \frac{ne^2}{m^*}\vec{E} \quad (2.82)$$

เมื่อ $\vec{E}(t) = \vec{E}(\omega)e^{-i\omega t}$

และ $\vec{J}(t) = \vec{J}(\omega)e^{-i\omega t}$

สภาพนำไฟฟ้าของตัวนำที่ขึ้นกับความถี่จะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$\vec{J}(\omega) = \sigma(\omega)\vec{E}(\omega) \quad (2.83)$$

แล้วจะได้ว่าสภาพนำไฟฟ้า คือ

$$\sigma(\omega) = \left[\frac{ne^2\tau}{m^*} \right] \left[\frac{1}{1-i\omega\tau} \right] = \frac{\sigma_0}{1-i\omega\tau} \quad (2.84)$$

สำหรับสภาพนำไฟฟ้ากระแสตรง σ_0 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_0 = \left[\frac{ne^2\tau}{m^*} \right] \equiv \omega_N^2 \epsilon_0 \tau \quad (2.85)$$

เมื่อ

$$\omega_N^2 = \frac{ne^2}{m^* \epsilon_0} \quad (2.86)$$

แต่เนื่องจาก

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + i\omega \epsilon(\infty) \epsilon_0 \vec{E} = i\omega \epsilon(\omega) \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.87)$$

จะได้ว่าฟังก์ชัน ไดอิเล็กตริก คือ

$$\begin{aligned} \epsilon(\omega) &= \epsilon(\infty) - \frac{\sigma(\omega)}{i\omega \epsilon_0} \\ &= \epsilon(\infty) - \left[\frac{\omega_N^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \right] - i \left[\frac{\omega_N^2 \tau}{\omega} \right] \left[\frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \right] \end{aligned} \quad (2.88)$$

เมื่อ $\epsilon(\infty)$ คือสภาวะยอมทางไฟฟ้า (permittivity) ของแลตทิซข้อไฟฟ้าโปร่งแสงของเซมิคอนดักเตอร์ที่ความถี่สูง แต่เนื่องจากฟังก์ชัน ไดอิเล็กตริกเป็นจำนวนเชิงซ้อนและสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) - i\epsilon_2(\omega) \quad (2.89)$$

จำนวน ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ

$$\epsilon_1(\omega) = \epsilon(\infty) - \frac{\omega_N^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.90)$$

จำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ

$$\epsilon_2(\omega) = \frac{1}{\omega} \left[\frac{\omega_N^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \right] \quad (2.91)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีค่า $\epsilon(\infty) \sim 4.0$ และ $m^* = 0.5m_e$ ส่วนสภาพคล่องของพาหะ (mobility, μ_e) ≈ 50 ตารางเซนติเมตร ต่อ โวลต์วินาที ช่วงเวลาการกระเจิงสัญญาณไฟตรง $\tau_0 = \frac{m^* \mu_e}{e} \approx 10^{-14}$ วินาที จากการทดลองเชิงแสงพบว่าขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีค่าช่วงเวลาการกระเจิง $\tau \sim 3.3 \times 10^{-15}$ วินาทีซึ่งน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี ดังนั้น ในการคำนวณของงานนี้จะประมาณว่า $\tau = \frac{\tau_0}{3}$ สำหรับเงื่อนไขที่ให้ $\epsilon_1(\omega_p) = 0$ นี้จะเป็นนิยามความถี่พลาสมา (ω_p) ซึ่งจะสามารถเขียนได้ว่า

$$\omega_p = \left[\frac{\omega^2}{\epsilon(\infty)} - \frac{1}{\tau^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.92)$$

เมื่อ $\omega < \omega_p$ ตัวนำจะสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจาก $\epsilon_1 < 0$ ที่ขีดจำกัดสูงสุดของขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน $n > 10^{21}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและสภาพคล่องของพาหะ ($\mu_e = \frac{e\tau_0}{m^*} > 20$ ตารางเซนติเมตร ต่อ โวลต์วินาที) แล้ว $\frac{\omega_N^2 \tau^2}{\epsilon(\infty)} \gg 1$ ดังนั้น

$$\omega_p = \frac{\omega_N}{\sqrt{\epsilon(\infty)}} = \left[\frac{ne^2}{\epsilon(\infty)\epsilon_0 m^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.93)$$

จากสมการที่ (2.92) จะเห็นได้ว่า ω_p จะขึ้นอยู่กับการขึ้นกับ \sqrt{n} แต่ไม่ขึ้นกับ τ (ซึ่ง τ จะสัมพันธ์กับสภาพคล่องตัวของพาหะ $\mu_e = \frac{e\tau_0}{m^*}$) กล่าวคือฟิล์มบางจะมีสมบัติไม่สะท้อนแสงความยาวคลื่น ในอากาศ λ_0 ได้ต่อเมื่อ

$$\omega_p < \frac{2\pi c}{\lambda_0} \quad (2.94)$$

แต่
$$\omega_p = \left(\frac{ne^2}{\epsilon(\infty)\epsilon_0 m^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.95)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.93) จะกลายเป็น

$$\left[\frac{ne^2}{\epsilon(\infty)\epsilon_0 m^*} \right]^{\frac{1}{2}} < \frac{2\pi c}{\lambda_0} \quad (2.96)$$

$$n < \left[\frac{4\pi^2 \epsilon(\infty) m^*}{\mu_0 e^2 \lambda_0^2} \right] \quad (2.97)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับฟิล์มบาง ITO จะมีเงื่อนไขว่า $n < \frac{1.6 \times 10^{27}}{\lambda_0^2 (\text{nm}^2)}$ ดังนั้นถ้าต้องการให้ชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผ่านแสงในย่านมองเห็นได้ (400 – 780 นาโนเมตร) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนไม่ควรเกิน 2.6×10^{21} ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ เพื่อให้ปลอดภัยเราจะคิดเผื่อความยาวคลื่นให้ไกลถึง 1 ไมโครเมตร สอดคล้องกับความถี่พลาสมา (ω_p) = 1.88×10^{15} ต่อวินาที หรือเท่ากับ 3.0×10^{14} เฮิรตซ์ ในทางปฏิบัติได้ทำการประดิษฐ์ชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ให้มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงกว่า 1.5×10^{21} ลูกบาศก์เซนติเมตร ได้แล้ว แต่ที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงกว่าค่านี้จะส่งผลให้การโปร่งแสงในช่วงแสงสีแดงของฟิล์มชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์ถูกลดทอนลงส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์จะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$R(\omega) = \left[\frac{\sqrt{\epsilon^*(\omega)} - 1}{\sqrt{\epsilon^*(\omega)} + 1} \right]^2 \quad (2.98)$$

กรณี $\omega < \omega_p$ สมการที่ (2.98) จะประมาณได้ว่า

$$R(\omega) \approx 1 - 2 \sqrt{\frac{2\omega}{\omega_p^2 \tau}} \approx 1 - 2 \sqrt{\frac{2\omega \epsilon_0}{\sigma_0}} \quad (2.99)$$

กรณี $\omega \gg \omega_p$ สมการที่ (2.98) จะประมาณได้ว่า

$$R \approx \left[\frac{\sqrt{\epsilon(\infty)} - 1}{\sqrt{\epsilon(\infty)} + 1} \right]^2 \approx 0.11 \quad (2.100)$$

การสะท้อนของแสงที่ผิวหน้าของชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีค่าเข้าใกล้หนึ่งและมีแสงเพียงเล็กน้อยที่ถูกดูดกลืนในฟิล์มชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ระยะความลึกผิว (skin depth, δ) สามารถกำหนดได้จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงดังนี้ คือ

$$T(t) = T(0) \exp\left(\frac{-2t}{\delta}\right) \quad (2.101)$$

เมื่อ $T(t)$ และ $T(0)$ คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เมื่อฟิล์มหนา t และศูนย์ ตามลำดับ เมื่อ $t = \delta$ จะได้ว่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง $T(t)$ จะลดทอนลงไป 0.14 หรือประมาณ 14% เนื่องมาจากการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนอิสระที่ระยะความลึกผิว จากสมการเลขคลื่น (wave number, k)

$$k = k_1 - ik_2 = \frac{\omega\sqrt{\epsilon^*}}{c} \quad (2.102)$$

แล้วระยะความลึกผิว (δ) จะนิยามว่า

$$\delta = \frac{1}{k_2} \equiv \frac{c}{\omega} \left[\frac{2}{\sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2} - \epsilon_1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.103)$$

ในการคำนวณหาระยะความลึกผิวมีเงื่อนไขอยู่ 2 กรณี

กรณีที่ 1

$$\omega < \omega_p, \omega\tau \ll 1, \epsilon_2 \approx \frac{\omega_N^2\tau}{\omega} \gg |\epsilon_1|, \delta = \left[\frac{2}{\omega\mu_0\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.104)$$

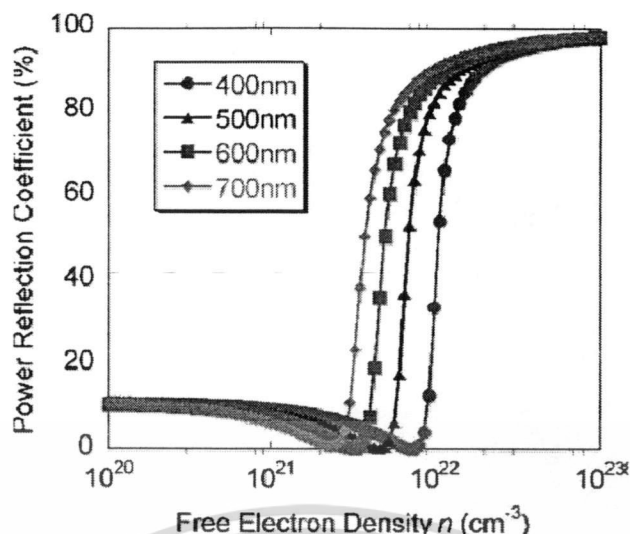
กรณีที่ 2

$$\omega > \omega_p, \omega\tau \gg 1, \epsilon_2 \frac{\omega_N^2}{\omega^3\tau} \ll \epsilon_1, \delta = \frac{2m^*\omega^2\tau}{Z_\infty e^2 n} \quad (2.105)$$

โดยประมาณว่า $\omega < \frac{E_g}{\hbar}$, $\epsilon_1 \approx \epsilon(\infty)$, $Z_\infty \approx \frac{377}{\sqrt{\epsilon(\infty)}} =$ อิมพีแดนซ์ที่ความถี่สูง

ในกรณีที่ 1 เป็นกรณีที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่พลาสมา (เช่น ในย่านความถี่ไมโครเวฟ $\omega = 10^{10}$ ถึง 10^{11} ต่อวินาทีฟิล์มตัวนำโปร่งแสงจะสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี โดยมีประสิทธิภาพการส่งผ่านค่าต่ำมาก)

ในกรณีที่ 2 เป็นที่ความถี่สูงกว่าความถี่พลาสมาซึ่งจะอยู่ในย่านมองเห็นได้ โดยมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด ($n_{\max} = 1.5 \times 10^{21}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) และสภาพคล่องของพาหะ ($\mu_e > 10$ ตารางเซนติเมตร ต่อ โวลต์-วินาที) ซึ่งกรณีที่ 2 นี้เป็นขีดจำกัดที่สำคัญของตัวนำโปร่งแสงที่จะประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง



รูป 2.26 แสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ผิวฟิล์มโปร่งแสง ที่เป็นฟังก์ชันกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ ที่ความยาวคลื่นใน 400 ถึง 700 นาโนเมตร

ในกรณีที่ 2 ($\omega > \omega_p$) ระยะความลึกผิว δ จะแปรตรงกับ $\frac{\omega^2 \mu_e}{n}$ ถ้า n เพิ่มขึ้น แล้วทั้ง δ และ ω_p จะลดลงซึ่งหมายความว่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางโปร่งแสงจะลดลง

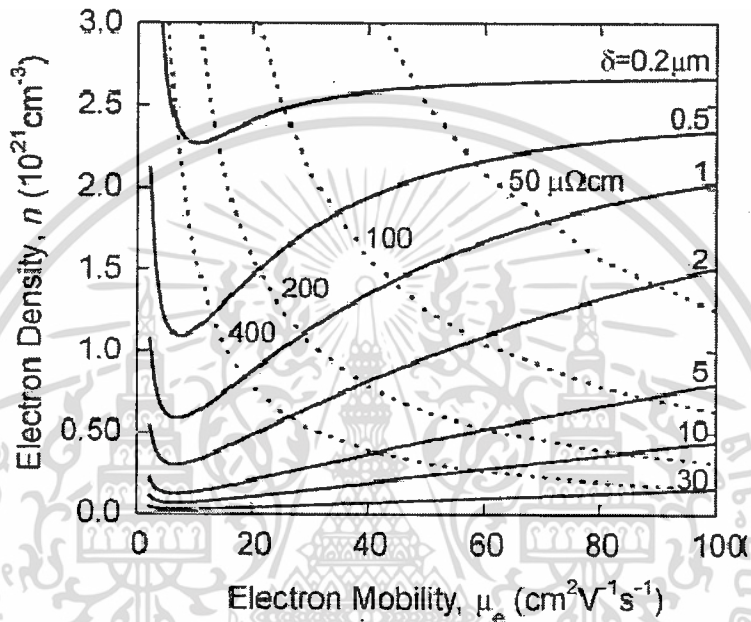
ถ้าพิจารณาให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n) คงที่ การที่สภาพคล่องพาหะเพิ่มขึ้นจะช่วยทำให้ระยะความลึกผิว และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเพิ่มขึ้นได้ ผลการคำนวณหาระยะความลึกของแสงความยาวคลื่น 800 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 2.27 ซึ่งกรณีที่ สอง นี้จะทำให้ผลอยู่ที่บริเวณมุมล่างขวามือของรูปที่ 2.27 และ แปรผันตรงกับ ω^2 นี้จะได้ว่าที่มีค่าน้อยที่สุดในช่วงแสงมองเห็นได้จะปรากฏในย่านแสงสีแดง

ตัวนำโปร่งแสงที่ดีควรมีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสูงและความต้านทานแผ่นต้องต่ำมาก ซึ่งจากรูปที่ 2.27 จะเห็นได้ว่าสภาพคล่องของพาหะที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อฟิล์มบางโปร่งแสงได้ดีกว่าการให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะความลึกผิวลดลงในขณะที่ความถี่พลาสมาเพิ่มขึ้น ในเชิงการทดลองเราสามารถที่จะเพิ่มสภาพคล่องของพาหะให้เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าโดยที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ ยังคงที่ อีกทั้งยังสามารถประดิษฐ์ฟิล์มบางโปร่งแสงให้หนาเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าโดยที่สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงไม่เปลี่ยนแปลงจากสมการความต้านทานแผ่น (R_s)

$$R_s = \frac{1}{n_e \mu_e d}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ d คือ ความหนาของฟิล์มบาง โปร่งแสง จากการเพิ่มขึ้นของทั้งสภาพคล่องของพาหะ และ ความหนาของฟิล์มบาง โปร่งแสงจะส่งผลให้ความต้านทานแผ่นลดลงไปที่เท่าตั่งนั้น การหาวิธีจะเพิ่มค่าสภาพคล่องของพาหะให้ได้มากที่สุดจะเป็นสิ่งสำคัญกว่าสิ่งอื่น ซึ่งสภาพคล่องของพาหะมีขีดจำกัดอยู่ที่ 100 ตารางเซนติเมตร ต่อ โวลต์-วินาที อันเป็นผลเนื่องมาจากการกระเจิงของอะตอมสารเจือที่ถูกล้อไอออนไนซ์



รูปที่ 2.27 แสดงคอนทัวร์ของระยะความลึกที่เป็นฟังก์ชันกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ และสภาพคล่องของพาหะในฟิล์มบาง โปร่งแสงที่มีความยาวคลื่น 800 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

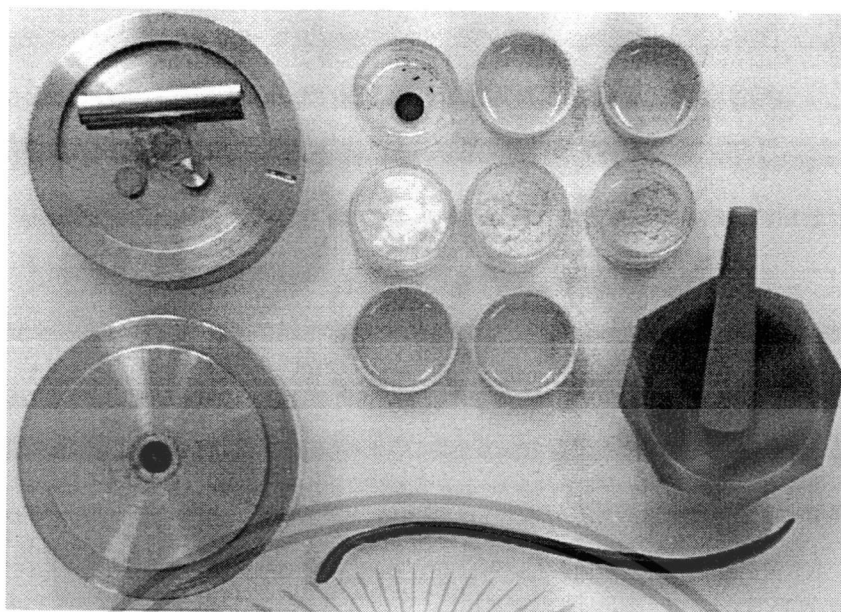
วิธีดำเนินการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกส์จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย (งามนิคย์, ฐิตินัยและทิพรัตน์, 2550; ประธาน, 2550; Tilley, 2004; วีรัชย์, 2547; Manificier, 1976; Kaelin, 2004)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.03, 0.05, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของ $CdO_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.03, 0.05, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับที่มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัมเพื่อใช้สำหรับทำเม็ดเป็นเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.03, 0.05, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ (Sartorius)
3. อุปกรณ์บดสารอาเกต (agate mortar)
4. เครื่องอัดเม็ดสารตั้งต้น
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร
6. เตาเผาสาร
7. ครูซิเบิ้ล
8. เครื่องอัดไฮโดรลิก



รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.03, 0.05, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการสถานะของแข็ง

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 9×9 ตารางมิลลิเมตร
2. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
3. เครื่องปั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. แก๊สไนโตรเจน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ปากคีบ
8. เตาอบ
9. สารเคมี

9.1 นํายาล้างจาน

9.2 นํ้าปลอດประจุ

9.3 อะซีโตน

9.4 เอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งในกรณีที่ใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

1. ระบบระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศที่ออกแบบและติดตั้งโดย ดร.ชาญวิทย์ จิตรยุทธการ
2. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับที่มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัม
3. เม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ (Sartorius)
5. เมทธานอล
6. อุปกรณ์บดสาร
7. เตาเผาสาร
8. ครูซีเบิล

3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกส์จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติของแข็งและที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยทั้งกรณีที่ใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ(งามนิตย์,2550;Tilley, 2004; วีรัชย์, 2547; Manificier ,1976; Kaelin,2004)

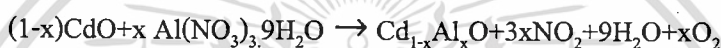
3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.03, 0.05, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติของแข็ง

1. ชั่งสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.03, 0.05, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัมเพื่อใช้สำหรับทำเม็ดเป็นเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.03, 0.05, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้
2. นำผงผลึก $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.03, 0.05, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับมาบดรวมกันในครกอากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. เมื่อบดแล้วนำไปอัดเม็ด โดยจะทำการอัดเม็ดโดยใช้แรง 4 ตัน

4. นำเม็ดของสารที่ได้นำไปเข้าเตาเผาในการเผาจะใช้อุณหภูมิในตอนเริ่ม 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วจึงปิดเตา เมื่อเตายันลงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงนำครุชชีเบิ้ลออกมาจากเตา
5. ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.03, 0.05, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับที่เตรียมได้ทั้งหมดต่อไป

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.03, 0.05, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการสถานะของแข็ง

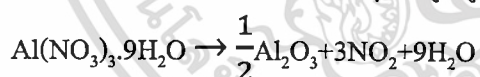
เราจะใช้ CdO รวมตัวกับ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ให้ได้ $CdAlO_2$ จำนวน 1 กรัม มีวิธีในการคำนวณดังนี้ จากสมการ



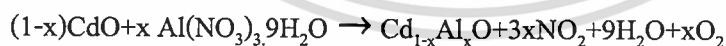
มวลโมเลกุลของ $CdO = 112.41 + 15.9994$
 $= 128.4094$ กรัม ต่อ โมล

มวลโมเลกุลของ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O = 26.9815 + 3(14.0067) + 9(15.9994) + 18(1.0079) + 9(15.9994)$
 $= 375.133$ กรัม ต่อ โมล

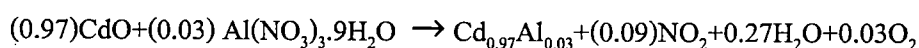
$Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ สามารถสลายตัวได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



การเตรียมสารละลายตั้งต้น $Cd_{1-x}Al_xO$ ได้จากปฏิกิริยาสารละลายเคมีสถานะของแข็งดังนี้



กรณีที่ $x = 0.003$



มวลโมเลกุลของ $Cd_{0.97}Al_{0.03}O = (0.97)(112.41) + (0.03)(26.9815) + 15.9994$
 $= 125.8465$ กรัม ต่อ โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นถ้าเราต้องการ $\text{Cd}_{0.97}\text{Al}_{0.03}\text{O}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้

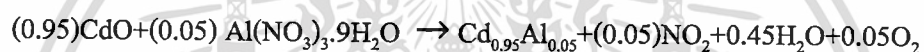
$$\text{CdO} = \frac{(0.97)(128.4094)}{125.8465}$$

$$= 0.9898 \text{ กรัม}$$

$$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} = \frac{(0.03)(375.133)}{125.8465}$$

$$= 0.0894 \text{ กรัม}$$

กรณีที่ $x = 0.005$



มวลโมเลกุลของ $\text{Cd}_{0.95}\text{Al}_{0.05}\text{O} = (0.95)(112.41) + (0.05)(26.9815) + 15.9994$
 $= 124.1379 \text{ กรัม ต่อ โมล}$

ดังนั้นถ้าเราต้องการ $\text{Cd}_{0.95}\text{Al}_{0.05}\text{O}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้

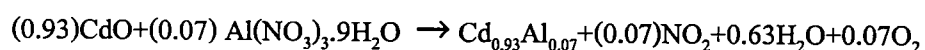
$$\text{CdO} = \frac{(0.95)(128.4094)}{124.1379}$$

$$= 0.9827 \text{ กรัม}$$

$$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} = \frac{(0.05)(375.133)}{124.1379}$$

$$= 0.1511 \text{ กรัม}$$

กรณีที่ $x = 0.007$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ } \text{Cd}_{0.93}\text{Al}_{0.07}\text{O} &= (0.93)(112.41) + (0.07)(26.9815) + 15.9994 \\ &= 122.4294 \text{ กรัม ต่อ โมล} \end{aligned}$$

ดังนั้นถ้าเราต้องการ $\text{Cd}_{0.93}\text{Al}_{0.07}\text{O}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้

$$\text{CdO} = \frac{(0.93)(128.4094)}{122.4294}$$

$$= 0.9754 \text{ กรัม}$$

$$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} = \frac{(0.07)(375.133)}{122.4294}$$

$$= 0.2145 \text{ กรัม}$$

กรณีที่ 0.009



$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ } \text{Cd}_{0.91}\text{Al}_{0.09}\text{O} &= (0.91)(112.41) + (0.09)(26.9815) + 15.9994 \\ &= 119.1019 \text{ กรัม ต่อ โมล} \end{aligned}$$

ดังนั้นถ้าเราต้องการ $\text{Cd}_{0.91}\text{Al}_{0.09}\text{O}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้

$$\text{CdO} = \frac{(0.91)(128.4094)}{119.1019}$$

$$= 0.9811 \text{ กรัม}$$

$$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} = \frac{(0.09)(375.133)}{119.1019}$$

$$= 0.2835 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารตั้งต้นที่มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัมที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกซ์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.03, 0.05, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

| Composition (x) of $Cd_{1-x}Al_xO$ | CdO (g) | $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (g) |
|---------------------------------------|------------|---------------------------------|
| 0 | 1 | 0 |
| 0.03 | 0.9898 | 0.0894 |
| 0.05 | 0.9827 | 0.1511 |
| 0.07 | 0.9754 | 0.1511 |
| 0.09 | 0.9811 | 0.2835 |

3.2.2 ขั้นตอนในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งในกรณีที่ใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกซ์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

3.2.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

- นำแผ่นกระจกสไลด์ขนาด 25×75 ตารางมิลลิเมตร ไปแช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุ
3. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในอะซีโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อนและทำการตัดเป็นแผ่นเล็กขนาด 9×9 ตารางมิลลิเมตร
7. ทำการล้างด้วยน้ำปอดคประจุเป็นเวลา 10 นาที โดยนำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
8. ทำการเป่าแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
9. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้จากในข้อ 8 นำไปอบแห้งที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

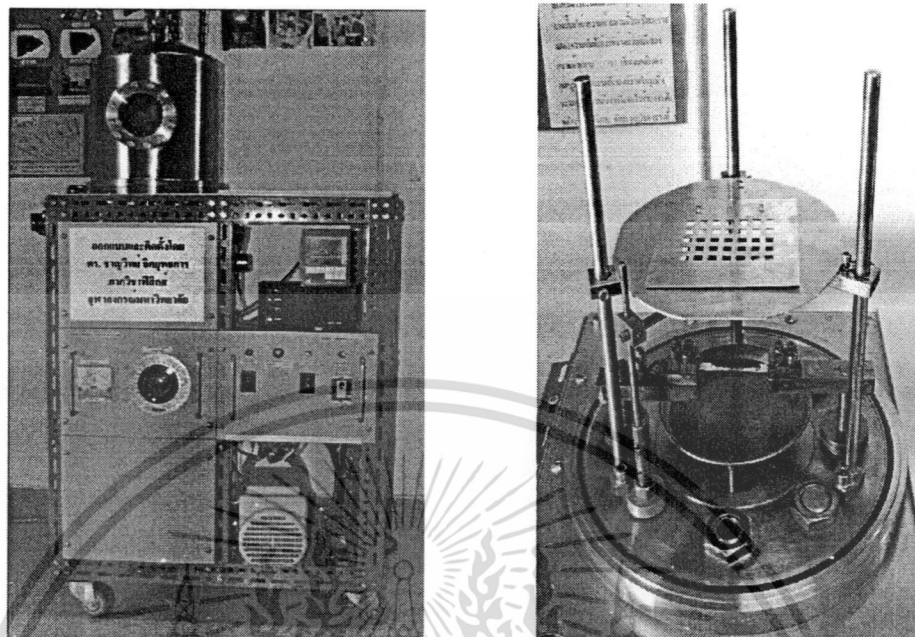
3.2.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งใน กรณีที่ใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกสลับบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

1. ทำความสะอาดระบบระเหยด้วยความร้อนภายในสุญญากาศโดยทำการขจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่นด้วยอะซีโตนและเมทานอล
2. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่างๆ ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศให้ครบถ้วน
3. ชั่งสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ให้ได้น้ำหนักประมาณ 1 กรัม เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นซึ่งถูกนำมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาบรรจุลงบนภาชนะระเหยสาร (boat) ที่ทำด้วยโลหะทังสเตน
4. นำแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ทำเตรียมไว้แล้ว วางลงบนหน้ากาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการหลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (chamber) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ 3×10^{-3} มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบจนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ ใช้ความดันช่วง 5×10^{-3} ถึง 2×10^{-4} มิลลิบาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย(shutter) แล้วเริ่มทำการระเหยสาร โดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับโดยการเปิดสวิทช์ข้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆจนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์ แล้วแช่พักสักประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆจนถึง 100ถึง130 แอมแปร์ จนได้ความหนาประมาณ 500 นาโนเมตร ซึ่งรวมแล้วทั้งหมดจะใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางประมาณ 30 นาที
8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดแผ่นกั้นการระเหยและทำการปิดแวนิแอก
9. ให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วปิดปั๊มเทอร์โบจากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วปิดวาล์วสูบล้ออากาศและปั๊มกลโรตารี
10. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
11. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศนำไปตรวจสอบสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ หลังจากนั้นจึงนำไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น
12. ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับในกรณีที่ใช้สารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศโดยการนำเม็ดเซรามิกส์ที่เตรียมได้ ซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 1 กรัมมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มาเป็นสารตั้งต้นที่ถูกบรรจุใส่ลงในภาชนะระเหยสาร ที่ทำด้วยโลหะทั้งสแตน แล้วจึงทำการเคลือบฟิล์มบางลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ตามขั้นตอนที่ 1-11 ในขั้นตอนต่อไปแต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่ในกรณีนี้ให้ใช้สารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ
13. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทุกกรณีมาทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเมื่อเตาเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา
14. ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ที่มีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่เตรียมได้ทั้งหมดต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับทั้งในกรณีที่ใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารตัวอย่างที่เป็นสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ เมื่อ $x = 0.00, 0.07$ และ 0.09 ตามลำดับ ทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกส์จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติกิริยาสถานะของแข็งและที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยทั้งกรณีที่ใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกและที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (งามนิศย์,2550;Tilley,2004;วีรัชย์,2547;Manificier,1976;Kaelin,2004)

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำสารตัวอย่างที่เป็น เซรามิกส์และ ฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำสารตัวอย่างที่เป็น เซรามิกส์และฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

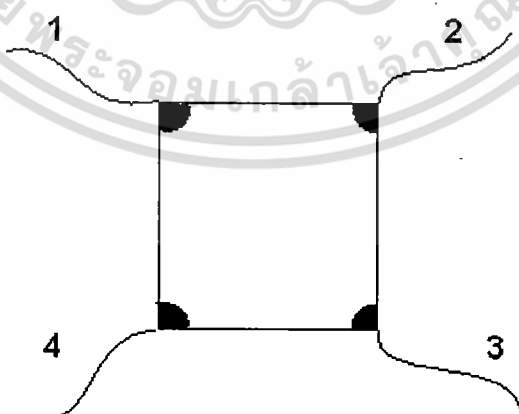
นำสารตัวอย่างที่เป็น เซรามิกส์และฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล-เนียร์อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR spectrophotometer) ของ thermo electron corporation ($\text{He } \lambda \text{ ions } \alpha$) โดยใช้ความยาวคลื่น 300 ถึง 2500 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้า โดยวิธีขั้วความร้อน วัดค่าความต้านทานของฟิล์มบางด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ วัดค่าสภาพคล่องของพาหะและความหนาแน่นของพาหะด้วยการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ วัดค่าพลังงานกระตุ้นโดยการศึกษาค่าความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

3.3.4.1 วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

จากหลักการของวิธีแวนเดอร์เพาว์ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.2 แล้ว เพื่อความสะดวกในการวัดให้ขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 วางอยู่ที่มุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 3.3 แสดงการวางขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบการเริ่มต่อขั้วไฟฟ้าว่าติดเข้ากับสารตัวอย่างดีหรือไม่โดยการวัดความต่างศักย์ด้วยโอมมิเตอร์ จากนั้นจึงเริ่มทำการทดลอง ตามขั้นตอนดังนี้

1. จ่ายกระแสทางขั้ว 1 และออกทางขั้ว 2 โดยแหล่งจ่ายไฟ Keithley 236 ในโหมดของกระแส ทำการวัดความต่างศักย์ V_{42} จะได้ความต่างศักย์เป็นค่าบวก เลือกระแสหลายๆ ค่า เช่น ในช่วง 0.1-10 มิลลิแอมแปร์ แต่ถ้าไม่ได้ความต่างศักย์เป็นค่าบวกให้เปลี่ยนกระแสไหลเข้าที่ขั้วอื่นแทน เช่น เปลี่ยนขั้วไปในทิศตามเข็มนาฬิกา
2. จ่ายกระแส I_{12} แล้ววัดความต่างศักย์ V_{43} ที่สอดคล้องกับกระแส I_{12} แต่ละค่าปรับเปลี่ยนกระแส I_{12} ค่าที่เหมาะสม (เช่น ในช่วง 0.1-10 มิลลิแอมแปร์) จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
3. จ่ายกระแส I_{12} ที่เป็นค่าลบโดยกำหนดที่แหล่งจ่ายไฟ Keithley 236 แล้วทำการวัดความต่างศักย์ V_{43} ที่เป็นค่าลบ ปรับเปลี่ยนกระแส I_{12} จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
4. ทำการเขียนกราฟระหว่าง I_{12} กับ V_{43} โดยให้แกน y เป็น I_{12} ส่วนแกน x เป็น V_{43} ความชันของกราฟคือค่า $1/R_1$
5. จ่ายกระแส I_{23} ค่าต่างๆ แล้วทำการวัดความต่างศักย์ V_{14} ที่สอดคล้องกับกระแส I_{23} แต่ละค่าปรับเปลี่ยนกระแส I_{23} จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
6. จ่ายกระแส I_{23} ค่าลบจากแหล่งจ่ายไฟ Keithley 236 แล้วทำการวัดความต่างศักย์ V_{14} ที่มีค่าเป็นลบ ปรับเปลี่ยนค่ากระแส I_{23} จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
7. เขียนกราฟระหว่าง I_{23} กับ V_{14} โดยให้แกน y เป็น I_{23} และแกน x เป็น V_{14} ความชันของกราฟ คือ $1/R_2$
8. นำเอาค่า R_1 และ R_2 มาคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น (R_s) จากสูตร

$$R_{sh} = f\left(\frac{\pi}{\ln 2}\right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right)$$

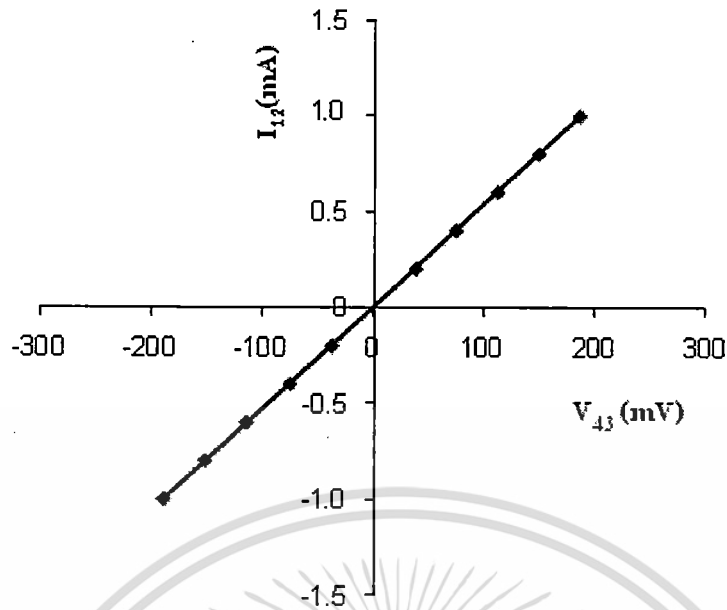
$$\text{เมื่อ } f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2}\right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2}\right)^2$$

ส่วนสภาพต้านทานไฟฟ้า คำนวณได้จากสูตร

$$\rho = R_{sh}d$$

เมื่อ d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง (หน่วยเป็น เซนติเมตร)

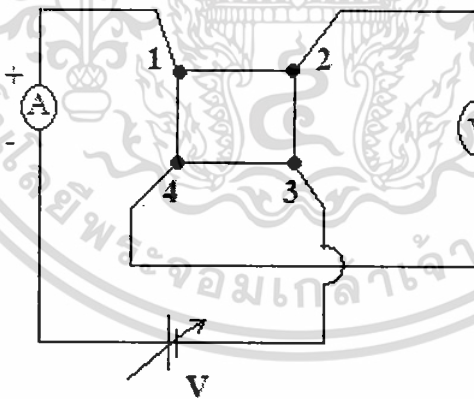
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{12} กับ V_{43}

3.3.4.2 วิธีวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

จากปรากฏการณ์ของฮอลล์โดยวิธีแวนเดอเพาว์ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.7.2 ทำการจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดรูปร่างข้างต้นแล้วจึงเริ่มทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

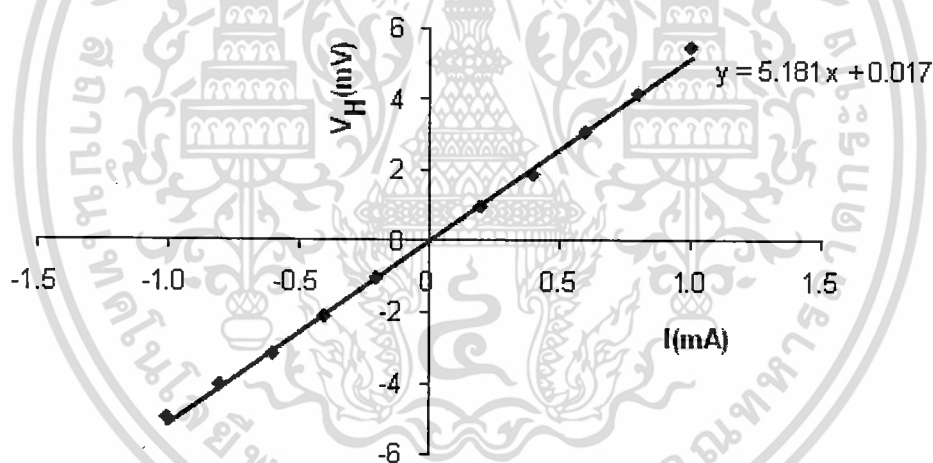


รูปที่ 3.5 แสดงวิธีการต่อวงจรวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์

1. ขณะยังไม่มีสนามแม่เหล็ก ($B=0$) และสารกึ่งตัวนำมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type) จะกำหนดให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าทางขั้ว 1 และไหลออกทางขั้ว 3 ทำการวัดความต่างศักย์ V_{24} ให้ได้เครื่องหมายเป็นบวกแต่ถ้าไม่ได้เครื่องหมายเป็นบวกต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน เช่น เปลี่ยนขั้วไปในทิศตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำสารตัวอย่างไปวางในสนามแม่เหล็ก B ความต่างศักย์ V_{24} ควรมีค่าเพิ่มขึ้นที่กระแสค่าเดิมในที่นี้จะเรียกว่า V'_{24} เนื่องจากมีผลของความต่างศักย์ฮอลล์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย แต่ถ้า V'_{24} มีค่าลดลงแสดงว่าสารกึ่งตัวนำเป็น ชนิดพี (p-type) ดังนั้นต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้ว 3 และไหลออกทางขั้ว 1 แล้ว V'_{24} ยังมีเครื่องหมายเป็น บวกเหมือนเดิม
3. จ่ายกระแส I ค่าต่างๆ แล้วทำการวัดความต่างศักย์ V'_{24} ที่สอดคล้องกับกระแส I แต่ละค่า ปรับเปลี่ยนกระแส I ค่าที่เหมาะสม (เช่น ในช่วง 0.1-10 มิลลิแอมแปร์) จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
4. จ่ายกระแส I ค่าลบโดยกำหนดที่แหล่งจ่ายไฟ Keithley 236 แล้วทำการวัดความต่างศักย์ V'_{24} ที่เป็นค่าลบปรับเปลี่ยนกระแส I อย่างน้อย 10 ค่า
5. ความต่างศักย์ $V'_{24} = V_H + V_{24}$ ดังนั้น ความต่างศักย์ฮอลล์ $V_H = V'_{24} - V_{24}$
6. เขียนกราฟระหว่าง I กับ V_H โดยให้แกน y เป็น V_H และแกน x เป็น I ความชันของกราฟคือ $R_H \left(\frac{B}{d}\right)$ เมื่อ B คือสนามแม่เหล็กและมีค่าเท่ากับ 1925 เกาส์ คือ ความหนาของสารตัวอย่างมีหน่วยเป็น เซนติเมตร



รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

7. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ R_H จากสูตร

$$R_H = 10^8 \left(\frac{V_H}{I}\right) \left(\frac{d}{B}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\frac{V_H}{I}$ คือ ความชันที่ได้จากกราฟ I กับ V_H , R_H มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อ
 คูมบ์, I มีหน่วยเป็น A , V_H มีหน่วยเป็น V, d มีหน่วยเป็น เซนติเมตร และ B มี
 หน่วย เป็น เกาส์

8. ความหนาแน่นของพาหะ (n) คำนวณได้จาก

$$n = \frac{1}{qR_H}$$

สภาพคล่องของพาหะ (μ_H) คือ

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho}$$

และระยะทางเฉลี่ยปลอดการชน (mean free part, l) คือ

$$l = \left(\frac{\hbar}{2e}\right) \left(\frac{3n}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \mu_H$$

เมื่อ \hbar คือ $\frac{h}{2\pi} = \frac{6.625 \times 10^{-34}}{2\pi}$ จูล-วินาที

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

สำหรับโครงการวิจัยนี้ได้มีการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ CdO ที่เจือด้วย Al ปริมาณ 0, 3, 5, 7 และ 9 เปอร์เซ็นต์โดยโมล โดยในขั้นแรกได้ทำการศึกษาในรูปแบบของการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เพื่อหาสภาพความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสารที่ดีที่สุดแล้วศึกษาจากการเตรียมเซรามิกส์โดยการอัดให้เป็นเม็ดด้วยแรง 4 ตันและผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเพื่อทราบคุณสมบัติพื้นฐานว่าในแต่ละปริมาณการเจือที่ปริมาณการเจือเท่าใดให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่ากันแล้วจึงนำมาทำการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยทำการเปรียบเทียบกับสารที่มีการเจือสูงสุดและต่ำสุดโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

4.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติรายละเอียดของแข็ง

4.1.1 เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติรายละเอียดของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกซึ่งมีวิธีการเตรียมดังนี้

4.1.1.1 นำสารตั้งต้นมาชั่งในอัตราส่วนที่ได้คำนวณไว้ในบทที่ 3 แล้วทำการบดรวมกันโดยครกอาเกตเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

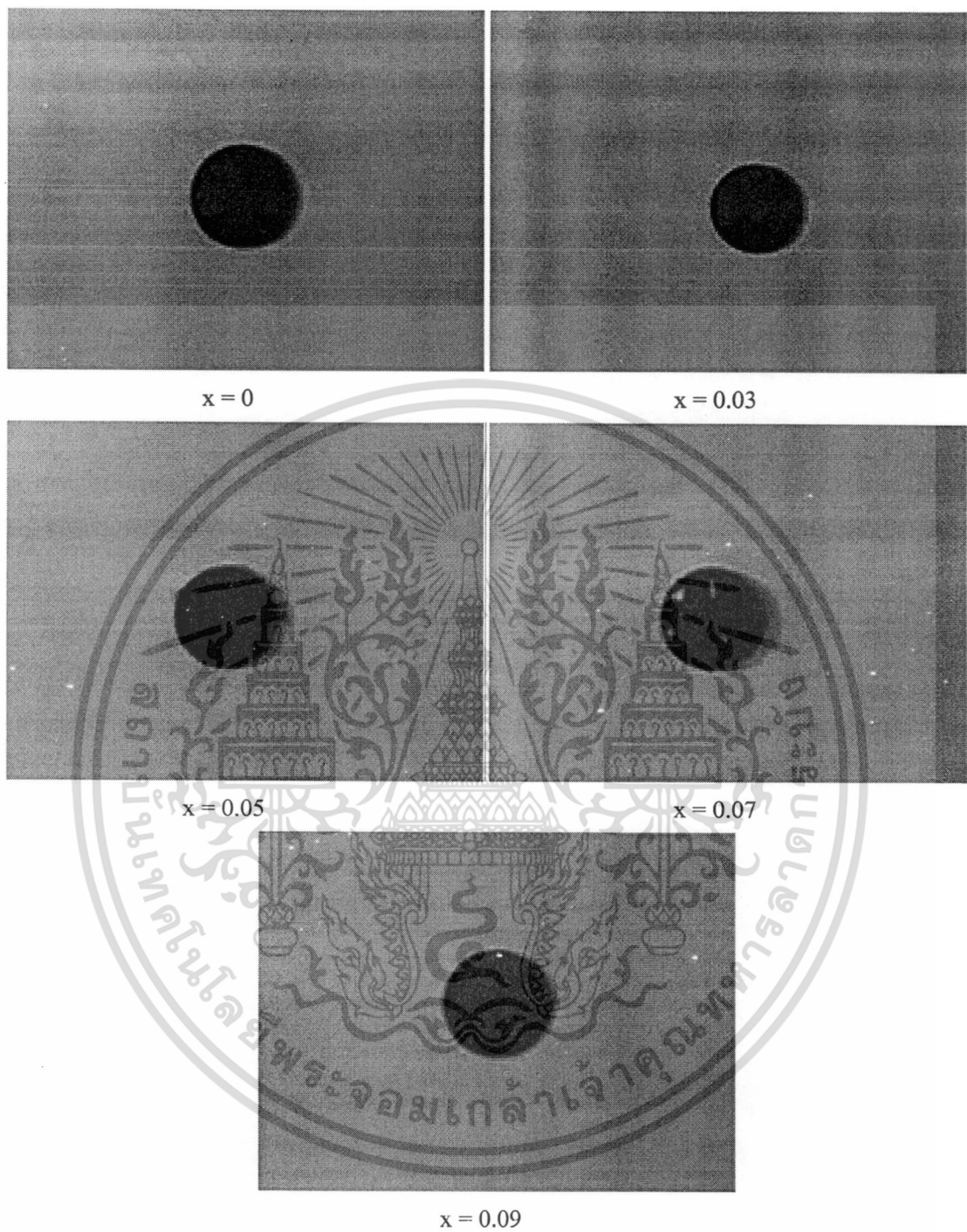
4.1.1.2 นำสารตั้งต้นที่บดรวมกันแล้วนำไปเผาภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้สารระเหยความชื้นออก

4.1.1.3 เมื่อทำการระเหยความชื้นด้วยการเผาเสร็จนำสารดังกล่าวมาแบ่งเป็น 3 ส่วนเท่าๆกันแล้วนำไปทำการอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกด้วยแรงอัด 4 ตัน โดยทำการขึ้นรูปด้วยโมลซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

4.1.1.4 นำเอาสารซึ่งทำการอัดเม็ดแล้วมาทำการเผาภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิเป็น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เป็นการค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิเพื่อป้องกันการแตกของเม็ดสารเซรามิกส์ $CdO:Al$ ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยา

สถานะของแข็งจากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกขณะยังไม่มีการเผาจะเป็นสีดำด้านเมื่อผ่านการเผาภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงสารกึ่งตัวนำ $CdO:Al$ จะมีความมันวาวมากขึ้นตามลำดับเล็กน้อยดังรูปที่ 4.1

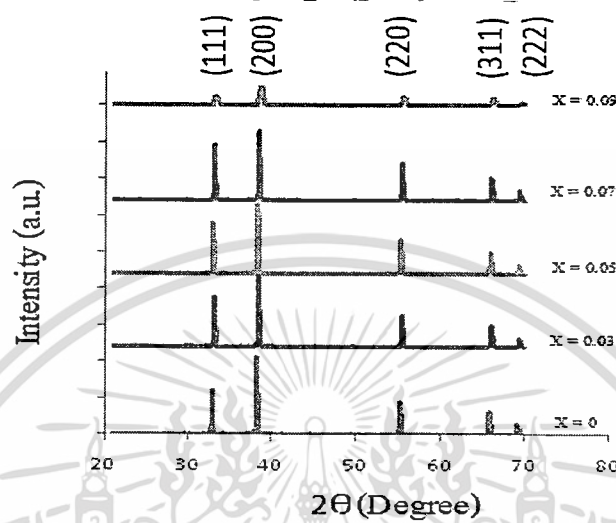
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกส์ของสาร $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารว่าเป็นชนิดใดและมีโครงสร้างแบบใด

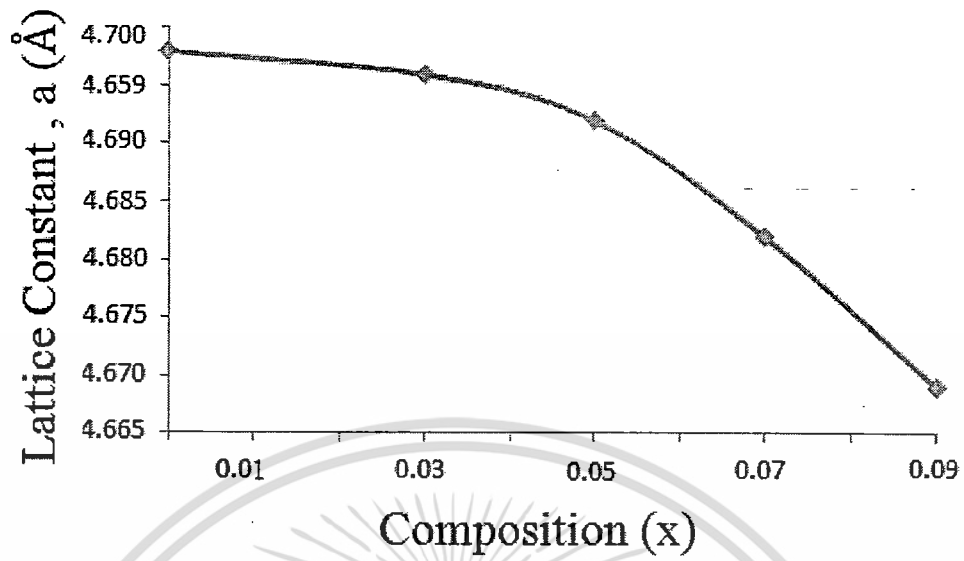


รูปที่ 4.2 พิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงผลึกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติวิธานะของแข็ง

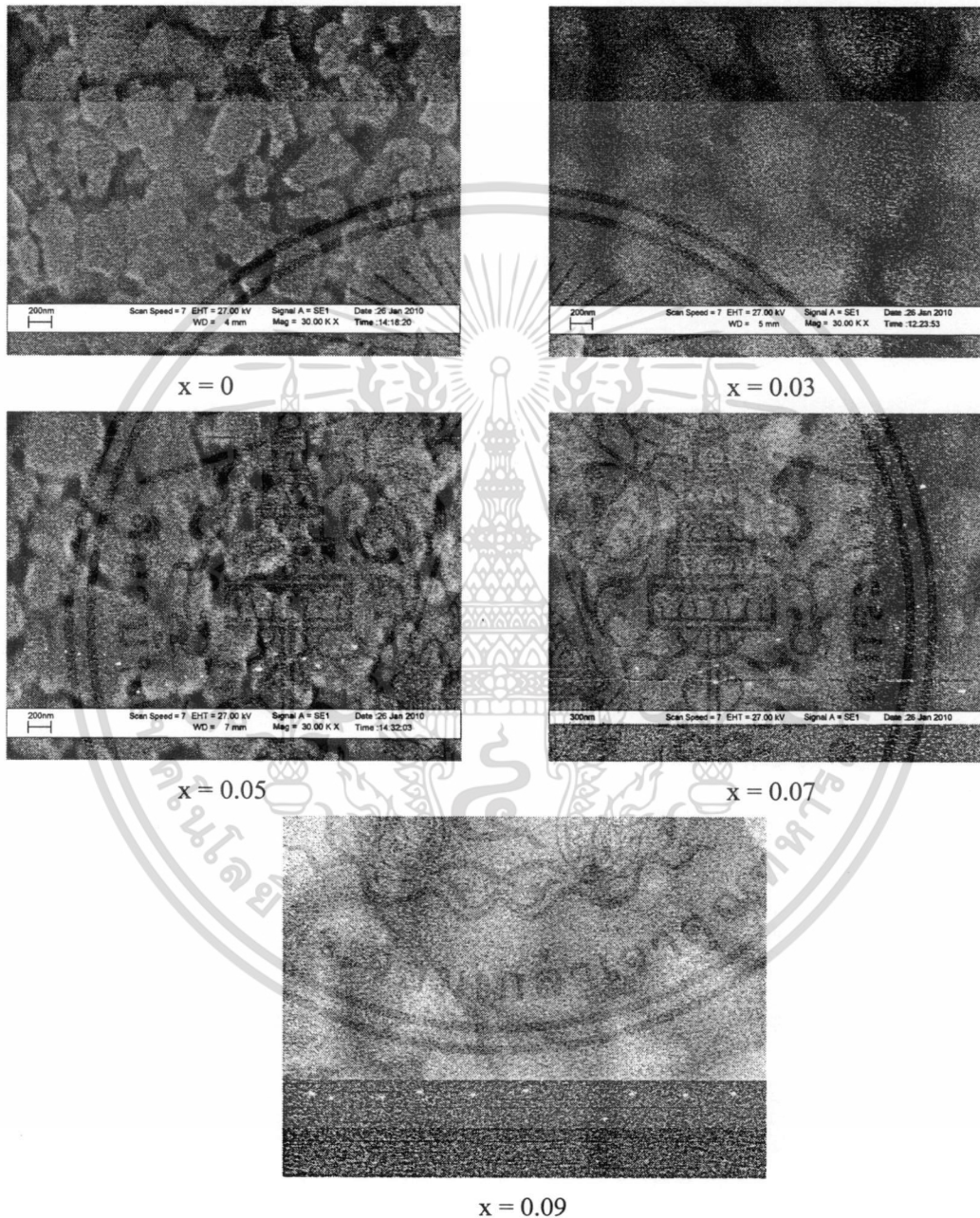
| Composition (x) of $Cd_{1-x}Al_xO$ | Lattice Constant, a (Å) | Grain Size (nm) | |
|---------------------------------------|----------------------------|-----------------|----------|
| | | From XRD | From SEM |
| 0 | 4.698 | 575 | 500 |
| 0.03 | 4.696 | 1,016 | 800 |
| 0.05 | 4.692 | 566 | 600 |
| 0.07 | 4.682 | 550 | 500 |
| 0.09 | 4.669 | 177 | 200 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึก a เมื่อเทียบกับปริมาณของอะตอมสารเจือ Al ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการสถานะของแข็ง

4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซรามิกส์ของสาร $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

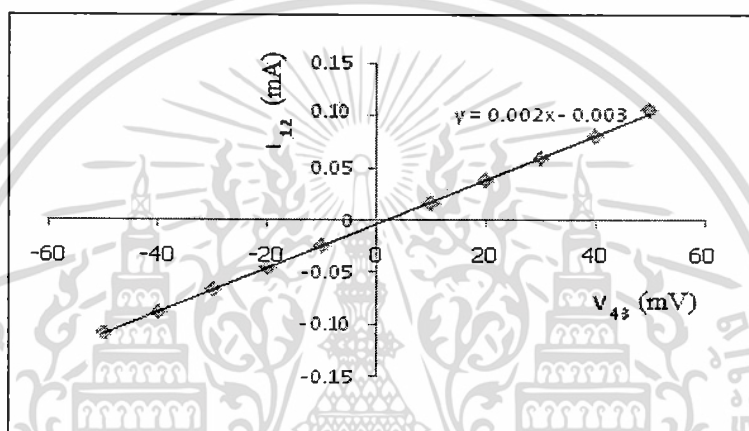


รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

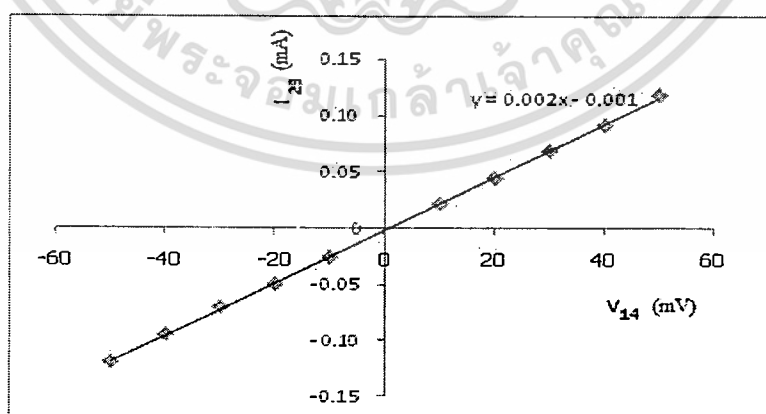
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ของสาร $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) อันได้แก่ สภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถวัดได้ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ที่อุณหภูมิห้องและจากปรากฏการณ์ฮอลล์ จะทำให้คำนวณค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสภาพคล่องฮอลล์ดังแสดงไว้ในตาราง 4.2

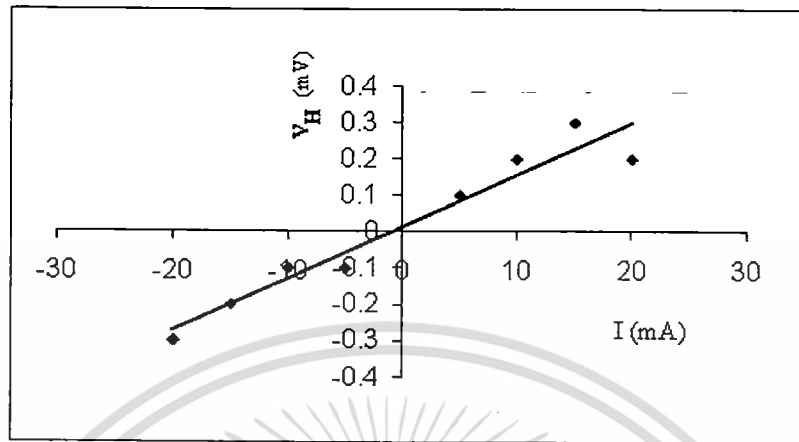


รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I_{12}) กับศักย์ไฟฟ้า (V_{43}) ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($x = 0.03$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I_{23}) กับศักย์ไฟฟ้า (V_{14}) ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($x = 0.03$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง



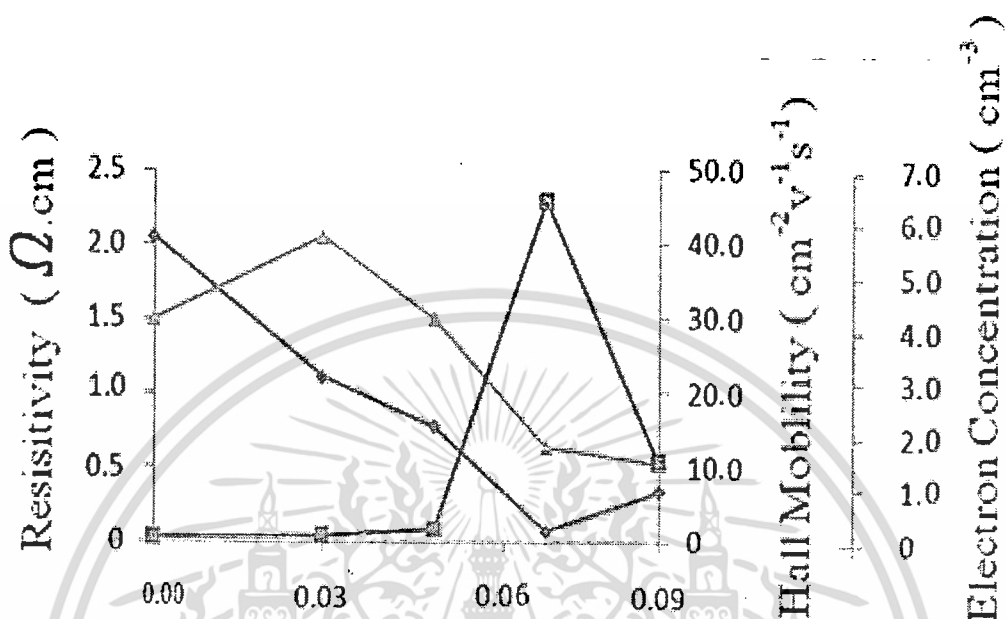
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($x = 0.03$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

ตารางที่ 4.2 ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่นของโฮลและสภาพคล่องของพาหะของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

| Composition (x) of $Cd_{1-x}Al_xO$ | Resistivity ($10^2 \Omega \cdot \text{cm}$) | Hall Coefficient (cm^3/C) | Electron Concentration (10^{18}cm^{-3}) | Hall Mobility ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$) |
|--|--|---|--|---|
| 0 | 2.05 | 1.31 | 4.77 | 0.64 |
| 0.03 | 1.11 | 0.96 | 6.51 | 0.86 |
| 0.05 | 0.78 | 1.29 | 4.84 | 1.66 |
| 0.07 | 0.07 | 3.05 | 2.05 | 45.8 |
| 0.09 | 0.34 | 3.62 | 1.73 | 10.77 |

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าปริมาณการเจือ Al ที่เพิ่มขึ้น จะแสดงให้เห็นว่าค่าสภาพคล่องของพาหะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนถึง ปริมาณการเจือ ที่ 0.07 และลดลงที่ปริมาณการเจือที่ 0.09 ค่าความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงการเจือที่ 0.03 และค่อยๆมีค่าลดลง ส่วนค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆจนถึงการเจือที่ 0.07 และก็จะกลับมาเพิ่มขึ้นตามลำดับที่ปริมาณการเจือที่มากขึ้น



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง สภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของพาหะของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($0 \leq x \leq 0.09$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

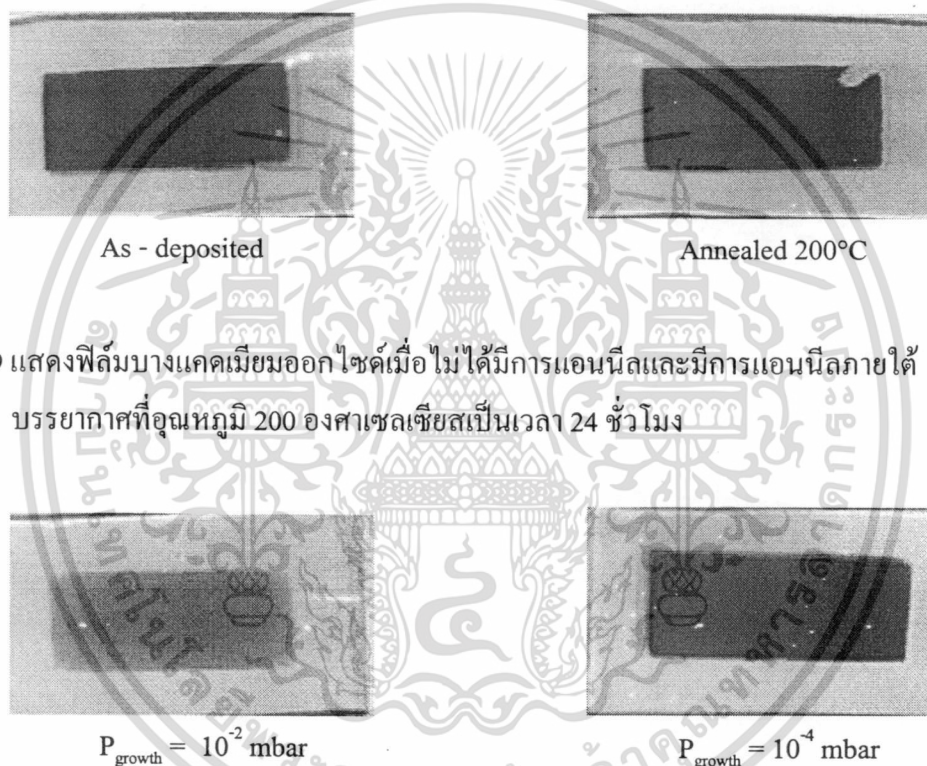
จากการทดลอง เราจะเลือกสัดส่วนผสมทางเคมีที่ดีที่สุดนั้นเราจะพิจารณาจาก สภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของพาหะ โดยจากผลการทดลอง CdO เจือด้วย Al ที่ ปริมาณ 0.07 มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด เราจึงเลือกสัดส่วนผสมทางเคมีนี้มาใช้ในการทดลองโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศในขั้นตอนต่อไป

4.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง CdO โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ได้ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง CdO และ CdO:Al โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนีส และแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาที่ความดันบรรยากาศบรรยากาศ 10^{-4} และ 10^{-2} มิลลิบาร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ลักษณะของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Al_xO$ โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์และแคดเมียมออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ในขั้นแรกเราได้ทดลองที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} และ 10^{-2} มิลลิบาร์ จากนั้นจึงนำไปแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.9 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.10 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่เตรียมได้ภายใต้ความดัน 10^{-2} และ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

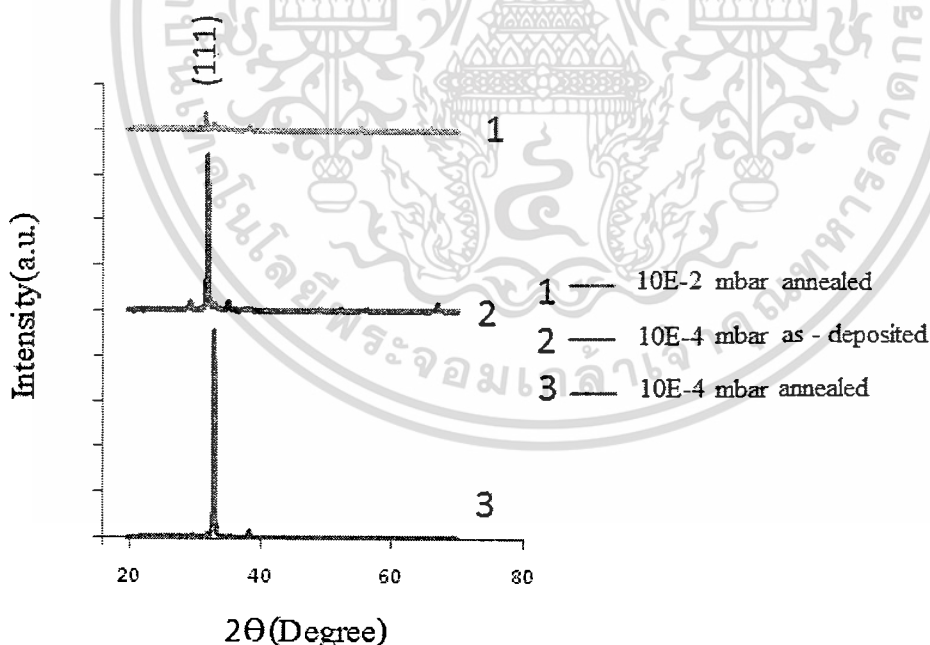
จากขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางที่ผ่านมาผลออกมาแสดงให้เห็นว่า การเตรียมฟิล์มบางที่ความดัน 10^{-4} มิลลิบาร์และผ่านการแอนนัล ให้คุณภาพฟิล์มที่ดีที่สุดดังนั้นเราจึงนำขั้นตอนนี้ไปเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมที่มีอัตราการเจือ 0.07 มาทำการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและได้ทำการเจือที่ 0.09 และแคดเมียมออกไซด์ที่ไม่ได้เจืออลูมิเนียม เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบ ซึ่งในอัตราการเจือทั้งสามเราได้ทดลองทั้งหมด 2 วิธีคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเหยจากสารที่ผ่านการทำเป็นเม็ดเซรามิกส์มาแล้วนำมาบดกับสารตั้งต้น กับ สารตั้งต้นที่บดผสมกันปกติโดยเราได้ผลงานออกมา 9 ชุด

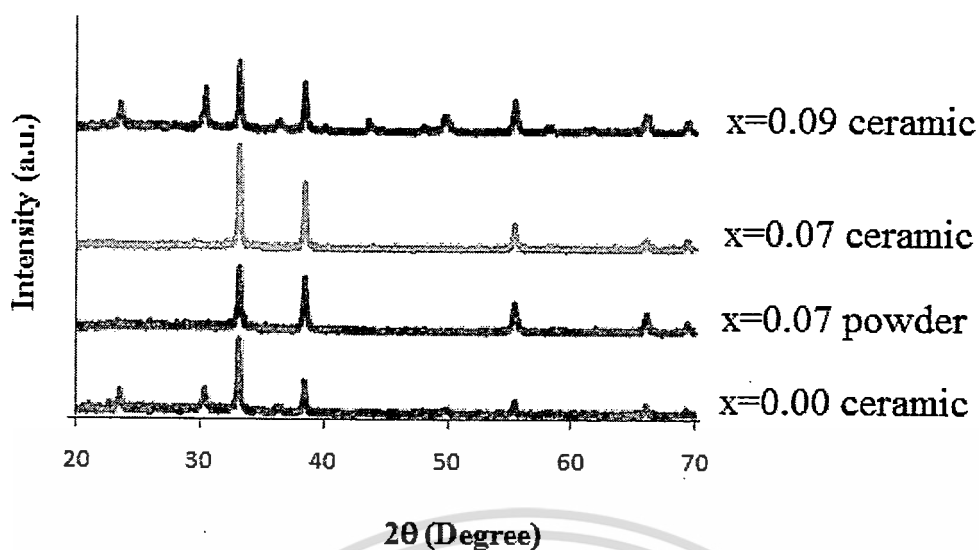
4.2.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Al_xO$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เนื่องจากพวกเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาลักษณะของฟิสิกที่ปรากฏขึ้นและนำไปเปรียบเทียบกับพิกมาตรฐานเพื่อพิจารณาว่าฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ที่เตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบใดโดยพิจารณารูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-2} และ 10^{-4} มิลลิบาร์ โดยผ่านการแอนนีสและไม่ผ่านการแอนนีสปรากฏว่าฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ทำให้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์และผ่านการแอนนีสมีความเป็นผลึกที่ดีที่สุดสังเกตได้จากลักษณะของฟิสิกมีความคมชัดโดยโครงสร้างผลึกที่สังเกตได้จะมีระนาบเด่นชัดที่ (111) ซึ่งทำให้เข้าใจได้ว่าฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ระเหยในระบบสุญญากาศมีเฟสเป็นแบบเฟสเซนเตอร์ คิวบิก



รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-2} และ 10^{-4} มิลลิบาร์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0$, $x = 0.07$ และ $x = 0.09$ จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์และจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกภายใต้ความดัน 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

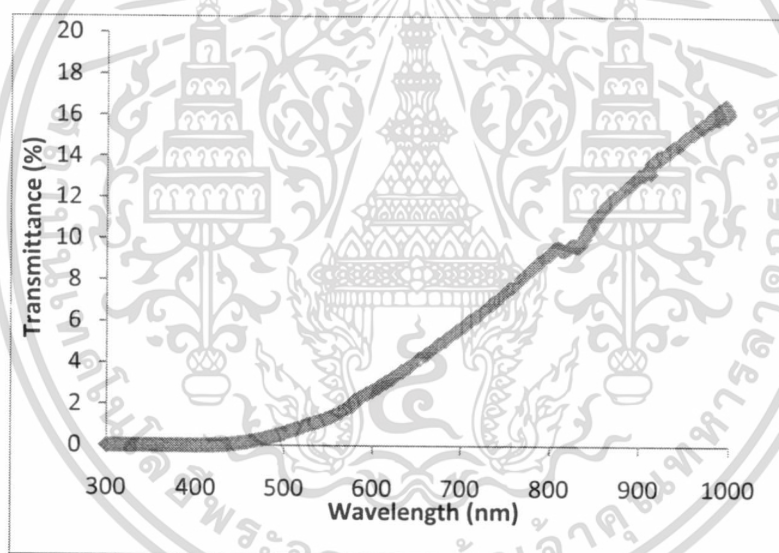
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

| Composition (x) of $Cd_{1-x}Al_xO$ | Growth Pressure (mbar) | Type of Precursor | Annealing Temperature ($^{\circ}C$) | Lattice Constant ($^{\circ}A$) | Grain Size (nm) |
|------------------------------------|------------------------|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| 0 | 10^{-4} | powder | - | 4.823 | 37 |
| 0 | 10^{-4} | powder | 200 | 4.676 | 37 |
| 0 | 10^{-2} | powder | 200 | 4.867 | 180 |
| 0 | 10^{-4} | ceramic | 200 | 4.684 | 44 |
| 0.07 | 10^{-4} | ceramic | 200 | 4.681 | 42 |
| 0.09 | 10^{-4} | ceramic | 200 | 4.680 | 39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

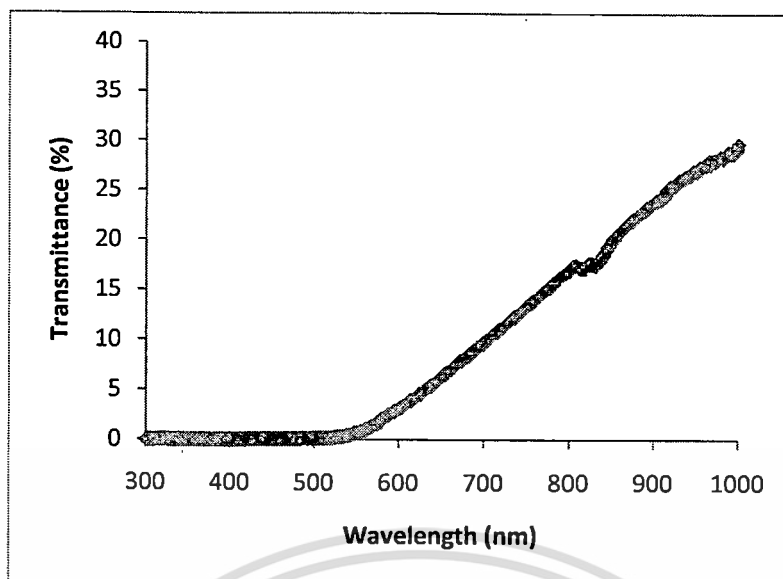
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

การศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศที่ต่างกัน และกรณีที่ผ่านมาการแอนนัลเลไม่ผ่านการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถตรวจสอบด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิลในช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตร พบว่า ทั้ง 3 ตัวอย่างจะเริ่มมีการส่งผ่านได้ดีใกล้เคียงกันในช่วง 400 นาโนเมตร ในขั้นตอนต่อมา นำข้อมูล มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของฟิล์มบางแล้วนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง ($\alpha h\nu$)² กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 และ 4.25 พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบางที่เตรียมได้เป็นแบบตรงและขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) สามารถหาได้จากการประมาณค่าโดยลากส่วนต่อจากบริเวณที่เป็นเชิงเส้น ไปตัดแกนของพลังงานโฟตอนจุดตัดที่ได้คือค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ได้ดังตารางที่ 4.4

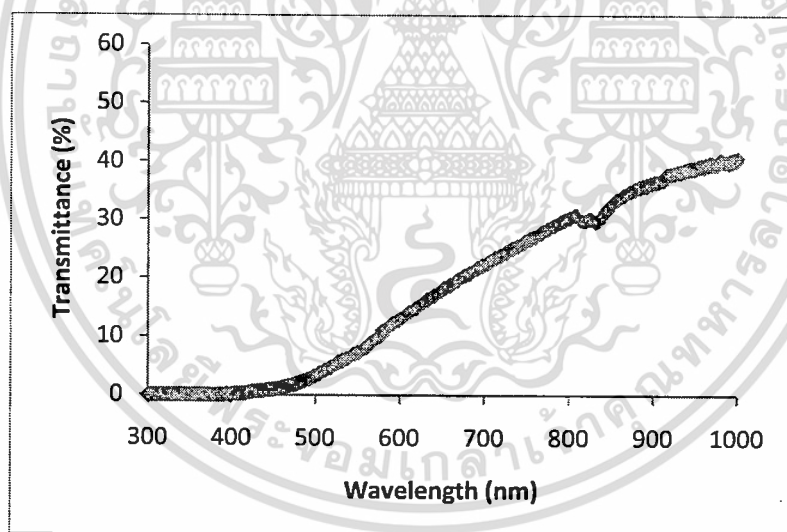


รูปที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

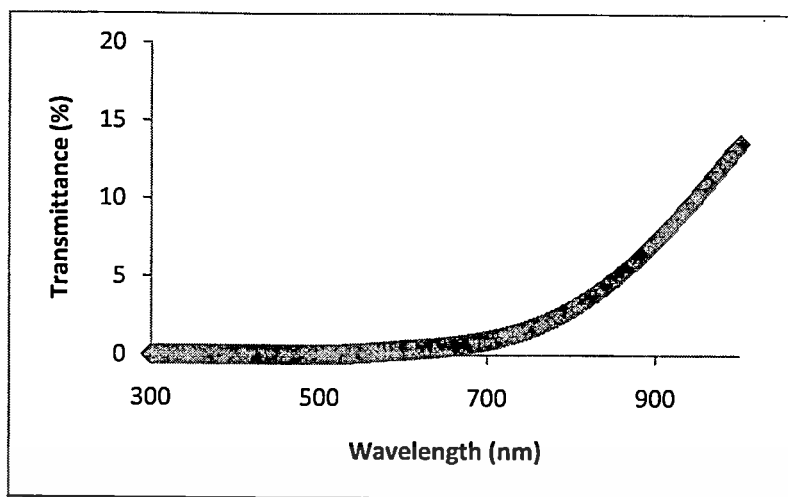


รูปที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนียลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

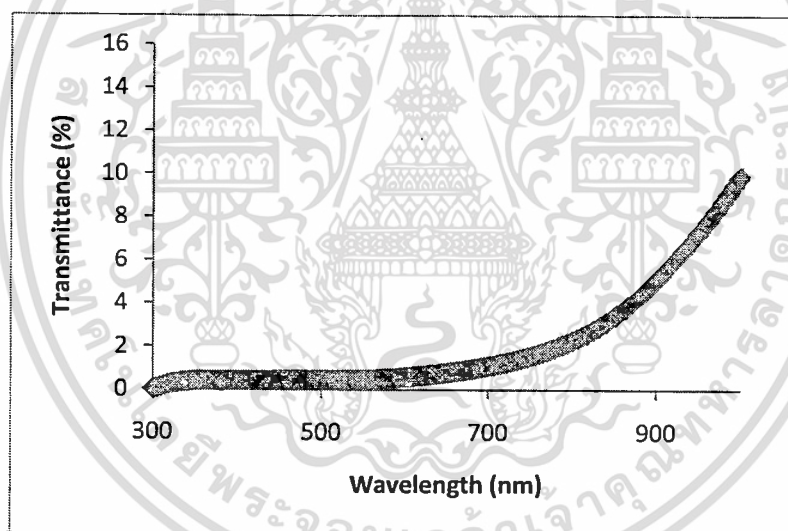


รูปที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-2} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนียลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

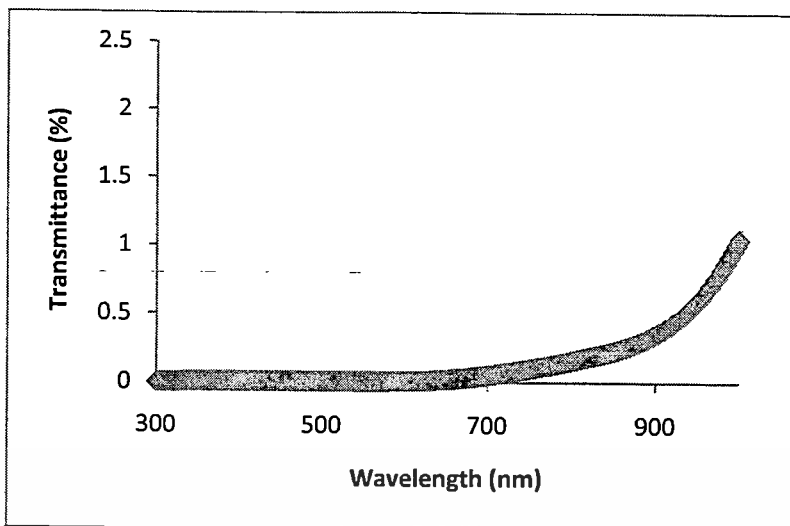


รูปที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

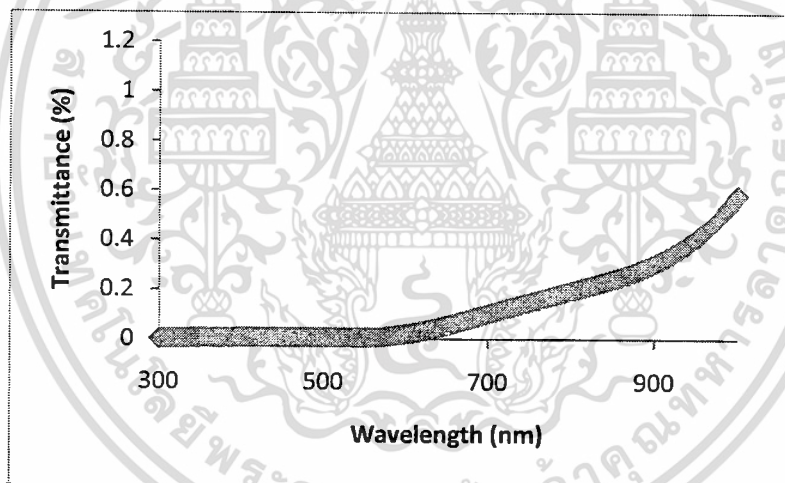


รูปที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่น ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0.07$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

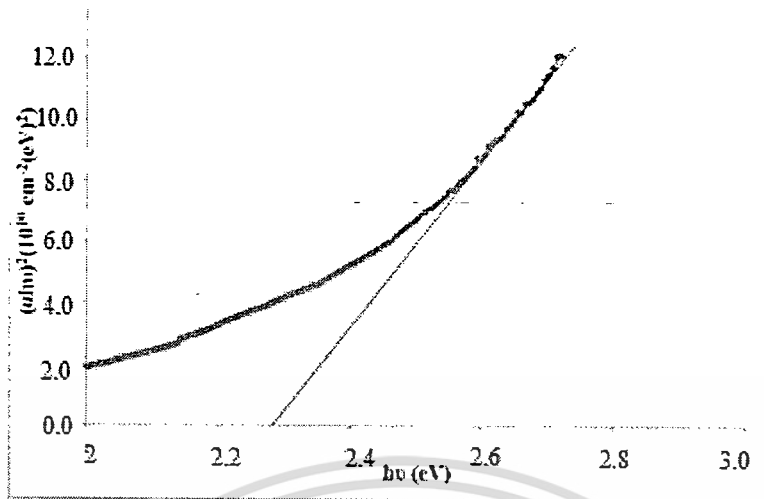


รูปที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0.07$ จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

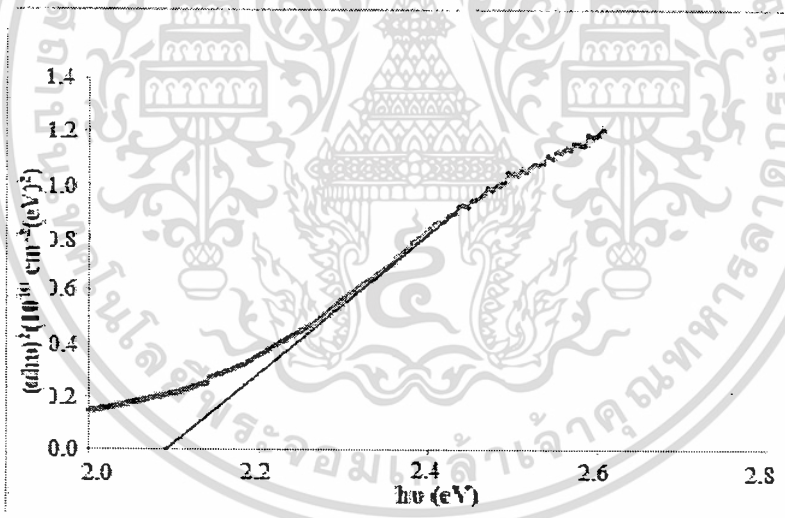


รูปที่ 4.19 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0.09$ จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

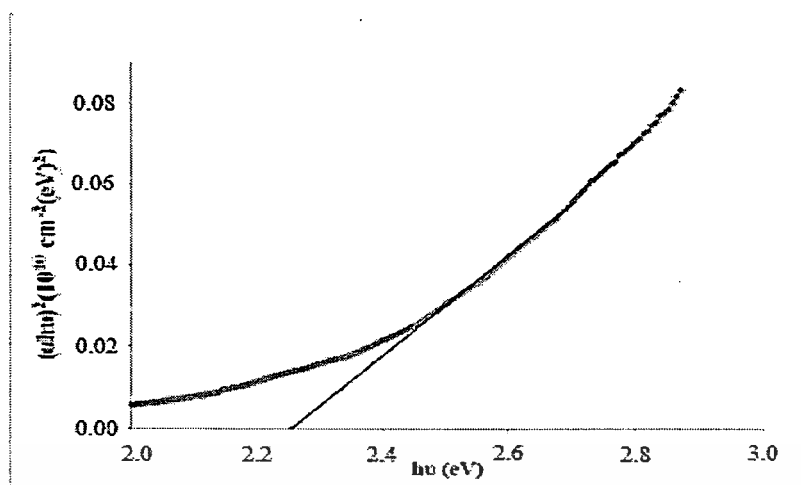


รูปที่ 4.20 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อไม่มีการแอนนีสล

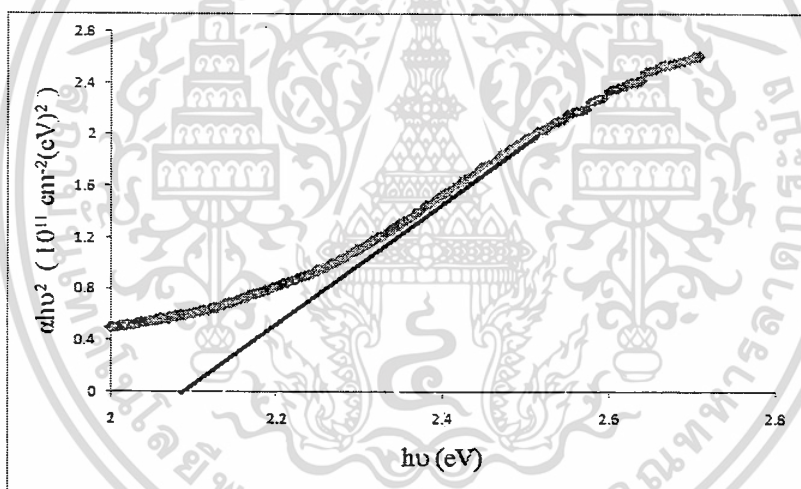


รูปที่ 4.21 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนีสลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

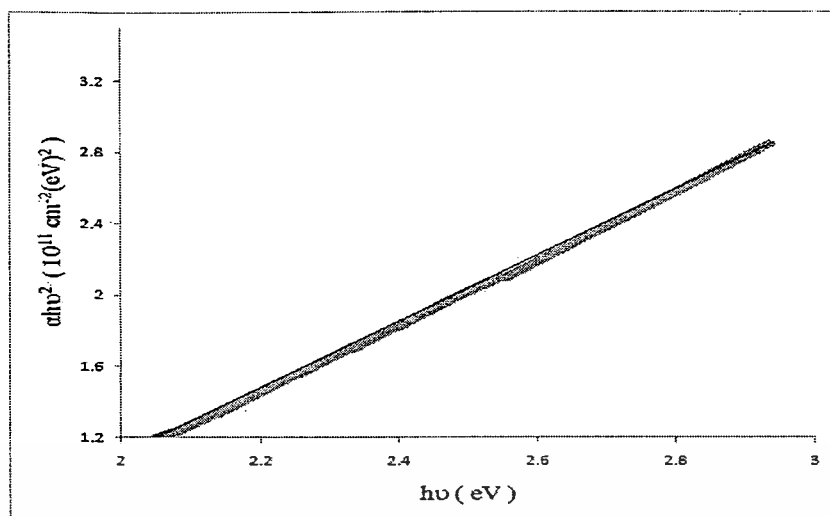


รูปที่ 4.22 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์ เมื่อไม่มีการแอนนีสล

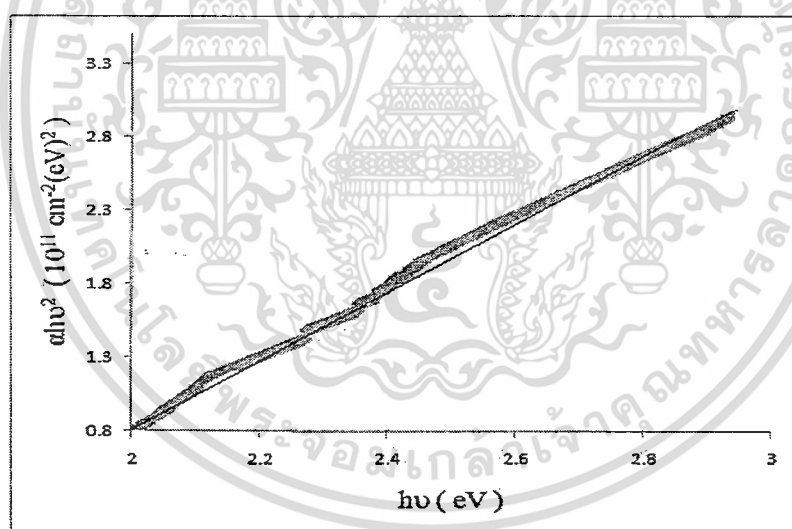


รูปที่ 4.23 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงาน โฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนีสล ภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิตั้งที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง ($\alpha h\nu$)² กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0.07$ จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

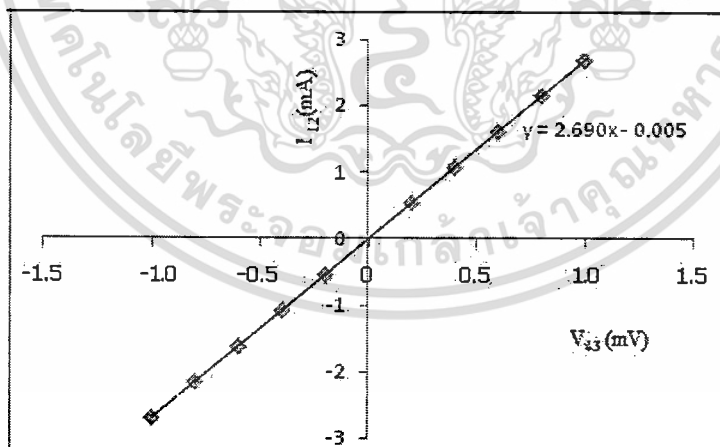


รูปที่ 4.25 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง ($\alpha h\nu$)² กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0.09$ จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกส์ภายใต้ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ภายใต้ความดันบรรยากาศที่ 10^{-4} และ 10^{-2} มิลลิบาร์ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิตั้งที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

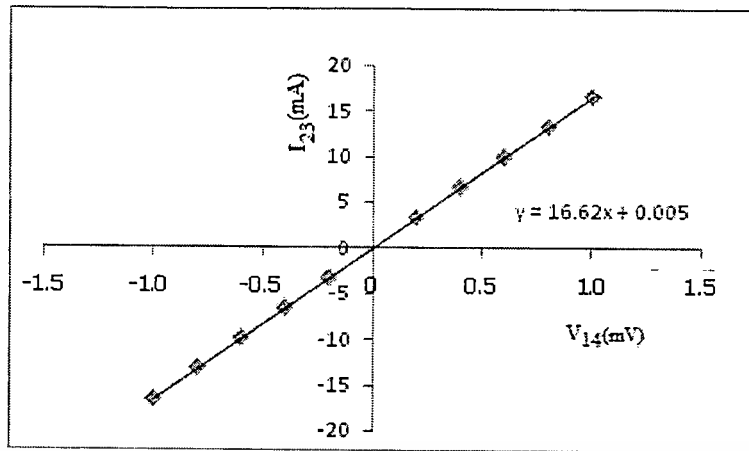
| Composition (x) of $Cd_{1-x}Al_xO$ | Growth Pressure (mbar) | Type of Precursor | Annealing Temperature ($^{\circ}C$) | E_g (eV) |
|------------------------------------|------------------------|-------------------|---------------------------------------|------------|
| 0 | 10^{-4} | powder | - | 2.80 |
| 0 | 10^{-4} | powder | 200 | 2.10 |
| 0 | 10^{-2} | powder | 200 | 2.24 |
| 0 | 10^{-4} | ceramic | 200 | 2.10 |
| 0.07 | 10^{-4} | ceramic | 200 | 2.05 |
| 0.09 | 10^{-4} | ceramic | 200 | 2.00 |

4.2.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันบรรยากาศที่ 10^{-4} และ 10^{-2} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิตั้งที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

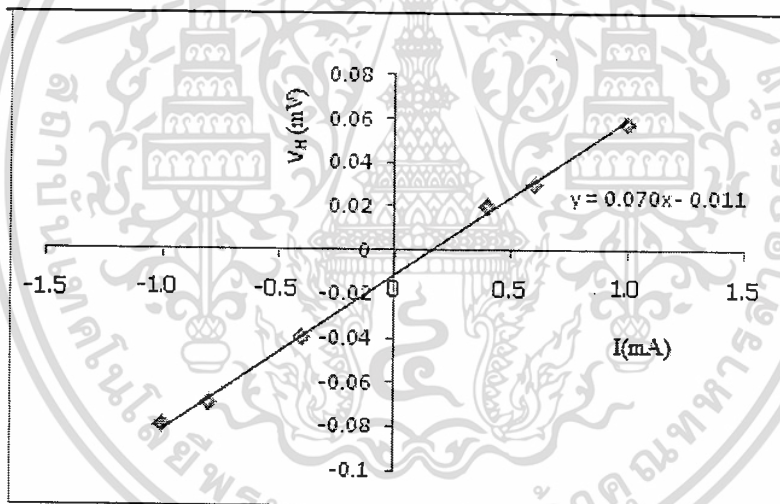


รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I_{12}) กับศักย์ไฟฟ้า (V_{43}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($x = 0.07$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันบรรยากาศที่ 10^{-4} เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิตั้งที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I_{23}) กับศักย์ไฟฟ้า (V_{14}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($x = 0.07$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันบรรยากาศที่ 10^{-4} เมื่อมีการแอนนีกภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Al_xO$ ($x = 0.07$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันบรรยากาศที่ 10^{-4} เมื่อมีการแอนนีกภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

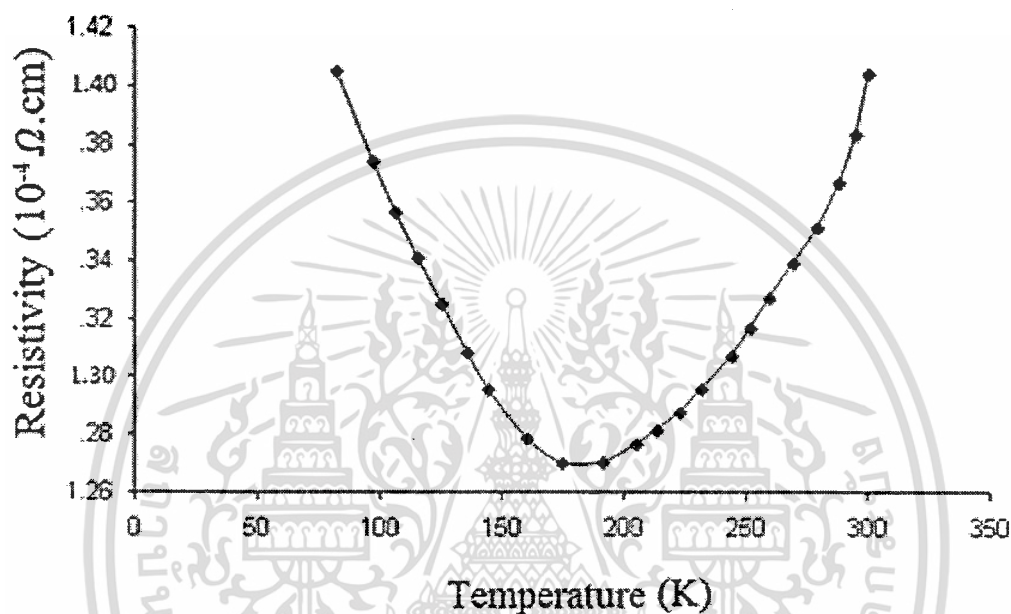
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Composition (x) of Cd _{1-x} Al _x O | Growth Pressure* (mbar) | Type of Precursor | Resistivity (Ω .cm) | Hall Coefficient (cm ³ /C) | Electron Concentration (cm ⁻³) | Hall Mobility (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹) |
|--|-------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|--|
| 0 | 4x10 ⁻⁴ | powder | 9.86x10 ⁻³ | 0.468 | 2.93x10 ¹⁸ | 47.46 |
| 0 | 4x10 ⁻² | powder | 1.392x10 ⁻³ | 0.419 | 12.62x10 ¹⁸ | 123.60 |
| 0 | 4x10 ⁻⁴ | ceramic | 2.38x10 ⁻³ | 0.036 | 1.04x10 ²⁰ | 15.13 |
| 0.07 | 4x10 ⁻⁴ | ceramic | 1.80x10 ⁻³ | 0.038 | 1.64x10 ²⁰ | 21.11 |
| 0.07 | 4x10 ⁻⁴ | powder | 6.65x10 ⁻³ | 0.088 | 7.10x10 ¹⁹ | 13.23 |
| 0.09 | 4x10 ⁻⁴ | ceramic | 3.62x10 ⁻³ | 0.153 | 4.08x10 ¹⁹ | 42.27 |
| 0.09 | 4x10 ⁻⁴ | Powder | - | - | - | - |

ตารางที่ 4.5 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของโพลและสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ 10⁻⁴ และ 10⁻² มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง การแอนนิลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

*หมายเหตุ เป็นความดันขณะระเหยสาร

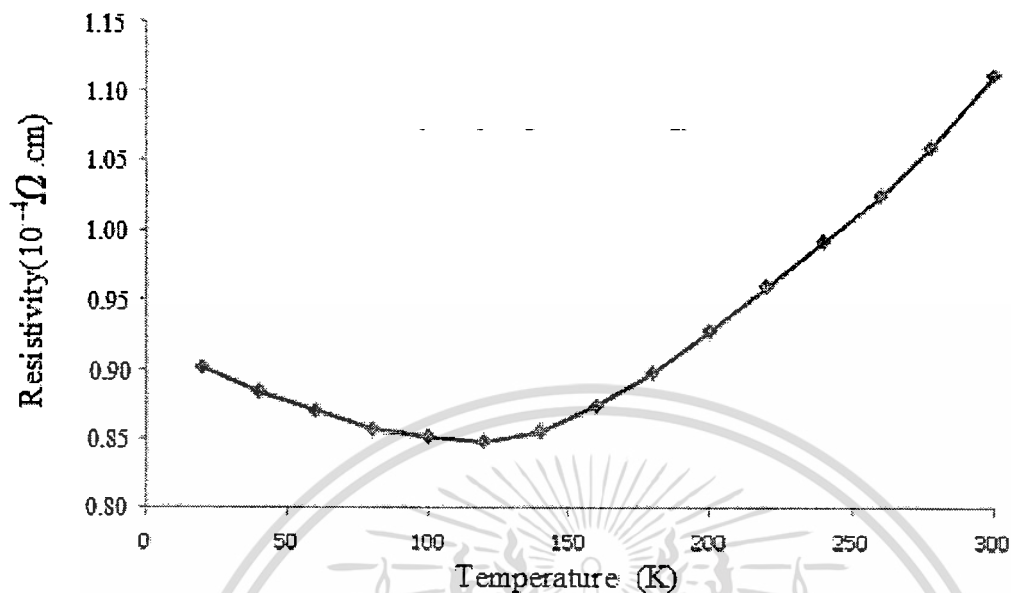
4.2.5 ผลการศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่เตรียมภายใต้ความดันและ 10^{-4} มิลลิบาร์ เมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศที่ความดัน 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิประมาณ 180 เคลวิน มีค่าความต้านทานต่ำที่สุดและค่าที่มากกว่าช่วงนี้จะประพฤติตัวเป็นโลหะและค่าที่น้อยกว่าในช่วงนี้ ประพฤติตัวเป็นฉนวนที่อุณหภูมิต่ำ 180 เคลวิน ฟิล์มบาง CdO จะมี สัมประสิทธิ์ของสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นลบ แสดงว่า เมื่ออุณหภูมิลดลงสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่ท้องถิ่น (localized electron) และสารกึ่งตัวนำ CdO จะประพฤติตัวเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 180 เคลวิน สัมประสิทธิ์ของสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมของอิเล็กตรอนอิสระที่กระเจิงกับ โฟนอน เสมือนว่าเป็นอิเล็กตรอนอิสระในโลหะซึ่งฟิล์มบาง CdO เป็นสารกึ่งตัวนำดีเจนเนอเรต และประพฤติตัวกลายเป็นโลหะฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วย Al ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ 7 เปอร์เซ็นต์โดยโมลจะมีอุณหภูมิทรานซิชันลดลงเป็น 120 เคลวิน แสดงว่าปริมาณสารเจือ Al จะช่วยเสริมในฟิล์มบาง CdO เป็นสารกึ่งตัวนำดีเจนเนอเรตที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า กับ อุณหภูมิของฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่ $x = 0.07$ จากสารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกสัณฐานที่มีความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกส์ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติกิริยาสถานะของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก แสดงให้เราทราบว่าพิกซ์ที่เกิดขึ้นนั้นตรงกับสาร CdO จากตารางเทียบมาตรฐานและมีเฟสเป็นแบบ เฟสเซนเตอร์ คิวบิกและเมื่อเจือปริมาณของ Al เพิ่มขึ้นจะแสดงให้เห็นว่าพิกซ์ที่ได้มีความคมน้อยลงซึ่งทำให้ค่าคงที่โครงสร้างผลึกมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเจือที่มากขึ้นเนื่องจากรัศมีของ Al^{3+} มีขนาดเท่ากับ 0.57 อังสตรอม ซึ่งเล็กกว่ารัศมีของ Cd^{2+} ที่มีขนาดเท่ากับ 0.97 อังสตรอม และค่าของเกรนที่คำนวณออกมาเกรนมีขนาดโตมากที่สุดที่การเจือที่ $x = 0.03$ ที่ปริมาณการเจือที่มากขึ้นค่าของเกรนกลับมีขนาดเล็กลงซึ่งให้ผลตรงกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งเมื่อปริมาณการเจือที่ $x = 0.03$ ให้ขนาดเกรนโตที่สุดส่วนการทดลองสภาพการนำไฟฟ้าที่การเจือที่ $x = 0.07$ มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดทำให้เราทราบว่าที่ปริมาณการเจือที่ $x = 0.07$ มีสภาพนำไฟฟ้าดีที่สุดและที่ $x = 0.03$ จะแสดงขนาดเกรนที่โตที่สุด

จากการทดลองของฟิล์มบาง CdO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศได้แสดงผลออกมาให้เราทราบว่า ฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่เตรียมที่ความดันสองค่าคือ 10^{-4} และ 10^{-2} มิลลิบาร์รวมถึงที่ผ่านการแอนนีสและไม่ได้ผ่านการแอนนีส โดยฟิล์มที่ยังไม่มีการแอนนีสจะมีสีเทาดำ แต่เมื่อได้ผ่านการแอนนีสแล้วที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ฟิล์มจะเปลี่ยนสีเป็นสีส้มเข้ม ซึ่งฟิล์มติดกับฐานรองดีกว่าที่ไม่ได้แอนนีส และที่ความดัน 10^{-2} มิลลิบาร์โดยผ่านการแอนนีส ฟิล์มจะมีสีส้มอ่อนและติดบางกว่าที่ความดัน 10^{-4} มิลลิบาร์ผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงให้เราทราบว่าฟิล์มแคดเมียมออกไซด์ที่เราเตรียมได้มีระนาบ (111) และมีเฟสเป็นแบบ เฟสเซนเตอร์ คิวบิก ซึ่งที่ความดัน 10^{-4} มิลลิบาร์และผ่านการแอนนีส มีพิกซ์ ที่ใกล้เคียงกับผลึกเดี่ยวของสารแคดเมียมออกไซด์มากที่สุด และมีขนาดของเกรนเล็กกว่าเกรนของฟิล์มบางที่เตรียมได้ที่ความดันบรรยากาศ 10^{-2} มิลลิบาร์ และจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงซึ่งเราพิจารณาในช่วงความยาวคลื่นในช่วง 400-1000 นาโนเมตร ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มที่เตรียมด้วยความดัน 10^{-4} มิลลิบาร์ และผ่านการแอนนีสให้ช่องว่างแถบพลังงานน้อยที่สุดคือ 2.1 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์โดยไม่ได้ผ่านการแอนนีสกับที่ความดันบรรยากาศ 10^{-2} มิลลิบาร์ โดยผ่านการแอนนีสมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 2.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ทางด้านสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมที่ความดัน 10^{-2} มิลลิบาร์จะมีค่าน้อยกว่าและมีค่าสภาพคล่องสูงกว่า แต่ด้วยคุณภาพของฟิล์ม ที่ดีกว่าและคุณสมบัติการประพุดิตัวในระนาบ (111) ที่มีค่า

ใกล้เคียงกับพีคมาตรฐานของแคดเมียมออกไซด์มากที่สุดรวมถึงค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าต่างกันไม่มากเราจึงเลือกทำที่ความดันบรรยากาศ 10^{-4} มิลลิบาร์

5.1 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมออกไซด์ที่เตรียม โดยการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศนั้นพบปัญหาและเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลองเพื่อให้ผลลัพธ์ออกมาดีที่สุด โดยปัญหาและข้อเสนอแนะมีดังนี้

- คุณภาพของฟิล์มบางจะติดบนแผ่นฐานรองรับได้ดีนั้นฐานรองรับที่จะต้องมีความสะอาดมาก โดยผ่านขั้นตอนการล้างหลายขั้นตอน
- สารที่จะนำมาใช้ในการระเหยควรได้รับการอบเพื่อให้ความชื้นระเหยไปก่อนแล้วจึงนำเข้าสู่ระบบทันทีเพื่อให้ขั้นตอนการระเหยสาร สารสามารถระเหยได้ง่าย
- ทำการล้างระบบทุกครั้งทั้งก่อนทำและหลังทำ เพื่อให้ระบบมีความสะอาดเพื่อให้ขั้นตอนการลดความดันบรรยากาศรวมถึงการระเหยสารทำได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น
- ในระหว่างการระเหยสารควรจะต้องค่อยๆเพิ่มกระแสที่ละน้อยๆเพื่อให้ ภาชนะระเหยสารค่อยๆได้รับความร้อนที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆป้องกันสารกระเด็นหนีออกจากภาชนะระเหยสาร
- ควรมีการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) เพื่อทราบข้อมูลที่สำคัญของฟิล์มบาง เช่น ความหนาแน่นของพาหะอิสระ, สภาพความคล่องตัวของพาหะและชนิดการนำไฟฟ้าของสาร เป็นต้น
- ในการระเหยสารแคดเมียมออกไซด์ควรระเหยที่ความดันต่ำกว่า 10^{-4} มิลลิบาร์ เพราะจะทำให้สารระเหยได้ดีและไม่ควรให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับเพราะฟิล์มบางจะไม่เกาะที่แผ่นฐานรองรับและสารตั้งต้นควรเป็นเซรามิกส์ที่ผ่านการอบด้วยความร้อนเพื่อไล่ความชื้นแล้ว

บรรณานุกรม

- คูตีต เครื่องงาม. 2542. เซลล์แสงอาทิตย์ สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 589-590
- Barnett, A.M., Braggno, J.A., Hall, R.B., Phillips, J.E. and Meakin, J.D. 1978. Cof. Rec. 13th IEEE, **Photovoltaic Spec.:** 419.
- Paulson, P.L. and Dutta, V. 2000. Study of in situ CdCl₂ treatment on CSS deposited CdTe films and CdS/CdTe solar cell, **Thin Solid Films.** 370: 229.
- Wagner, S., Shay, J.L., Migliorato, P. and Kasper, H.M. 1974. CuInSe₂/CdS heterojunction photovoltaic detectors, **Appl. Phys. Lett.** 25: 434.
- Kazmerski, L.L., White, F.R., and Morgan, G.K. 1976. Thin-film CuInSe₂/CdS heterojunction solar cell, **Appl. Phys. Lett.** 29: 268-270.
- Acevedo, A.M. 2006. Can we improve the record efficiency of CdS/CdTe solar cell, **Sol. Energy Mater. Sol. Cells.** 90: 2213-2220.
- Bosio, A., Rome, N., Mazzamuto, S. and Canevari, V. 2006 Polycrystalline CdTe thin films for photovoltaic applications, **Progress in crystal Growth and Characterization of Materials.:** 247-279.
- Wu, X., Keane, J.C., Dhere, R.G., Deltart, C., Albin, D.S., Duda, A., Gessert, T.A., Asher, S., Levi, D.H. and Sheldon, P. 2001. 16.51%-efficiency CdS/CdTe polycrystalline thinfilms solar cell. In: **Proceeding of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, Munich, Germany, p. 995.
- Gupta, R.K., Ghosh, K., Patel, R., Mishra, S.R. and Kahol, P.K. 2008. Structural, optical and electrical properties of In doped CdO thin films for optoelectronic applications, **Materials Letters.** 62: 3373-3375.
- Flores, M.A., Castanedo, R., Torres, G. and Zelaya, O. 2009. Optical, electrical and structural properties of indium-doped cadmium oxide films obtained by the sol-gel technique, **Sol. Energy Mater. Sol. Cells.** 93: 28-32.
- Dakhel, A.A. 2008. Correlated transport and optical phenomena in Ga-doped CdO films, **Solar Energy.** 82: 513-519.

- Gupta, R.K., Ghosh, K., Patel, R., Mishra, S.R., Kahol, P.K. 2009. Preparation and characterization of highly conducting and transparent Al doped CdO thin films by pulsed laser deposition, *Cur. Appl. Phys.* 9: 673-677.
- Gupta, R.K., Ghosh, K., Patel, R., Mishra, S.R., Kahol, P.K. 2008. Influence of oxygen partial pressure on optoelectrical properties of aluminum-doped CdO thin films, *Appl. Surf. Sci.* 254: 5868-5873.
- Saha, B., Das, S. and Chattopadhyay, K.K. 2007. Electrical and optical properties of Al doped cadmium oxide thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 91: 1692-1697.
- Zhou, Q, Ji, Zu, Hu B.B., Chen, C., Zhao, L. and Wang, C. 2007. Low resistivity transparent conducting CdO thin films deposited by DC reactive magnetron sputtering at room temperature, *Materials Letters*, 61: 531-534.
- Dantus C., Rusu G.G., Dobromir M., Rusu M. 2008. Preparation and characterization of CdO thin films obtained by thermal oxidation of evaporated Cd thin films, *Appl. Surf. Sci.* 255: 2665-2670.
- งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2546. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ฌฐพร พรหมรส. 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงของเซลล์

- แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และ ญัฐพร พรหมรส. 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Kittel C. 1971. **Introduction to Solid State Physics**, 4th. ed., New York, John Wiley & Son.
- Cullity B.D. 1956. **Elements of X- Ray Diffraction**, Addison – Wesley Publishing Company Inc.
- วีรัชย์ ลิภา. 2547. การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สุกฤษฎี เกิดแสง. 2547. การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Runyan W.R. 1975. **Semiconductor Measurement and Instrument**, 3rd. ed., New York, MC. Graw – Hill.
- Sze S.M. 1981. **Physics of Semiconductor Devices**, 2nd. ed., John Wily & Sons.
- สมฤทธิ วงศ์ณีโรจน์. 2538. ระบบวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้อของฮอลล์ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Fahrenbruch A.L., Bube R.H. 1983. **Fundamentals of Solar Cells Photovoltaic Solar Energy Conversion**, New York Academic Press Inc.: 44.
- van der Pauw L.J. 1958. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape, **Philips Res. Repts.** 13: 1-9.
- Marquardt M.A., Ashmore N.A. and Cann D.P. 2006. Crystal chemistry and electrical properties of the delafossite structure., **Thin solid films.** 496: 146-156.
- Dieter K.S. 1998. **Semiconductor Material and Device Characterization** 2nd ed., New York: John Wiley & Sons Inc.
- Tilley J.D. 2004. **Understanding Solids : The Science of Materials.** Chichester : John Wiley & Sons.
- Jackson, J.D. 1999. **Classical Electrodynamics**, John Wiley.& Son,Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kittel, C., 2005. **Introduction to Solid State Physics**, 8th Ed., John Wiley & Son, Inc.

Barsoukov, E. and Macdonald, J.R. 2005. **Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment and Application**, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey.

ประธาน ประจวบโชค. 2550. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ชนิดพี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิทธิ์ ภูริภักย์เกียรติ. 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Herberholz, R., Igalson, M and Schock, H.W. 1998. Distribution between bulk and interface states in $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}/\text{ZnO}$ by space charge spectroscopy, *J.Appl.Phys.* 83:318-325



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

| Pattern : 75-591 | | Radiation = 1.540600 | | Quality : Calculated | | |
|--|--|----------------------|-----|----------------------|---|---|
| CdO | | 2 θ | I | h | k | l |
| Cadmium Oxide | | 33.020 | 100 | 1 | 1 | 1 |
| | | 38.313 | 84 | 2 | 0 | 0 |
| | | 55.300 | 45 | 2 | 2 | 0 |
| | | 65.936 | 28 | 3 | 1 | 1 |
| | | 69.273 | 12 | 2 | 2 | 2 |
| | | 82.036 | 5 | 4 | 0 | 0 |
| Lattice : Face-centered cubic | | Mol. weight = 128.41 | | | | |
| S.G. : Fm $\bar{3}$ m (225) | | Volume [CD] = 103.48 | | | | |
| a = 4.69465 | | Dx = 8.242 | | | | |
| Z = 4 | | Wcor = 10.99 | | | | |
| ICSD COLLECTION CODE : 025289 REMARKS FROM ICSD : REM TEM 294. TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing. | | | | | | |
| *Calculated from ICSD using POWD-12+*, (1997) primary reference : J. Phys. Chem. Solids, volume 17, page 57, (1960) : Cordero A. Llanusa M. | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้