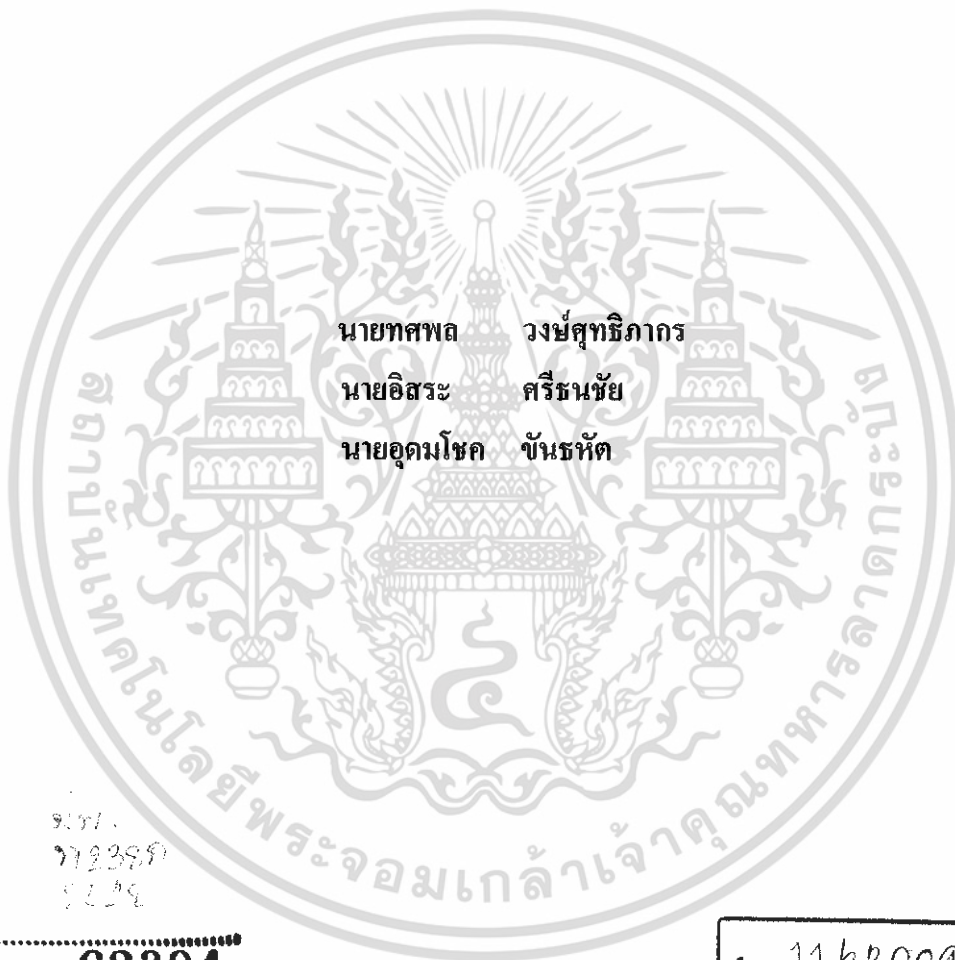


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมฟิล์มบาง ZnO:B โดยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิส



นายทศพล วงษ์สุทธิภากร
นายอิสระ ศรีพนชัย
นายอุดมโชค ชันรหัต

เลขที่
712350
5259

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **62304**
วัน,เดือน,ปี. - 8 ส.ค. 2549

b. 11620092
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ **ปีการศึกษา 2548** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation of ZnO:B Thin Films by Spray Pyrolysis Method



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of

Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang






Academic Year 2005

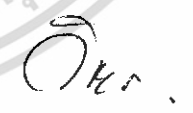
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การเตรียมฟิล์มบาง ZnO:B โดยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิส
นักศึกษา นายทศพล วงษ์สุนธิภากร
นายอิสระ ศรีธนะชัย
นายอุดมโชค จันทร์หัด

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ			ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	อ. กิรยุทธ ศรีนวลจันทร์		
กรรมการ	อ.ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี		
กรรมการ	รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง		
กรรมการที่ปรึกษา	รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ		
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ		


.....
(รองศาสตราจารย์วิชาญ เดชิตธีระ)
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Preparation of ZnO:B Thin Films by Spray Pyrolysis Method

Name Mr. Tossaporn Wongsutipakorn

Mr. Itsara Sritanachai

Mr. Udomchooke Kantahat

Department Applied Physics Faculty of Science

Program Applied Physics

Special Project Advisor Assoc.Prof. Ngamnit Wongcharoen

Special Project co-Advisor Assoc.Prof.Dr. Chaisingh Poo-Rakkiat

ABSTRACT

In this special project, ZnO thin films doped with boron were prepared on glass substrates by the spray pyrolysis technique. During deposition process, the substrates temperature were kept constant at 400^oC. As-deposited films and annealing films were checked some physical properties. The crystalline and the preferred orientations of the films were analyzed using X-ray diffraction technique. Surface morphology of the films was examined using scanning electron microscope. The optical transmission spectra of the films were recorded from 300 to 1,000 nm. The sheet resistance of the films were determined using Van Der Pauw technique. The carrier concentrations of the films were determined using Hall measurement.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ อรุณี คงศักดิ์ไพศาล, คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ และคุณกัญญา ศิริโภชน ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลแบบดับเบิลบีมี ซีห้อ จัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ (UV-visible spectrometer JUSCO 7600) ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเล็ตและย่านตามองเห็น ในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ คุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำปลอตกประจมาใช้ในการทดลองของวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์วิชาญ เดชดิธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชา เพื่อใช้ในงานวิจัย และให้ความกรุณาเป็นประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องซังสาร, อิเล็กโตรมิเตอร์ ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และชุดวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

ขอขอบคุณ คุณธวัชชัย ขาวประเสริฐ คุณจรินทร์ โพธิ์ไชยะ และคุณชำนาญ จันทร์ชุ่ม เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการเข้าใช้เครื่องมือเพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ คุณปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์, คุณฐิติกร จรรยาธรรม, คุณประธาน ประจวบโชค และคุณสุกฤษฎี เกิดแสง นักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวัสดุทางแสงภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำ ด้วยดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณครู-อาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชาและอบรมสั่งสอนตั้งแต่การศึกษามัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ ขอขอบคุณ คุณพ่อ, คุณแม่, และญาติๆ ทุกท่าน ที่ให้ความสนับสนุนและ ส่งเสริมในการศึกษาทุกระดับชั้นด้วยดีมาตลอดอีกทั้งคอยเป็นกำลังใจพร้อมทั้งให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีเสมอมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 โครงสร้างผลึกของ ZnO	5
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	5
2.1.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (Zincblende) หรือ	5
โครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (cubic)	
2.1.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ (wurtzite) หรือ โครงสร้าง	6
แบบเฮกซะโกนอล (hexagonal)	
2.2 ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices)	7
2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล รูไทล์	8
2.4 โครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคในผลึกจริง (real crystal)	9
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	9
2.6 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้อง	13
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	
2.7 วิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไฟโรไลซิส (ultrasonic spray pyrolysis)	15
2.7.1 ระบบการทำงานของเครื่อง ultrasonic spray pyrolysis	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การเจือสาร	17
2.8.1 ชนิดเอ็น (n-type)	17
2.8.2 ชนิดพี (p-type)	18
2.9 การเกิดความเป็น n-type ของการอินเตอร์สติเชียล (interstitial) และ ออกซิเจนแวกเคนซี (vacancies)	19
2.10 เทคนิคการแอนนัล (anneal)	20
2.10.1 การแอนนัลในไนโตรเจน 100%	21
2.10.2 การแอนนัลในไนโตรเจนกับไฮโดรเจน 5%	21
2.11 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	22
2.11.1 การเกิดสีของผลึก	22
2.11.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และ กระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กทรอนิกส์	24
2.11.3 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง	27
2.11.4 การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำ	28
2.11.5 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	30
2.11.6 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	31
2.12 สมบัติทางไฟฟ้า	33
2.12.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์และโฮล	33
2.12.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	34
2.12.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดตรง (direct resistivity method)	34
2.12.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว (two point probe method)	36
2.12.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point method)	38
2.12.3 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12.4 การวัดสภาพต้านทานแบบแวนเดอร์เพาว์	42
2.13 ปรากฏการณ์ของฮอลล์	44
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	49
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบาง ZnO	49
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือโบรอน (ZnO:B) ด้วยวิธีการ อัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิส	50
3.2.1 การเตรียมฐานรองรับ	50
3.2.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือโบรอนด้วยวิธีการอัลตรา โซนิคสเปรย์ไพโรไลซิส	50
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	54
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้	54
4.2 ผลการศึกษาลักษณะ โครงสร้างเชิงพื้นผิว	54
4.3 ผลการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสี เอ็กซ์	56
4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	59
4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	65
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลการทดลอง	67
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	68
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก	71
ประวัติผู้เขียน	73

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นซึ่งต่ออะซิเตรตไดไฮเดรต ($C_4H_6O_4 \cdot Zn \cdot 2H_2O$) และสารที่เจือกรดบอริก (H_3BO_3) ณ ที่เปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ	51
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดเกรนได้จากการคำนวณตามสมการที่ 2.4 ของฟิล์มบาง $ZnO:B$ ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิก สเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น $[B]/[Zn]$ 0, 1, 3, 5, 7, 9 และ 15% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาที เมื่อไม่มีการแอลนิต	59
ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv	64
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น $[B]/[Zn]$ 0, 1, 3, 5, 7, 9 และ 15% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาที เมื่อไม่มีการแอลนิต	65

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการจับกันแบบพันธะโคเวเลนต์ของอะตอม	5
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร	6
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หรือ โครงสร้างคิวบิก	6
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไฮท์ หรือ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล	7
รูปที่ 2.5 แสดงค่าดัชนีมิลเลอร์ในระนาบต่าง ๆ	7
รูปที่ 2.6 แสดงระนาบ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลที่ระนาบของดัชนีมิลเลอร์	8
รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลบอดีเซ็นเตอร์	9
รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์	10
รูปที่ 2.9 แสดงภาพถ่ายของเครื่อง XRD	11
รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	12
รูปที่ 2.11 แสดงวิธีการหาค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	12
รูปที่ 2.12 แสดงภาพถ่ายของเครื่อง scanning electron microscope	14
รูปที่ 2.13 แสดงภาพการถ่ายภาพจากเครื่อง scanning electron microscope	15
รูปที่ 2.14 แสดงภาพถ่ายระบบอัลตราโซนิคสเปรย์ไฟโรไลซิส	15
รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของระบบอัลตราโซนิคสเปรย์ไฟโรไลซิส	16
รูปที่ 2.16 ภาพแสดงลักษณะของอินเทอร์สตีเชียลของอะตอม	19
รูปที่ 2.17 ภาพแสดงลักษณะของแวนแวนซีของอะตอม	19
รูปที่ 2.18 ภาพแสดงลักษณะการแทรกตัวของอะตอม	20
รูปที่ 2.19 ภาพแสดงลักษณะการเกิดแทรก ในแวนแวนซีของอะตอมผู้รับ	20
รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะของแถบพลังงานของสารชนิดต่าง ๆ	23

(ก) ถนวน

(ข) กิ่งโลหะ

(ค) โลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d	24
รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$) (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	26
รูปที่ 2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับ พลังงาน โฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$) (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน	26
รูปที่ 2.24 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงาน โฟตอน	32
รูปที่ 2.25 แสดงการให้แรงดันกับสารตัวอย่าง	34
รูปที่ 2.26 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้าโดยวิธีวัดตรง	35
รูปที่ 2.27 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	36
รูปที่ 2.28 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น (ก) แสดงการวัดแบบสองขั้วเชิงเส้น โดยวิธีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง (ข) แสดงกราฟที่ได้จากการวัด โดยวิธีเลื่อนขั้วไฟฟ้า	38
รูปที่ 2.29 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง	42
รูปที่ 2.30 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทาน ไฟฟ้า	42
รูปที่ 2.31 แสดงการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์	44
รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิส	52
รูปที่ 4.1 แสดงภาพฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] wt % ต่าง ๆ โดยใช้เวลาในการพ่น 30 นาทีเท่ากัน เมื่อไม่มีการแอลนิล	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] wt 0 % ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาที เมื่อไม่มีการแอลนิตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	55
รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบาง ZnO เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] wt 5 % ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาที เมื่อไม่มีการแอลนิตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	55
รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสโดยไม่มีการเจือโบรอน แบบภาพตัดขวางเพื่อวัดความหนาของฟิล์มบางที่ใช้เวลาพ่น 30 นาที เมื่อไม่มีการแอลนิตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	56
รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 0, 1, 3, 5, 7, 9 และ 15% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต	57
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะระนาบของผลึกที่เกิดการเปลี่ยนแปลง	58
รูปที่ 4.7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 0, 1, 3, 5, 7, 9 และ 15% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต	60
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 0wt% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต	61
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 1wt% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต	61
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 3wt% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 5wt% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต	62
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 7wt% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต	63
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 9wt% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต	63
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 15wt% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต	64
รูปที่ 4.15 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 0, 1, 3, 5, 7, 9 และ 15% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาโครงการพิเศษ

สถานะความต้องการพลังงานในปัจจุบันเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงพยายามที่จะหาพลังงานมาตอบสนองความต้องการให้เพียงพอ โดยได้ค้นหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ มาทดแทนพลังงานจากน้ำมันและถ่านหินซึ่งมีความเป็นมลพิษสูงบวกกับเป็นทรัพยากรที่มีอย่างจำกัดแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ในปัจจุบัน ได้แก่ พลังงานลม, พลังงานน้ำ, พลังงานนิวเคลียร์ และพลังงานแสงอาทิตย์พลังงานลมนั้นจะขึ้นอยู่กับฤดูกาลรวมถึงสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมเนื่องจากพลังงานลมจำเป็นต้องใช้บริเวณที่มีลมพัดอย่างต่อเนื่อง ขณะที่พลังงานนิวเคลียร์จะมีปัญหาในเรื่องของขยะที่เป็นกากกัมมันตภาพรวมถึงการควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำจึงจำเป็นต้องอยู่ใกล้กับแหล่งน้ำ ความต้องการระบบควบคุมที่เข้มงวด ยากที่ทุกประเทศ จะสร้างขึ้นได้ พลังงานน้ำได้มาจากแม่น้ำสายใหญ่แต่จำเป็นต้องมีการสร้างเขื่อนซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรงและภัยแล้งก็จะส่งผลถึงการผลิตด้วย ส่วนพลังงานแสงอาทิตย์แม้จะขึ้นอยู่กับสภาพกลางวันกลางคืน แต่สามารถใช้ได้ทุกที่ทั่วโลกและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเป็นพลังงานที่แทบจะไม่มีที่สิ้นสุด ดังนั้นพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดที่เราจะได้มาซึ่งพลังงานและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม พลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากปรากฏการณ์โฟโตโวลต์ตาอิก (photovoltaic effect) ซึ่ง ส่วนสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์คือชั้นนำไฟฟ้าโปร่งแสง ฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งแสง n-type เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบระดับพลังงานที่กว้าง ซึ่งมีลักษณะโปร่งแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น ฟิล์มเหล่านี้ถูกศึกษาอย่างแพร่หลายและประยุกต์เป็นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับแสงอาทิเช่นตัวตรวจจับก๊าซ ชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงในจอแสดงผล กระจกทนความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ได้รับความสนใจอย่างมาก ในฐานะที่เป็นสารประกอบออกไซด์นำไฟฟ้าได้ โปร่งแสง ทนต่อไฟฟ้าเคมีสูง มีระดับ พลังงานกว้างและสารมีอยู่มากในธรรมชาติและไม่เป็นพิษ วิธีการเตรียมฟิล์มบาง ZnO นั้นมีหลายวิธี อาทิเช่น อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (rf magnetron sputtering) การเคลือบโดยวิธีไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition:CVD) การเคลือบโดยวิธีเจลสารละลาย sol-gel process และสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) โดยวิธีการ สเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) มีจุดเด่นกว่าวิธีอื่นคือ ความง่ายในการเตรียม ปลอดภัยและอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาไม่สูง สิ่งที่ทำให้เรามีความสนใจ คือ ความเป็น n-type เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบ ZnO ที่ไม่เป็นสัดส่วนทางเคมีที่รู้จักกันดีว่าเกิดมาจาก Zinc interstitial และ Oxygen vacancies พาหะที่ปฏิบัติตัวเป็นผู้ให้มันเกิดมาในรูปของ Zinc interstitial และ Oxygen vacancies ซึ่งการเพิ่มของจำนวนพาหะใน ZnO สามารถทำได้โดยการให้ความร้อนกับออกซิเจนหรือด้วยการเจือสารเข้าไปในระดับที่เหมาะสมในโครงการพิเศษนี้ จะทำการเตรียมฟิล์มบาง ZnO ที่เจือด้วยอะตอมของโบรอน(B) และการแอนนัล (anneal)ฟิล์มที่เตรียมได้ และศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง ZnO:B โดยใช้วิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิส
2. ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง ZnO:B ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
3. ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง ZnO:B ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
4. ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสง (optical transmission) ของฟิล์มบาง ZnO:B เพื่อศึกษาโครงสร้างของแถบพลังงาน
5. ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO:B ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์
6. ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบาง ZnO:B

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาในส่วนของชั้นฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมโดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส ที่เจือด้วยธาตุโบรอน เนื่องจากวิธีการนี้สามารถทำได้ง่ายและประหยัดต้นทุนในการผลิตและเพื่อนำไปศึกษาถึงวิธีการเบื้องต้นในการเจือด้วยธาตุอื่นที่ทำให้ฟิล์มบาง ZnO มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสามารถนำไปผลิตอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และเมื่อทำการเตรียมสำเร็จแล้วได้นำฟิล์มบางที่เตรียมมา ไปศึกษาคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ต่างๆ ได้แก่ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าการดูดกลืนแสงและการส่งผ่านแสง สมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบาง ด้วยวิธีการสเปร์ย์ไพโรไลซิส พร้อมทั้งจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในโรงงานพิเศษ
2. ทำการเตรียมฟิล์มบาง ZnO:B บนกระจกใสที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ โดยวิธีการสเปร์ย์ไพโรไลซิส
3. ทำการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมได้ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffracting) โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray diffraction method)
4. ทำการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)
5. ทำการศึกษสมบัติของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ แล้วนำผลที่ได้จากการศึกษามาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
6. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการวัดความต้านทานของแผ่นฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น และวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ
7. สรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาของฟิล์มบางที่เตรียมได้

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน										
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.		
1	→										
2		→									
3			→								
4				→							
5				→							
6			→								
7			→								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง ZnO ที่เจือด้วย B โดยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิส เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพที่ดี
2. ทราบถึงเงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง ZnO:B เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพที่ดี
3. ทราบถึงการศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ZnO:B หลายนๆประการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

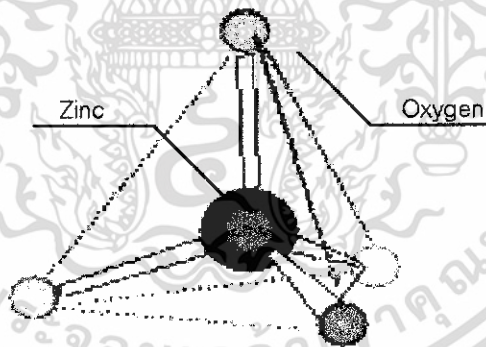
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในโครงการพิเศษนี้จะทำการเตรียมฟิล์มบาง $ZnO:B$ ด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสที่ปริมาณการเจือด้วย B ที่ต่างกันและศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้ ซึ่งจะอธิบายทฤษฎีและหลักการในส่วนที่มีความเกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 โครงสร้างผลึกของ ZnO [4,7]

โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ จะมีรูปแบบอยู่ 2 ลักษณะ คือ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) ซึ่งจัดอยู่ในโครงผลึกแบบคิวบิกซิงค์ออกไซด์ (cubic zinc oxide) และโครงสร้างผลึกแบบเวียร์ทไซต์ (wurtzite) ซึ่งจัดอยู่ในโครงผลึกแบบเฮกซะโกนอลซิงค์ออกไซด์ (hexagonal zinc oxide) โดยมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน (tetrahedral bond) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการจับกันแบบพันธะเตตระฮีดรอน

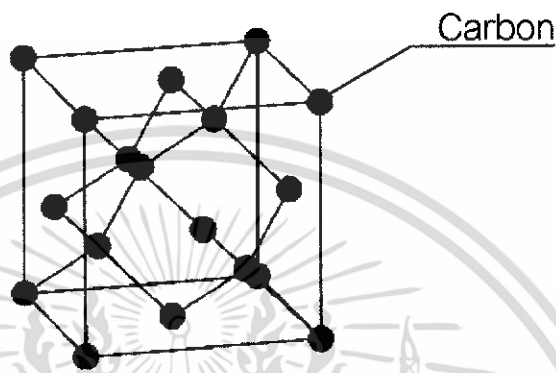
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [4-7]

2.1.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) หรือโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (cubic)

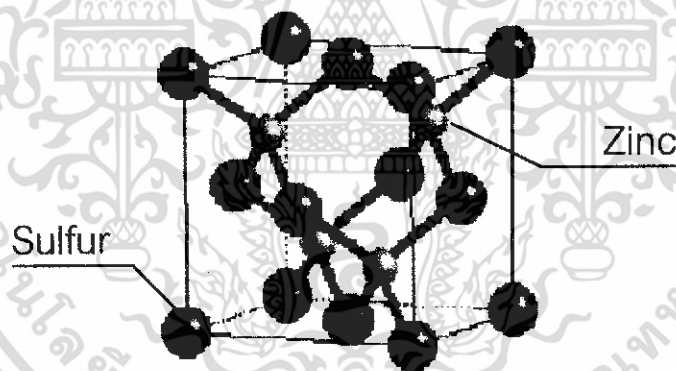
โครงสร้างผลึกที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายเพชร ดังรูปที่ 2.2 เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face-centered cubic) สองโครงสร้างมาซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $\frac{1}{4}$ ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ โดยมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารทางวิชาการที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำมาใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(tetrahedral bond) ซึ่งโครงสร้างแบบเพชรจะประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียว โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีโคออร์ดิเนชันนัมเบอร์ (coordination number) เท่ากับ 4 ซึ่งมีความแข็งแรงและมีจุดหลอมเหลวสูงมาก ส่วนโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ ดังรูปที่ 2.3 จะมีความแตกต่างกับโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ เป็นโครงสร้างผลึกที่ประกอบด้วยอะตอมธาตุ 2 ชนิด



รูปที่ 2.2 แสดง โครงสร้างผลึกของเพชร



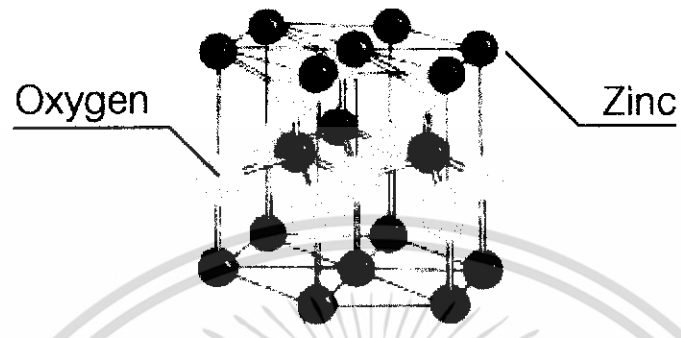
รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หรือ โครงสร้างคิวบิก

2.1.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวียร์ทซ์ไท์ (wurtzite) หรือโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal)

โครงสร้างผลึกแบบเวียร์ทซ์ไท์ ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล ซึ่งเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล โคลสแพ็ค (hexagonal closed-packed) ที่มีอะตอมชนิดต่างกันวางซ้อนกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกนซี (c-axis) โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีโคออร์ดิเนชันนัมเบอร์เท่ากับ 4 มีพันธะเคมีของโมเลกุลระหว่างอะตอม เป็นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธะเตตระฮีดรอน ดังนั้นจึงมีการเรียงระนาบของเตตระฮีดรอนของอะตอมคล้ายโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกันคือ การจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนภายในโครงสร้างผลึกเวิร์ทไซด์

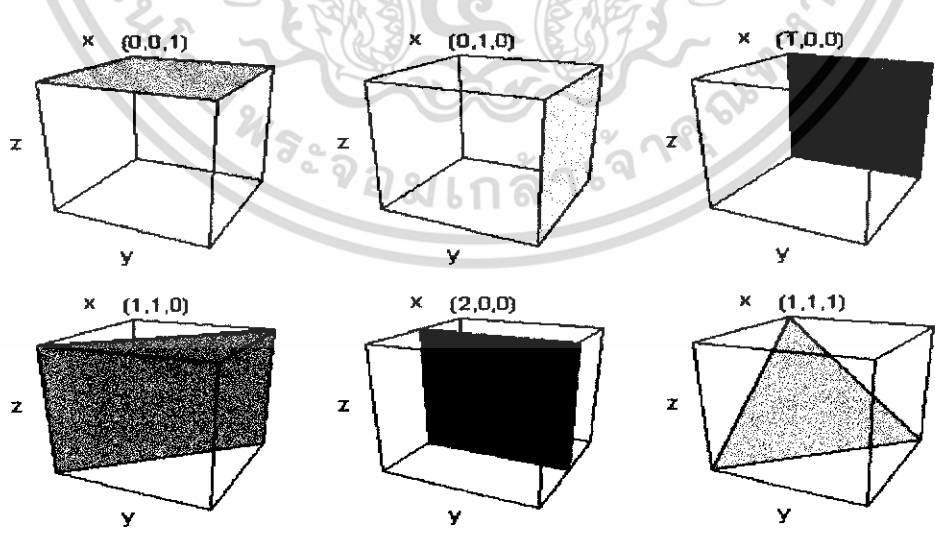


รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ หรือ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล

2.2 คัมมิลเลอร์ (miller indices)[4-7]

ค่าคัมมิลเลอร์ที่บ่งบอกระนาบต่างๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกนั้นจะแสดงถึงค่าของคัมมิลเลอร์ (miller indices) หาได้จากตัวเลขจำนวนเต็มทีน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึกที่มีอัตราส่วนเท่ากัน โดยผู้เสนอทฤษฎีนี้คือ นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษที่ชื่อว่า มิลเลอร์ (Miller)

คัมมิลเลอร์ของระนาบของผลึกที่อยู่ภายในโครงสร้างของผลึกแบบคิวบิก การบอกระนาบต่าง ๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก ดังรูปที่ 2.5

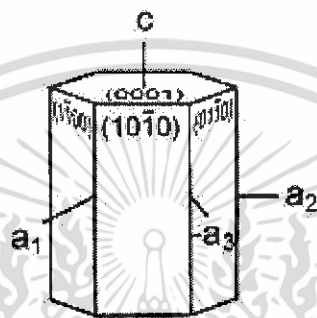


รูปที่ 2.5 แสดงค่าคัมมิลเลอร์ในระนาบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบอกชื่อของระนาบต่าง ๆ ที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกจะบอกด้วยค่าดัชนีมิลเลอร์ที่แทนด้วยเลขจำนวนเต็มสามจำนวนคือ h,k,l โดยใช้เครื่องหมาย (h,k,l) ซึ่ง $h:k:l = 1/p:1/q:1/r$

เมื่อ p,q และ r คือ จุดตัดแกนซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่ระนาบตัดแกนผลึก a,b,c ตามลำดับ นั้นคือ h,k,l จะเป็นเลขจำนวนเต็มที่น้อยสุดของส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึก a,b,c ตามลำดับ ซึ่งก็คือ ดัชนีมิลเลอร์ ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอล ดังรูปที่ 2.6



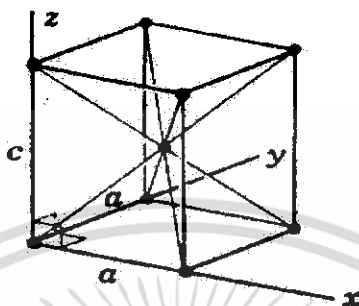
รูปที่ 2.6 แสดงระนาบ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอลที่ระนาบของดัชนีมิลเลอร์

ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอล ดัชนีที่ใช้เรียกระนาบคือ ดัชนีมิลเลอร์ บราวเอใช้สัญลักษณ์ h,k,l ซึ่งเป็นค่าที่หาได้จากเลขจำนวนเต็มที่น้อยสุดของส่วนกลับของระยะที่ระนาบที่พิจารณาตัดแกน a_1,a_2,a_3 และ c ที่มีอัตราส่วนเท่ากันตามลำดับ ระนาบมี 2 ระนาบคือระนาบบนและระนาบฐานล่าง แกน a_1,a_2,a_3 เป็นแกนที่อยู่ในระนาบที่ทำมุม 120° ซึ่งกันและกัน และระยะตัดแกน $a_1=a_2=a_3=\infty$ และแกนที่ 4 คือแกน c เป็นแกนที่ตั้งฉากกับระนาบฐานทั้ง 2 ซึ่งตัดแกน c ห่างกันเป็นระยะ 1 หน่วย ส่วนกลับของระยะตัดแกนทั้ง 4 จึงเท่ากับ $0,0,0,1$ ดังนั้นระนาบปริซึมมี 6 ระนาบหรือระนาบปริซึมทุกระบบในหน่วยเซลล์สามารถแทนด้วยดัชนีเดียวกันคือ (1010) ในการเรียกชื่อ ระนาบอาจระบุด้วย (hkl) ก็ได้คืออาศัยเพียง h,k,l โดยที่ $h+k = 1$ แต่การระบุด้วย $(hkil)$ จะแสดงให้เห็นความสมมาตรในหน่วยเซลล์ได้ชัดเจนกว่า

2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลรูไทล์ [4-7]

ข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึก สามารถไปคำนวณค่าคงที่โครงสร้างได้ โครงสร้างผลึกแบบ เตตระโกนอล รูไทล์ จัดอยู่ในรูปแบบผลึกแบบเตตระโกนอล บอดีเซ็นเตอร์ ดังรูปที่ 2.7 โดยที่ $a = b \neq c$ และ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก ค่าดัชนีมิลเลอร์ และระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกันดังสมการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{d_{hkl}} = \sqrt{\frac{h_2^2 + k_2^2}{a_2^2} + \frac{l_2^2}{c_2^2}} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบ โครงสร้างผลึกแบบเตตระ โกนอลบอดีเซ็นเตอร์

2.4 โครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคในผลึกจริง (real crystal) [4-7]

ผลึกจริง (real crystal) เป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือเป็นผลึกที่มีข้อบกพร่องของผลึกของโครงสร้างผลึก (defect crystal) ซึ่งจะมีผลทำให้สารเกิดเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างไปจากผลึกในอุดมคติแบบวาแคนซี (vacancy defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากโครงสร้าง ข้อบกพร่องผลึกแบบซัฟสติวชัน (substitution defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบมีการแทนที่อะตอมในโครงสร้างผลึกเดิม ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบมีการแทนที่อะตอมในโครงสร้างผลึกเดิม ข้อบกพร่องแบบการที่มีอะตอมไปแทรกอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงสร้างผลึก อีกทั้งยังมีเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundary) หรือ อาจทำหน้าที่คอยขัดขวางการเคลื่อนที่ของประจุ ดังนั้นจึงอาจมีผลทำให้การนำกระแสของประจุเปลี่ยนแปลงไป เขตรอยต่อของเกรนอาจทำหน้าที่เป็นกับดักประจุ กักอะตอมโมเลกุลหรือไอออนของสารบางตัว

2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [4-7]

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.05-0.25 nm เมื่อผ่านช่องระหว่างอะตอมในผลึกก็จะเกิดการเลี้ยวเบนขึ้นและหลังจากผ่าน โครงสร้างผลึกออกมาก็จะเกิดการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและแบบหักล้าง ดังรูปที่ 2.8 นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ แบริก (Bragg) ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุด เมื่อมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ และเรียกกฎนี้ว่ากฎของแบรกก์ ดังสมการ

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.2)$$

โดย
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

เมื่อ

- λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
- d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
- θ คือ มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
- n คือ อันดับการเลี้ยวเบนตั้งแต่ 1,2,3,...
- h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (plank constant)

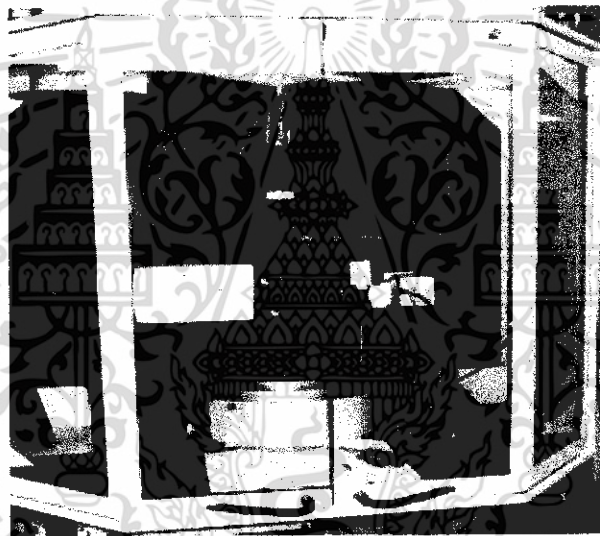


รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์

จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบต่าง ๆ ในผลึก แล้วเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน คือ ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนมีค่ามากกว่า สังเกตได้จากพีค (peak) ในรีฟของการเลี้ยวเบน จะสูงสำหรับธาตุหรือสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกันยอดของการเลี้ยวเบนจะเกิดขึ้นที่มุมของการเลี้ยวเบนเดิมเสมอโดยมุมที่เลี้ยวเบนคือ มุมระหว่างรังสีการสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบซึ่งมีค่า 2θ โดยความเข้มของรังสีการเลี้ยวเบนกับมุมจะหาได้จากกราฟของหัววัดในเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction method) เป็นวิธีที่อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเดียว ที่ทราบความยาวคลื่น เมื่อลำรังสีไปตกกระทบกับชิ้นงาน และเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ กัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับมุมสะท้อนที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลนั้นจะเป็นตัวบ่งชี้ลักษณะของสารประกอบชนิดนั้น ๆ และสามารถนำไปศึกษาหารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างนั้นได้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่เป็นพื้นฐานของสารประกอบนั้นเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำไปศึกษาความเป็นผลึกเชิงคุณภาพ ขนาดของเกรน และความเค้นของสารประกอบตัวอย่างได้อีกด้วย จากหลักการทำงานของเครื่อง XRD ดังรูปที่ 2.9 มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตร โครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน แต่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน

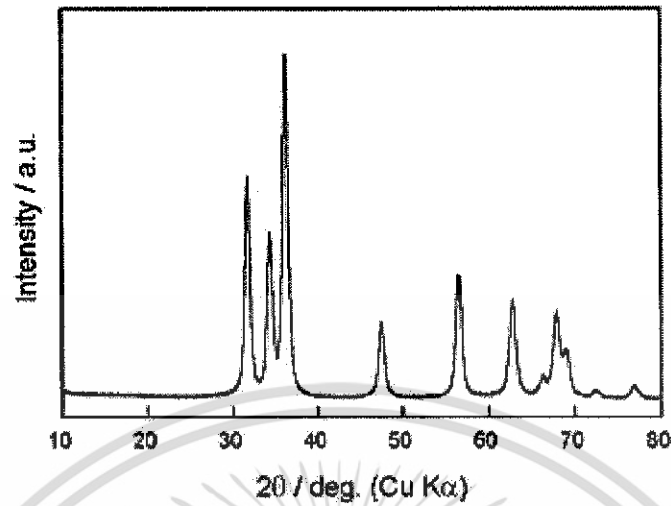


รูปที่ 2.9 แสดงภาพถ่ายของเครื่อง XRD

ลักษณะกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงดังรูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์ และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่ารูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) สำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันโดยสามารถสังเกตได้จากพีคในรูปแบบการเลี้ยวเบน

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.10 นั้นสามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้

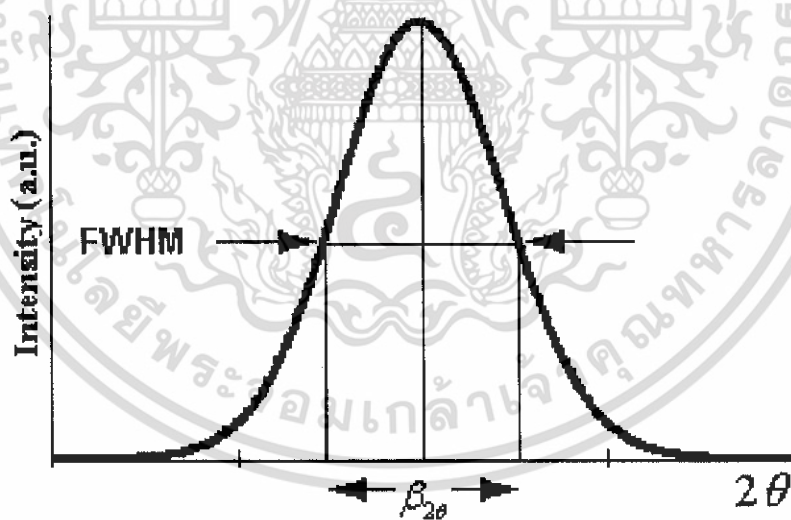
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.11 จะสามารถคำนวณหาขนาดของเกรน (grain size) ได้จาก

สมการ



รูปที่ 2.11 แสดงวิธีการหาค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

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

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

$\beta_{2\theta}$ คือ ระยะเวลาความกว้างของพีกที่ความเข้มมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด

(FWHM: Full Width at Half-Maximum of The Diffraction Peak)

นอกจากนั้นยังสามารถหาค่าความเครียดในระดับจุลภาค (microstrain) ได้จากสมการ

$$\varepsilon = \frac{(\beta_{2\theta} \cos \theta)}{4} \quad (2.5)$$

เมื่อ ε คือ ความเครียดระดับจุลภาค

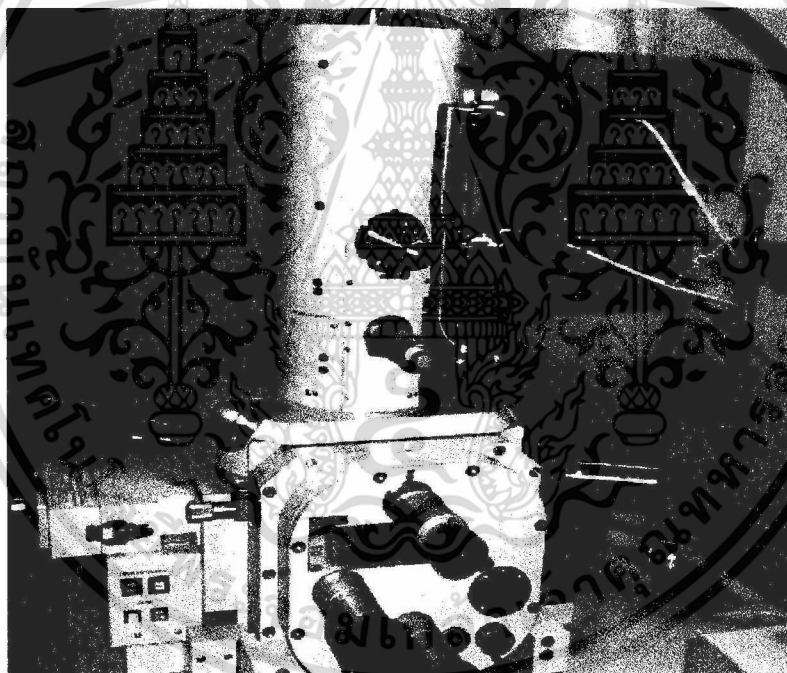
2.6 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

โดยทั่วไปเครื่องมือลำยุคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายชนิดหนึ่งเพื่อใช้ดูภาพ 3 มิติบนผิวหน้าผลึก คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) หรือเรียกว่า SEM ดังรูปที่ 2.12 การทำงานของกล้องลักษณะนี้จะไม่ขึ้นกับแสง แต่จะใช้ลำอิเล็กตรอนในการสแกนลงบน ตัวอย่างชิ้นสารที่บรรจุอยู่ในห้องสุญญากาศซึ่งดูดอากาศออกให้เป็นสุญญากาศ ถ้าอิเล็กตรอนจะเกิดจากการทำให้แคโทดทั้งสแตนร้อนจนสามารถปล่อยลำอิเล็กตรอนให้หลุดออกมาจากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยพลังงานค่าสูงประมาณ 5 – 50 keV และถูกโฟกัสให้เป็นลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิ โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิเหล่านี้จะทำให้เกิดไอออนและปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่มีพลังงานต่ำประมาณ 50 eV จากชั้นผิวหน้าประมาณ 50 nm ของตัวอย่างสาร อิเล็กตรอนปฐมภูมิหนึ่งตัวอาจทำให้มีอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิน 1 ตัว หลุดจากผิวหน้าได้ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะทำให้ลำอิเล็กตรอนมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมาก และมีความละเอียดสูง (high resolution)

วิธีการวิเคราะห์ผิวหน้าด้วย SEM ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องจัดเตรียมตัวอย่างเป็นพิเศษและไม่มีการอันตรายเนื่องจากการใช้เครื่องมือ อย่างไรก็ตามหากเป็นกรณีวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าจะมีประจุลบสะสมอยู่บนผิวหน้าซึ่งจะลดการแยกชัดของภาพลง ในกรณีนี้ต้องทำการเคลือบชั้นนำไฟฟ้าบางๆ ด้วยธาตุนำไฟฟ้า (ปกติมักใช้ Au) ลงบนผิวหน้าสารอัตราขยายภาพสามารถหาได้จากอัตราส่วนภาพบนจอมอนิเตอร์ต่อความยาวของส่วนที่ถูกสแกน และอาจมีค่าถึงแสนเท่าสำหรับการแยกชัดจะถูกจำกัดโดยขนาดของลำอิเล็กตรอน ที่โฟกัสให้เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ซึ่งขนาดของลำอิเล็กตรอนที่ถูกกำหนด โดยการแพร่กระจายพลังงานของลำอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยด้วยความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะถูกจำกัดขนาดให้มีค่าประมาณ 8 mm ในกรณีที่ต้องการให้มีการแยกชัดที่ดีควรลดกระแสของลำอิเล็กตรอนลง และความลึกของสนาม (depth of field) ควรจะมีค่าประมาณ $1\mu\text{m}$ อันที่จริงแล้ว หากมีการเพิ่มเติมอุปกรณ์บางอย่างให้แก่เครื่องมือ SEM จะสามารถได้รับข้อมูลรายละเอียดเพิ่มขึ้นอีกมากจากการใช้เครื่องมือดังกล่าวและหนึ่งในจำนวนเครื่องมือที่มีประโยชน์มากก็คือ เครื่องสเปกโตรสโคปีแบบแจกแจงพลังงาน (energy dispersive spectroscopy) หรือเรียกว่า EDS ที่ให้ค่าพลังงานอิเล็กตรอนนั้นมีค่าที่สูงขึ้น จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นใน ๆ เกิดการแตกตัวเป็นไอออนหลังจากนั้นจะเกิดการผ่อนคลาย (relaxation) โดยการปล่อยรังสีเอ็กซ์ซึ่งเป็นแสงสีเดียวคือมีความถี่ค่าเดียว และคลื่นที่ปล่อยออกมาจะแสดงลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบทางเคมีแต่ละองค์ประกอบ ดังนั้นจึงทำให้สามารถหาส่วนประกอบทางเคมีของผิวหน้าสารได้ชัดเจนมากขึ้น ประมาณ $1(\mu\text{m})^2$ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 แสดงภาพถ่ายของเครื่อง scanning electron microscope

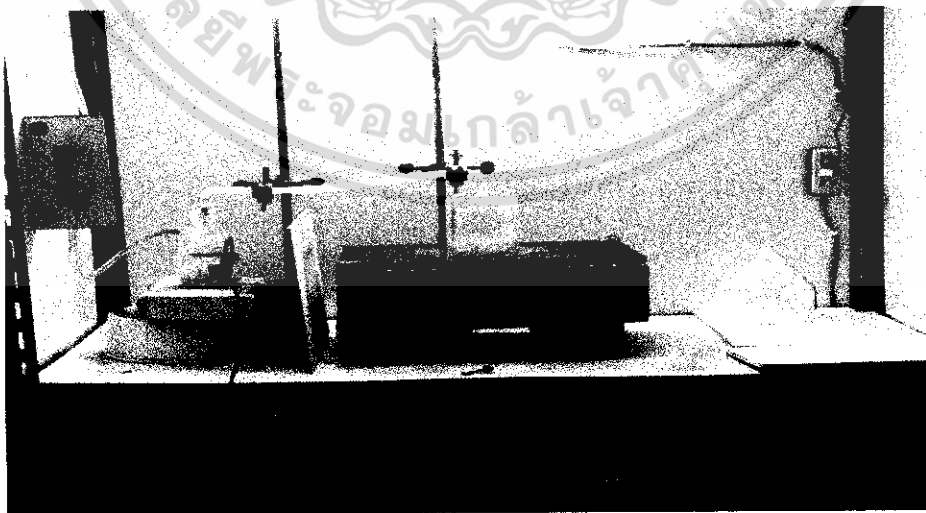
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงภาพการถ่ายจากเครื่อง scanning electron microscope

2.7 วิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิส (ultrasonic spray pyrolysis)

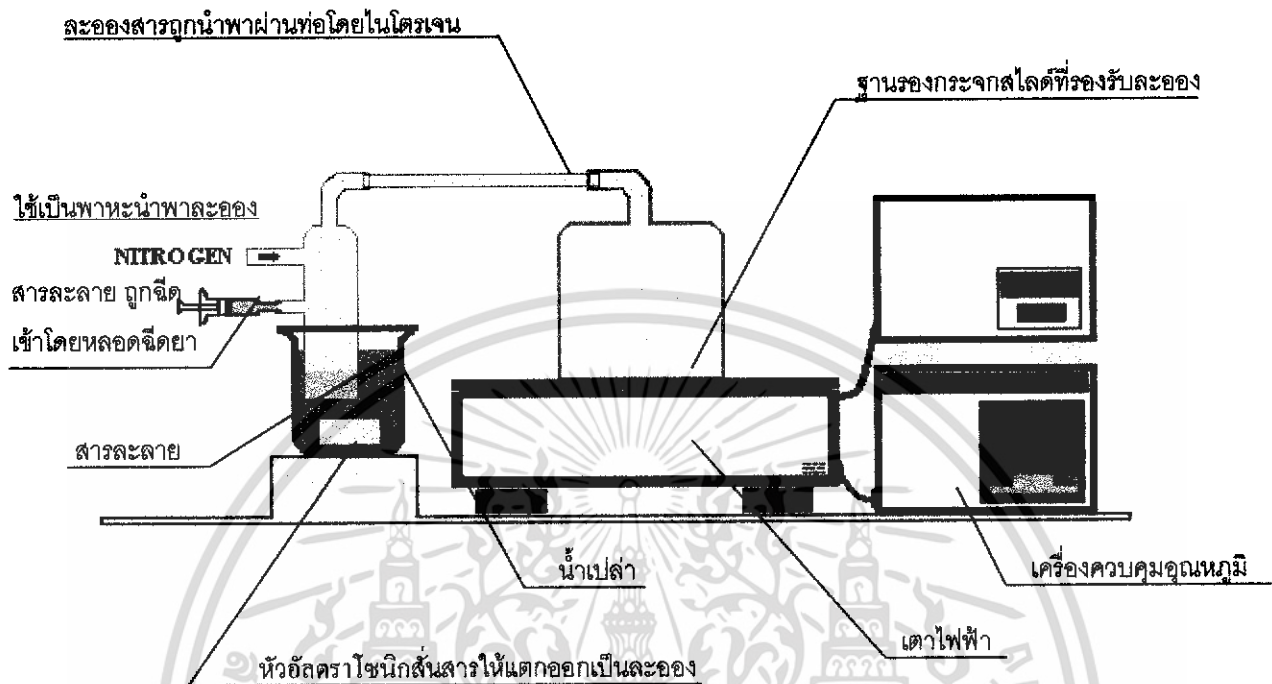
อัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิส คือ วิธีการแบบหนึ่งที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางโดยการพ่นละอองสารลงบนฐานรองที่ถูกให้ความร้อน ละอองสารจะไปก่อตัวเป็นฟิล์มบางบนกระจก โดยรูปที่ 2.14 แสดงภาพถ่ายของระบบอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิส



รูปที่ 2.14 แสดงภาพถ่ายระบบอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

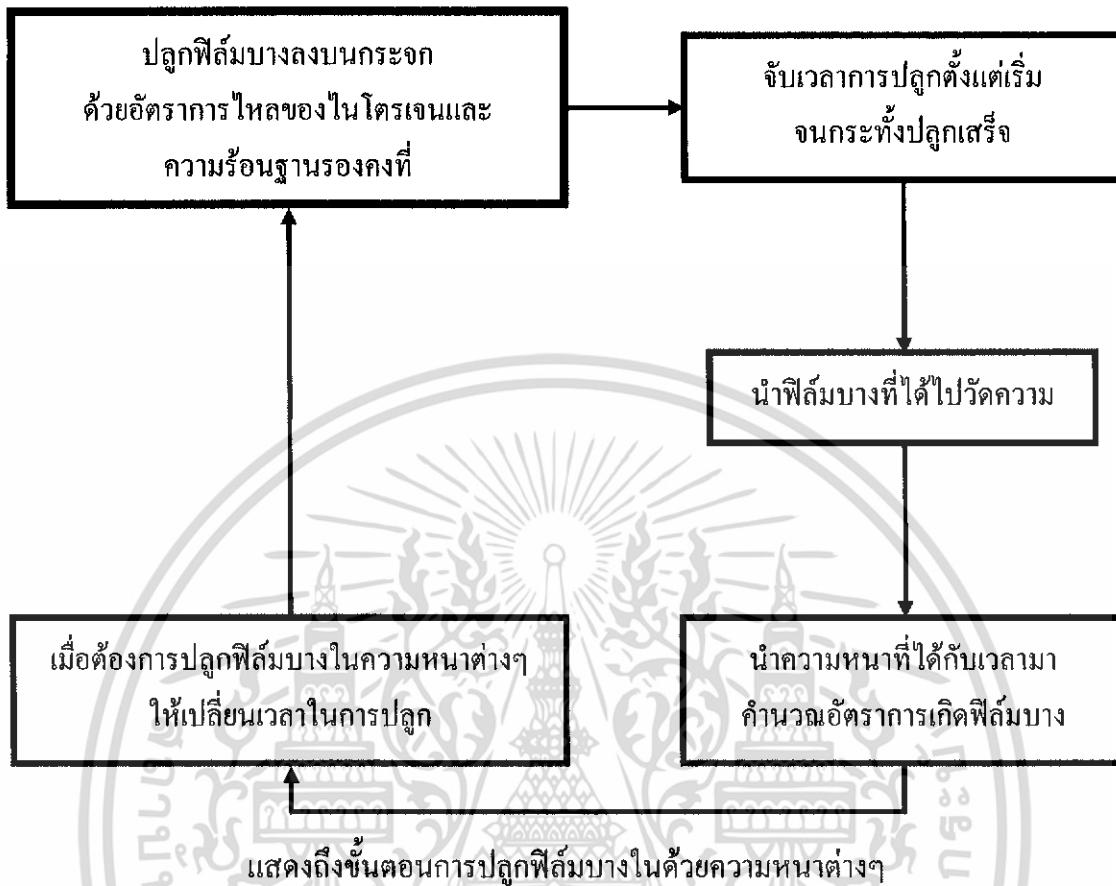
2.7.1 ระบบการทำงานของเครื่องอัลตราโซนิกสเปร์ย์ไฟโรไลซิส



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของระบบอัลตราโซนิกสเปร์ย์ไฟโรไลซิส

ระบบการทำงานของเครื่องอัลตราโซนิกสเปร์ย์ไฟโรไลซิสจะอาศัยการสั่นแบบอัลตราโซนิกสั่นสารละลายให้กลายเป็นละออง ซึ่งเมื่อสารละลายกลายเป็นละอองแล้วจะใช้ไนโตรเจนฉีดด้วยแรงดันซึ่งจะไล่ละอองไปตามท่อตรงไปสู่แผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งมีการให้ความร้อน เพื่อพร้อมที่จะรับการเคลือบของสารที่จะมาเกาะ เมื่อละอองสารมาจับ สารจะก่อตัวเป็นฟิล์มบางๆขึ้น ดังรูปที่ 2.15

การที่จะปลูกฟิล์มบางด้วยความหนาต่างๆนั้น เครื่องอัลตราโซนิกสเปร์ย์ไฟโรไลซิสไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความหนาระหว่างการปลูกได้ เหมือนเครื่องอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอร์ซึ่งมีคริสตัลตรวจจับการเกาะของสารในความหนาต่างๆ เครื่องอัลตราโซนิกสเปร์ย์ไฟโรไลซิสจะปลูกในระดับความหนาต่างๆนั้นจำเป็นต้องมีลำดับขั้นดังนี้



จากที่ได้กล่าวมาว่าการปลูกฟิล์มบางตามความหนาที่ต้องการ จะเริ่มต้นด้วยการปลูกฟิล์มบางด้วยอุณหภูมิที่แผ่นรองรับ และการควบคุมความดันของไนโตรเจนที่คงที่เมื่อปลูกเสร็จ นำฟิล์มบางมาวัดความหนา เพื่อนำความหนาที่ได้มาคำนวณกับเวลาเพื่อให้ได้ผลของอัตราความหนาที่เกิดขึ้นต่อวินาที เมื่อต้องการปลูกฟิล์มบางในความหนาต่างๆก็เพียงปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองเท่าเดิมและการไหลของไนโตรเจนเท่าเดิม และจับเวลาว่าจะปลูกนานแค่ไหน

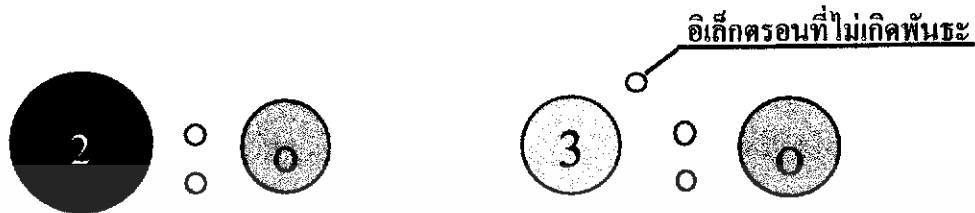
2.8 การเจือสาร

การเจือสารนั้นจะเจือสารเข้าแทนที่อะตอม ซึ่งสมมุติให้สารเป็นธาตุในหมู่ 2 การเจือจะมีการเจือธาตุได้สองแบบคือ เจือชนิด N และชนิด P

2.8.1 ชนิดเอ็น (n-type)

แบบเอ็น หมายถึงสารที่เจือจะมีพาหะข้างมากเป็น อิเล็กตรอน การเจือมีพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน คือการอะตอมของธาตุหมู่ 3 เข้าไปแทนที่อะตอมของธาตุหมู่ 2 ทำพันธะกับออกซิเจน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธาตุหมู่ 2 จะให้อิเล็กตรอนสองตัวแก่ออกซิเจน การเจือด้วยอะตอมของธาตุหมู่สาม ตัวสารจะทำพันธะกับออกซิเจนให้อิเล็กตรอนสองตัวแก่ออกซิเจนจะเหลืออิเล็กตรอนหนึ่งตัวทำให้เป็น n-type



การเกิดพันธะระหว่างธาตุหมู่สองกับออกซิเจน การเกิดพันธะระหว่างธาตุหมู่สามกับออกซิเจน

2.8.2 ชนิดพี (p-type)

แบบ P หมายถึงสารที่เจือจะมีพาหะข้างมากเป็น โฮล การเจือมีพาหะข้างมากเป็น โฮลคือ การเจืออะตอมธาตุหมู่ 1 แทนที่อะตอมธาตุหมู่ 2 การที่อะตอมธาตุหมู่ 2 ทำพันธะกับออกซิเจน อะตอมของธาตุหมู่ 2 จะให้อิเล็กตรอนสองตัวแก่ออกซิเจน การเจือด้วยอะตอมของธาตุหมู่หนึ่ง ตัวสารจะทำพันธะกับออกซิเจนให้อิเล็กตรอนได้แค่ตัวเดียวแก่ออกซิเจนทำให้เกิด โฮลขึ้นแทนที่จะมีอิเล็กตรอน



การเกิดพันธะระหว่างธาตุหมู่สองกับออกซิเจน การเกิดพันธะระหว่างธาตุหมู่หนึ่งกับออกซิเจน

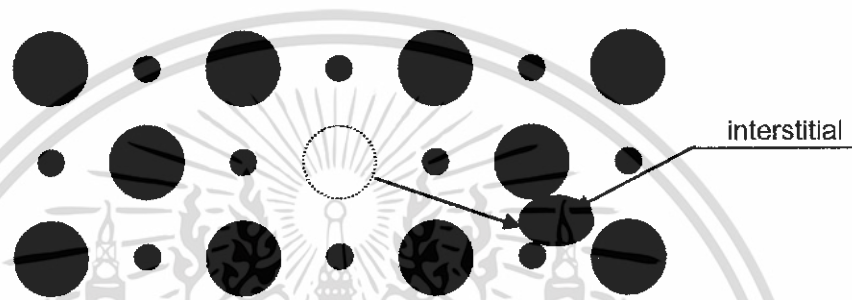
ดังนั้นการเจือ สารละลายที่ประกอบด้วยธาตุหมู่ 2 ด้วยธาตุหมู่สาม ก็จะให้สมบัติไฟฟ้าเป็นแบบ N (n-type)

สารที่มีการนำไฟฟ้าเป็นชนิดอื่นที่ไม่เป็นสัดส่วนทางเคมีที่รู้กันดีว่าเกิดมาจาก การเกิดอินเทอร์สติเชียลของอะตอมของธาตุตัวหนึ่งและ การเกิดแวนแคนซีของอะตอมของธาตุอีกตัว พาหะที่ประพจน์ตัวเป็นอะตอมผู้ให้มันเกิดจาก อินเทอร์สติเชียลของอะตอมของธาตุอะตอมตัวแรก ถูกไอออน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของจำนวนอิเล็กตรอนในสาร สามารถทำได้โดยการให้ความร้อนกับไฮโดรเจน(การแอลนิก) หรือด้วยการเจือสารเข้าไปในปริมาณที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

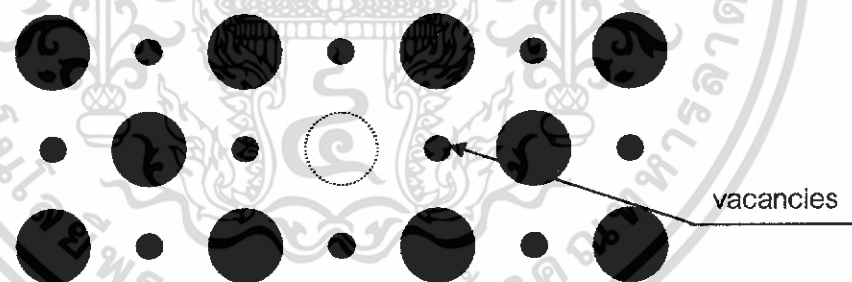
2.9 การเกิดความเป็น n-type ของการอินเทอร์สติเชียล (interstitial) และออกซิเจนแวกแคนซี (vacancies)

อินเทอร์สติเชียล (interstitial) คือ อะตอมที่หลุดจากโครงสร้างไปอยู่ยังตำแหน่งที่ไม่ควร จะอยู่หรือในตำแหน่งที่อะตอมบริเวณนั้นมีพันธะครบแล้ว หรือไปอยู่บนผิวหน้าของวัตถุ ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ภาพแสดงลักษณะของอินเทอร์สติเชียลของอะตอม

แวกแคนซี (vacancies) คือ ช่องว่างอันเกิดจากการที่อะตอมหลุดออกไป ดังรูปที่ 2.17



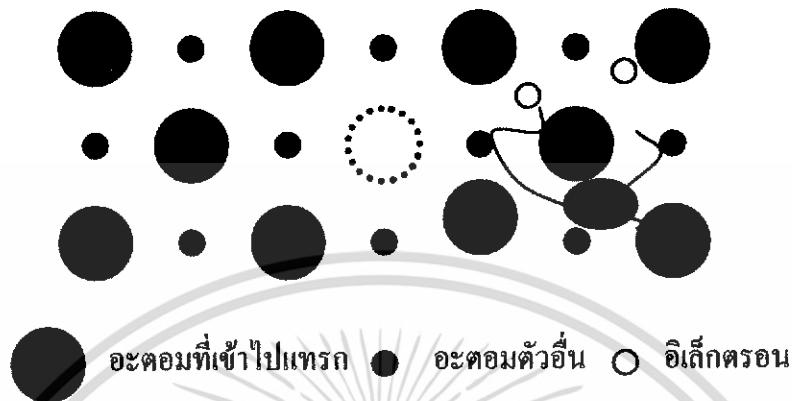
รูปที่ 2.17 ภาพแสดงลักษณะของแวกแคนซีของอะตอม

ความไม่เป็นสัดส่วนทางเคมีของสาร คือสารมีอะตอมประกอบอยู่ไม่ครบตามสูตรทางเคมี เช่นปกติ Zn จะมีอัตราส่วน Zn กับ O ในอัตราส่วน $1 : 1$ ดังนั้นการไม่เป็นสัดส่วนคือ มีปริมาณ Zn ต่อ O ไม่เป็น หนึ่งต่อหนึ่ง

การที่สารมีการนำไฟฟ้าเป็นชนิด n (n-type) อันเนื่องมาจาก อินเทอร์สติเชียลของอะตอม ตัวหนึ่ง และแวกแคนซีของอะตอมอีกตัวหนึ่ง เป็นเช่นนั้นเพราะ

สาเหตุจากอินเทอร์สติเชียลของอะตอม กล่าวคือ การที่อะตอมไปแทรกอยู่ในโครงสร้าง ผลักที่อะตอมบริเวณนั้นสร้างพันธะเรียบร้อยแล้ว อะตอมอินเทอร์สติเชียลจะไม่สามารถไปสร้าง

พันธะได้ ซึ่งวาเลนซ์อิเล็กตรอนของอะตอมที่มาแทรกมีสองตัวเมื่อได้รับพลังงานในระดับหนึ่งก็สามารถหลุดออกมาได้ บวกกับถ้าสารตัวนี้เป็นโลหะจะมีความนำไฟฟ้าอยู่แล้วด้วย ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ภาพแสดงลักษณะการแทรกตัวของอะตอม

สาเหตุจากแวนแวนซ์ของอะตอม เกิดขึ้นอันเนื่องจากการที่ อะตอมหลุดไปนั้นปกติอะตอมผู้ให้จะเป็นผู้ให้อิเล็กตรอนแก่ออกซิเจน ในการเกิดพันธะเมื่ออะตอมผู้รับหลุดออกไป อะตอมตัวให้ จะได้อิเล็กตรอนคืนมา ซึ่งไม่มีอะตอมจะให้อิเล็กตรอนให้จึงเปรียบเสมือนแทรกปลัดจับอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 2.19 คือ ที่อุณหภูมิ 0 K อิเล็กตรอนยังอยู่ในระดับพลังงานแตรปแต่เมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้องก็จะเข้าสู่ conduction band



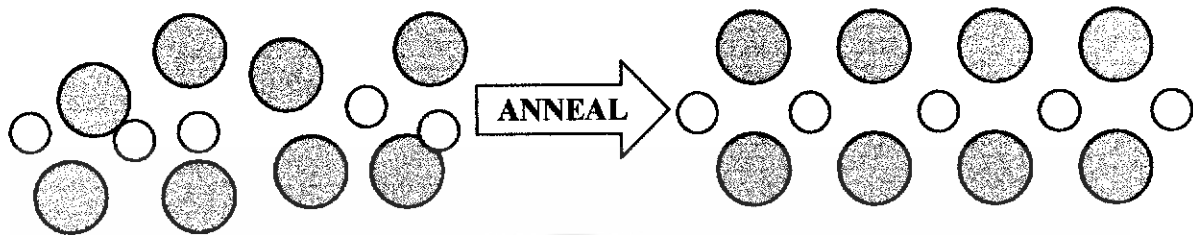
รูปที่ 2.19 ภาพแสดงลักษณะการเกิดแตรป ในแวนแวนซ์ของอะตอมผู้รับ

2.10 การแอนนัล (anneal)

ในการปลูกฟิล์มบางด้วยกรรมวิธีอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสนั้นเมื่อเราปลูกเสร็จแล้ว จะมีการนำฟิล์มบางที่ได้ไปเข้ากรรมวิธีการแอนนัลโดยการนำฟิล์มบางเข้าเตาแอนนัลซึ่งจะมีการใส่แก๊สเข้าไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ โดยแบ่งการแอนนัลได้ดังนี้

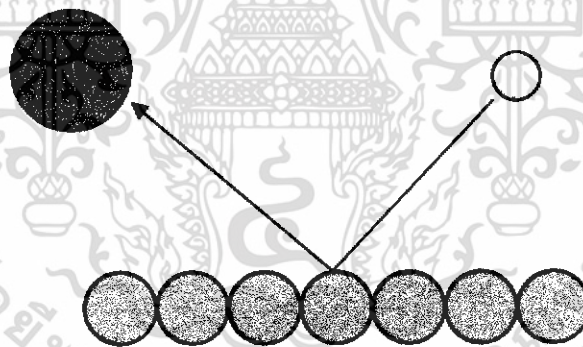
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1 การแอนนีกในไนโตรเจน 100%



การแอนนีกในไนโตรเจน นั้นเหตุที่ใช้ไนโตรเจนเนื่องจากไนโตรเจนไม่ทำปฏิกิริยากับฟิล์มที่เรานำมาแอนนีกเพราะไนโตรเจนมีความเสถียรสูง หากนำฟิล์มบางแอนนีกในบรรยากาศปกติ แก๊สในอากาศอาจเจือปนลงฟิล์มบางได้จากรูปร่างบนการแอนนีกจะไปปรับโครงสร้างอะตอมของฟิล์ม ปรับโครงสร้างดังกล่าวเกิดจากการให้ความร้อน

2.10.2 การแอนนีกในไนโตรเจนกับไฮโดรเจน 5%



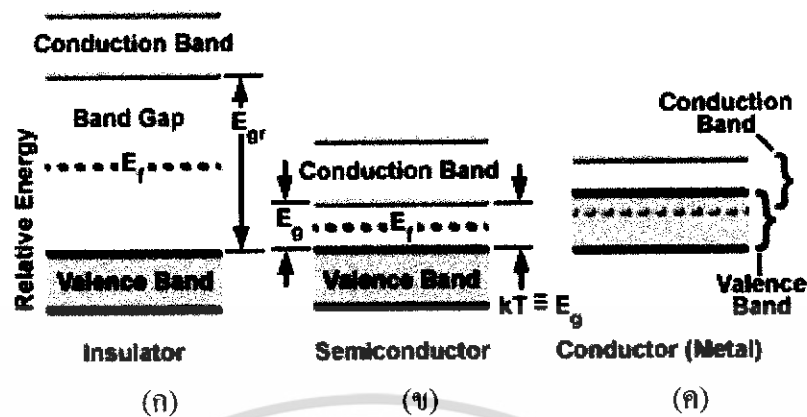
การแอนนีกในไนโตรเจนกับไฮโดรเจน 5% นั้นนอกจากจะไปปรับโครงสร้างอะตอมด้วยความร้อนแล้วยัง มีการจับออกซิเจนจากฟิล์มบางออกด้วยการที่อะตอมไฮโดรเจนลอยเข้าไปจับออกซิเจนที่อยู่บนฟิล์มบาง ซึ่งผลออกมาจะเป็นลักษณะของโมเลกุลของน้ำและจะไหลออกไปด้วยแรงดันของไนโตรเจนที่เราฉีดเข้าไป

2.11 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และในบทนี้จะกล่าวถึงนิยามของการเกิดสีของผลึก ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กทรอนิกส์ ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของ ZnO ทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของการดูดกลืนแสง การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient) ของสารกึ่งตัวนำ และนำมาทำการคำนวณขนาดช่องว่างของแถบพลังงาน

2.11.1 การเกิดสีของผลึก [Kittel, 1971; งามนิตย์, 2543; จูตินัย, 2546]

โดยทั่วไปมักนิยมใช้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานในการแบ่งแยกชนิดของสารต่างๆ ว่าเป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำหรือตัวนำ เป็นต้น ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.20 ซึ่งประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) สำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม และยังมีแรงทางไฟฟ้าสถิตดึงดูดมายึดเหนี่ยวไว้ ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อย และแถบนำ (conduction band) ซึ่งจะว่างสำหรับฉนวน ที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ส่วนตัวนำมีอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนแล้วระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย และเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณต้องห้าม (forbidden region หรือ forbidden gap) ซึ่งจะเรียกขนาดความกว้างของช่องนั้นว่าแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ขนาดของ E_g นำมาใช้แบ่งแยกสารชนิดต่าง ๆ นั้นเอง เช่น ฉนวนจะมี $E_g > 3$ eV สารกึ่งตัวนำจะมี $E_g < 3$ eV และตัวนำมีแถบวาเลนซ์ และแถบนำซ้อนเหลื่อมกันอยู่ เป็นต้น ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะเรียกว่า ขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge หรือ band edge) ซึ่งบอกขนาดด้วยค่า E_g นั้นเอง



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะของแถบพลังงานของสารชนิดต่าง ๆ

(ก) ฉนวน

(ข) กึ่งโลหะ

(ค) โลหะ

นอกจากนี้ค่า E_g ยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ของสาร ตลอดจนการมีสีของผลึกด้วย การมีสีของผลึก อิเล็กตรอนไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อที่จะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้ หรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง ดังนั้นพลังงานโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่าน ออกจากผลึกทำให้เราสามารถมองเห็นผลึกมีสีตามย่านความยาวคลื่น ถ้าพิจารณาฟิล์มบางของสารตัวอย่างมีความหนา d เมื่อฉายแสงตกกระทบฟิล์มบางของสารตัวอย่างมีขนาดของความเข้มแสงเท่ากับ I_0 แล้ววัดขนาดของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบางของสารตัวอย่างเป็น I_t ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ต่อจากนั้นเราจะหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient : α) ได้จากสมการที่ (2.6) และสามารถหาค่า E_g ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืน กับพลังงานโฟตอนได้นอกจากนี้เรายังสามารถทราบถึงชนิดของโครงสร้างแถบพลังงานด้วย ซึ่งเป็นที่นิยมใช้งานกันมากดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

$$I_t = I_0 \exp(-\alpha d) \quad (2.6)$$

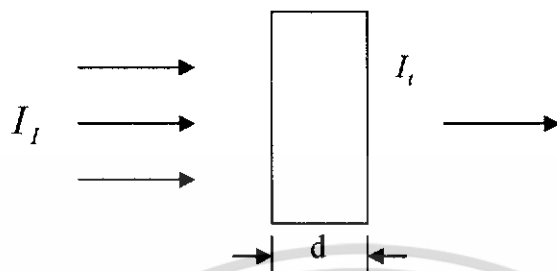
เมื่อ I_t คือ ปริมาณของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง

I_0 คือ ปริมาณความเข้มแสงที่ถูกตกกระทบสารตัวอย่าง

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d

นอกจากนี้การทำให้ผลึกมีสียังสามารถทำได้อีกหลายวิธี ทั้งนี้จะต้องอาศัยหลักการพื้นฐานดังกล่าวมาข้างต้น คือการสร้างสถานะพื้นฐานที่ทำหน้าที่ เป็นศูนย์กลางการเกิดสีของผลึก (color centers) ขึ้นมาภายในช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง คือ

1. การเจืออะตอมของธาตุบางชนิดเข้าไปในผลึก เช่น ผลึก Al_2O_3 เป็นผลึกไม่มีสี เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr^{3+} จะเข้าไปแทนที่ไอออน Al^{3+} ทำให้เกิดศูนย์กลางการเกิดสีจึงทำให้ผลึกที่ได้มีสีแดงเข้มหรือที่เราเรียกว่า หับทิม (ruby) แต่เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ti เพียงแค่ 0.5% ไอออน Ti^{3+} จะเข้าไปแทนที่ไอออน Al^{3+} ทำให้เกิดศูนย์กลางการเกิดสีจึงทำให้ผลึกที่ได้มีสีน้ำเงินที่เราเรียกว่า แซฟไฟร์ ได้แก่ มรกต บุษราคัม นิล เป็นต้น

2. การระดมยิง (bombard) ด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา รังสีอัลตราไวโอเล็ต จะทำให้เกิดสถานะพลังงานที่เป็นกับดัก (trap state) ของอิเล็กตรอน หรือ โฮล ซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสี

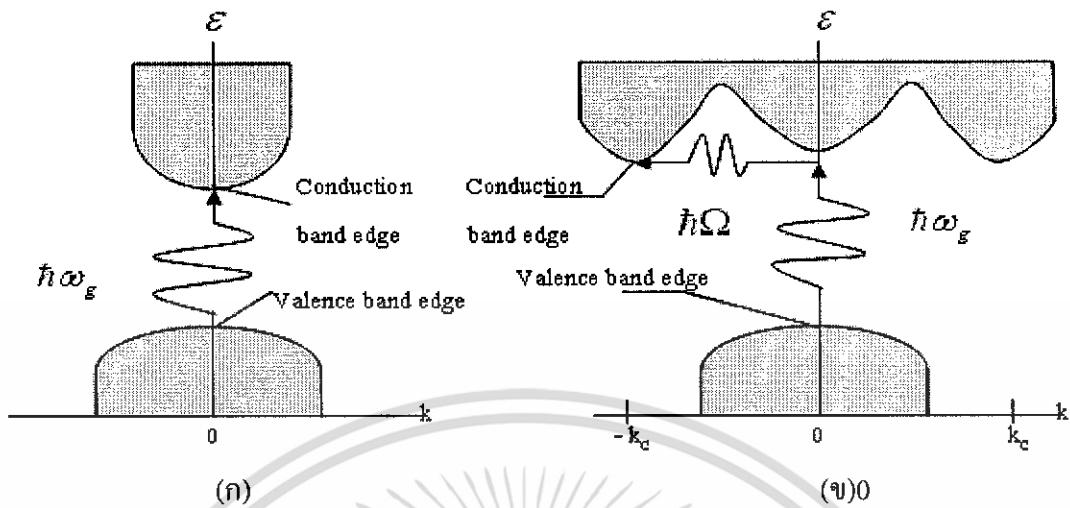
3. การทำให้เกิดการตกตะกอนสะสมของโลหะที่มีลักษณะเป็นผงอนุภาคจะละเอียดมาก ขึ้นบนผิวหน้าของผลึกจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีขึ้น คือ เมื่อมีแสงตกกระทบจะเกิดการกระเจิงกับอนุภาคเหล่านั้น จึงทำให้เราเห็นผลึกมีสีได้

2.11.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน [kittel, 1971; งามนิศย์, 2543; ฐิตินัย, 2546]

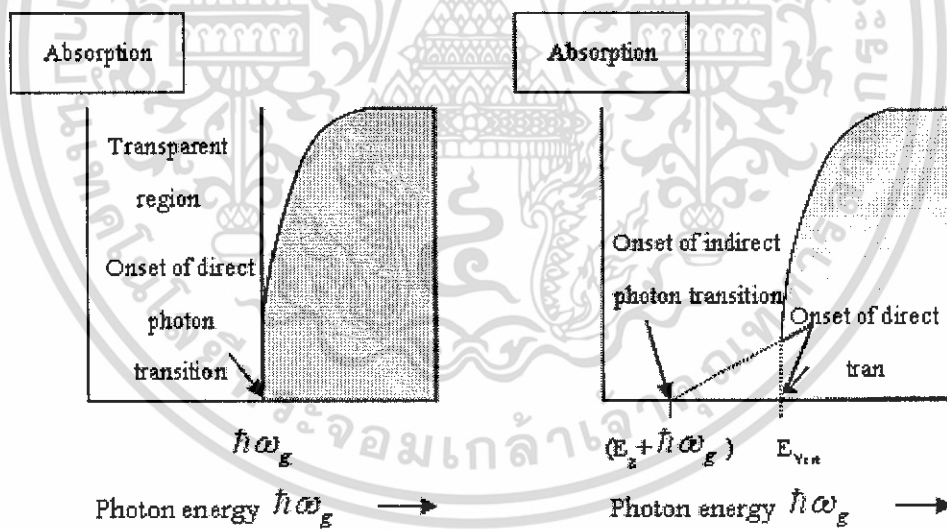
โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมี 2 แบบ คือ แบบตรง (direct band gap) กับแบบเฉียง (indirect bandgap) โดยในรูปที่ 2.22 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำ กับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ที่ตำแหน่งของ เวกเตอร์คลื่น (wave vector) ค่าเดียวกัน หรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มี โมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงาน โฟตอนที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าขนาดของ ช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงาน โฟตอนนั้น และอยู่ในสภาวะถูก กระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็น อิเล็กตรอนและ โฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือ ทำลายโฟนอน เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอนกับพลังงาน โฟตอนจะได้ กราฟดังรูปที่ 2.23 (ก) ส่วนโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง (indirect band gap) คือ โครงสร้าง แถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ ตำแหน่งที่มี โมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงาน โฟตอนที่มีค่า มากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้ มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น เมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงาน โฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณี ที่มีการทำลายโฟนอน ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) นั่นคือ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้าย สถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω ซึ่งจะมีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมาจึงเกิดการสร้าง โฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และอิเล็กตรอนและ โฮลอิสระ (E_{ver}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังนี้แสดงในรูป ที่ 2.22 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟนอน กับ พลังงาน โฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.23 ส่วนกระบวนการทำลายล้าง โฟนอนมักเป็นกระบวนการที่ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ซึ่ง โครงสร้างผลึกดูดกลืนพลังงานความร้อนแล้วอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นเกิด การสั่น และสร้างโฟนอนขึ้นมา ดังนั้นอิเล็กตรอนจะดูดกลืน โฟนอน แล้วตามด้วยกระบวนการ ดูดกลืนพลังงาน โฟนอนมีค่าเท่ากับ $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$ อิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้นจะย้าย สถานะพลังงาน จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและ โฮลอิสระต่อไป



รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของ อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)
 (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



รูปที่ 2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับ พลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)
 (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงกรณีที่เกิดกระบวนการ สร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.3 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง[สิงหเดช, 2539]

จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์ เมื่อพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ไปในตัวกลางที่มีค่าสภาพของแม่เหล็ก (μ) = 1 จะได้สมการคลื่นเป็น

$$E = E_0 \exp[i(k * r - \omega t)] \quad (2.7)$$

$$H = H_0 \exp[i(k * r - \omega t)] \quad (2.8)$$

เมื่อ	E	คือ สนามไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูด E_0
	H	คือ สนามแม่เหล็กที่มีแอมพลิจูด H_0
	K	คือ $k_1 + ik_2$ เป็นเวกเตอร์คลื่น
โดยที่	k_1	คือ เวกเตอร์จริง k_2 คือ เวกเตอร์จินตภาพ หรือ $k * k = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \omega^2 = \epsilon \omega^2 / c^2$
	ϵ	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
	c	คือ ค่าความเร็วแสง
	t	คือ เวลา

แต่การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางจะแตกต่างจากอากาศ เนื่องจากแสงได้รับอิทธิพลของประจุไฟฟ้าในตัวกลางมีผลทำให้ความเร็วคลื่น และความเข้มของการแผ่รังสีเปลี่ยนแปลงไปโดยพิจารณาจากดัชนีหักเหเชิงซ้อนดังนี้

$$N = n - iK \quad (2.9)$$

โดยที่	n	คือ ดัชนีหักเห
	N	คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียมวล(extinction coefficient)

สำหรับคลื่นเอกพันธ์จะได้ว่า

$$|k_1| = n\omega / c \quad (2.10)$$

$$|k_2| = K\omega / c \quad (2.11)$$

แทนสมการที่ (2.10) ลงในสมการที่ (2.11) จะได้สนามไฟฟ้าในทิศ x เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_x = E_{0x} \exp[i\omega(n\pi/c - t)] \exp(-\omega kx/c) \quad (2.12)$$

เมื่อ E_x คือ สนามไฟฟ้าในทิศทาง x

E_0 คือ สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดในทิศทาง x

จากสมการที่ (2.12) แสดงถึงคลื่นแสงผ่านตัวกลางในทิศทาง x ด้วยความเร็ว c/n ซึ่ง E จะลดลงด้วยปริมาณ $\exp(-\omega kx/c)$ และความเข้มของการแผ่รังสีจะมีค่าเปลี่ยนแปลงดังสมการ

$$I \propto EE^* \quad (2.13)$$

ดังนั้นจะได้

$$I \propto E_0^2 \exp(-2\pi kx/c) \quad (2.14)$$

หรือ

$$I = I_0 \exp(-4\pi kx/\lambda)$$

$$I = I_0 \exp(-\alpha X) \quad (2.15)$$

โดยที่

$\alpha = 4\pi kx/\lambda$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 I คือ ความเข้มแสงที่ระยะทาง x
 I_0 คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ
 λ คือ ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ (nm)

จากสมการที่(2.14) เขียนได้ใหม่เป็น(2.15)

$$\alpha = \frac{1}{I} \left(\frac{dI}{dX} \right) \quad (2.16)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.16) คือ อัตราการลดลงของความเข้มแสงต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง

2.11.4 การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำ

[Abelas, 1972; สิงห์เดช, 2539; งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังแถบนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มากกว่าขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของช่องว่างแถบพลังงาน การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนมีหลายชนิดด้วยกัน โดยการพิจารณาจากโครงสร้างแถบพลังงานเป็นหลัก ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานแบบตรงดังแสดงในรูปที่ 2.22(ก) โดยสารกึ่งตัวนำ ZnO มีการย้ายสถานะในกรณีนี้ และการย้ายสถานะพลังงานแบบต้องห้ามโดยสองแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าออปติคอลเมตริกซ์อิลิเมน (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่กล่าว คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้ามและถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำเราจะประมาณได้ว่าแถบพลังงานมีรูปร่างเป็นพาราโบลา และสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืน เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานทั้งแบบยินยอม และแบบต้องห้ามได้ ดังนี้คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$\begin{aligned}(\alpha_{hv}) &= \frac{s\hbar}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} |H_{cv}(0)|^2 (hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \\ &= A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}}\end{aligned}\quad (2.17)$$

การย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$\begin{aligned}(\alpha_{hv}) &= \frac{s\hbar}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{\frac{5}{2}} |H_{cv}(0)|_{k=0}^2 (hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \\ &= A(hv - E_g)^{\frac{3}{2}}\end{aligned}\quad (2.18)$$

- โดยที่ μ คือ มวลลดทอน (reduced electron-hole mass)
 H_{cv} คือ ออปติคอลเมตริกซ์อิลิเมน (optical matrix element) ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำ
 E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน
 $h\nu$ คือ พลังงาน โฟตอน
 n คือ ดัชนีหักเห

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.5 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

[Abelas, 1972; สิงหเดช, 2539; งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546]

สำหรับการทดลองของเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำได้จากการวัดการส่งผ่านของ (transmission : %T) แสงผ่านสารตัวอย่างโดยที่พิจารณาจากแสงที่ตกกระทบ (I_i) บนสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d และแสงที่ส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง (I_t) ซึ่งเป็น ฟังก์ชันกับความยาวคลื่น (λ) ค่าการสะท้อนและส่งผ่านของแสงจะหาได้จากสมการดังนี้

$$T = \frac{I_t}{I_i} = (1 - R)^2 \exp(-\alpha d) / [1 + R^2 \exp(-2\alpha d)] \quad (2.19)$$

$$R = \frac{I_r}{I_i} = [(n-1)^2 + K^2] / [(n+1)^2 + K^2] \quad (2.20)$$

- โดยที่ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน
 α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 I_i คือ ความเข้มของแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบาง
 I_r คือ ความเข้มของแสงที่ตกกระทบฟิล์มบาง
 d คือ ความหนาของฟิล์มบาง
 n คือ ดัชนีหักเหของฟิล์มบาง
 K คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

ถ้าสารตัวอย่างมีความหนามากพอที่ $R^2 \exp(-2\alpha d)$ ค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการ (2.19) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$T = \frac{I_t}{I_i} = (1 - R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (2.21)$$

ในการทดลองการดูดกลืนแสงนั้น การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าเทอม $(1 - R)^2$ มีค่าคงที่ และสมการที่(2.21) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\alpha = \ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right) \quad (2.22)$$

ค่าคงที่สมการที่(2.2)ยังคงมีผลของความเข้มแสงที่สะท้อนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยจึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในการทดลองต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (α) ที่เกิดจากความบกพร่องมาลบออกจากค่า α จึงจะได้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง ซึ่งเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำเท่านั้นเพื่อให้ง่ายขึ้น ในทางปฏิบัติเราจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสมการ (2.22) และเราสามารถหา E_g ได้จากสมการที่ (2.17) หรือ (2.18) หรือทำได้โดยการลากเส้นตรงโดยประมาณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha)^2$ กับ $h\nu$ ตรงส่วนของกราฟที่มีลักษณะเป็นแบบ เชิงเส้นมาตัดกับแกนพลังงานโฟตอน ($h\nu$) จุดตัดกราฟจะเป็นค่า E_g นั้นเอง และลักษณะของกราฟจะแสดงให้เห็นว่าสารกึ่งตัวนำนั้นมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงหรือแบบเฉียง ดังที่แสดงอยู่ในรูป 2.23 (ก) และ (ข)

2.11.6 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง [10,11]

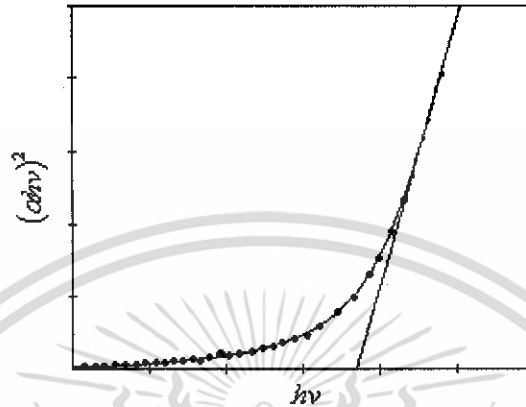
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าช่องว่าง แถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำสัมพันธ์กับการส่งผ่านแสง จากรูปที่ 2.24 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยทั่วไปจะไม่คิดการสะท้อน เนื่องจากมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจะได้

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.23)$$

ดังนั้น

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.24 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานที่มีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ที่จะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอการดูดกลืนแสงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha hv)^2 = A(hv - E_g) \quad (2.25)$$

และ

$$(\alpha hv)^{\frac{1}{2}} = B(hv - E_g) \quad (2.26)$$

เมื่อ A และ B คือ ค่าคงที่

สมการ (2.25) ใช้กับสารกึ่งตัวนำที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

สมการ (2.26) ใช้กับสารกึ่งตัวนำที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

2.12 สมบัติทางไฟฟ้า

จากทฤษฎีการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะมีช่องว่างแถบพลังงานซึ่งช่องว่างแถบพลังงานของ Zn มีค่า 3.37 eV เมื่อมีพลังงานมากระตุ้นซิงค์ (Zn) และเมื่อพลังงานนั้นมีค่าน้อยกว่าช่องว่างระหว่างพลังงานของ Zn ซึ่งไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นก็จะเกิดพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำน้อย ซึ่งสภาพการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำต้องขึ้นอยู่กับปริมาณของพาหะอิสระที่เกิดขึ้น

2.12.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล [4,7-8]

เมื่อมีสนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานจะถูกกระตุ้นเพื่อตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ เกิดการไหลของไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งจากทฤษฎีของโอห์ม สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field : E)

เมื่อค่า $\mu = v_d / E$ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในแถบพลังงานคือ

$$\sigma = nq\mu_n + nq\mu_p \quad (2.27)$$

และ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.28)$$

เมื่อ

μ_n, μ_p คือ สภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล

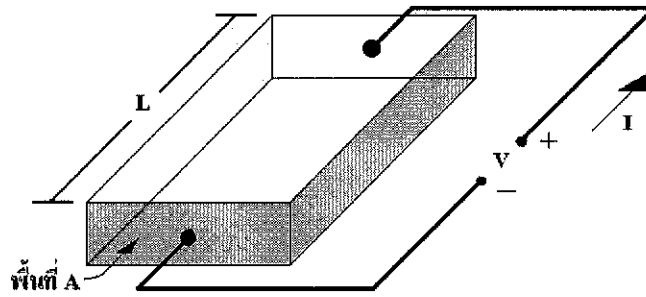
n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) คือ ส่วนกลับของสภาพการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำซึ่งหาได้จากสมการ

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงการให้แรงดันกับสารตัวอย่าง

ถ้ามีแท่งสารตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งให้แรงดันกระแส I แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.30)$$

และ

$$E = \frac{V}{L} \quad (2.31)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.28) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{L} \right) \quad (2.32)$$

หรือ

$$V = \left(\frac{L}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho L}{A} \right) I = IR \quad (2.33)$$

2.12.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [4,10]

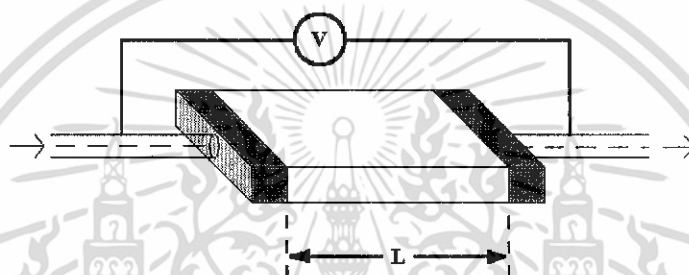
วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ต้องเอาอุปกรณ์ไปสัมผัสชิ้นสารและไม่ต้องนำอุปกรณ์ไปสัมผัสกับชิ้นสารที่ต้องการวัด ส่วนวิธีที่กล่าวนี้เป็นวิธี ที่นำอุปกรณ์ไปสัมผัสกับชิ้นสารซึ่งทำโดย ผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารแล้ววัดความต่างศักย์ ที่เกิดขึ้นระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสาร

2.12.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดตรง (direct resistivity method) [4-10]

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัด

โดยตรงนี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารแล้วถึงมาคิดความยาว และพื้นที่หน้าตัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารที่ต้องการ การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นถึงค่อยให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่งขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.26 จากค่าที่ทราบคือ กระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ นำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ L เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.26 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดตรง

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.34)$$

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{L} \right) \quad (2.35)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วมาก แต่ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงอีกหลายองค์ประกอบด้วย

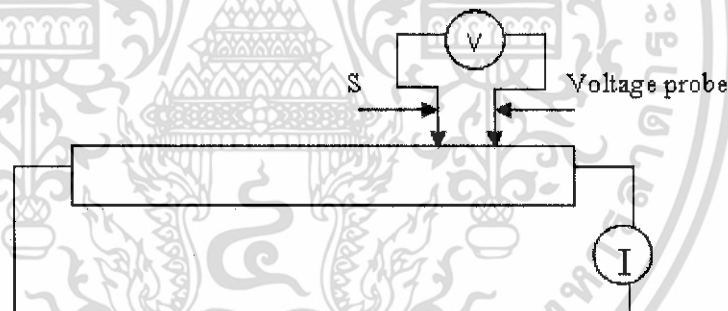
ถ้ากลับมาพิจารณาถึงกรณีที่วัดโดยตรงนี้ จะพบว่าความถูกต้องแน่นอนในการวัดขึ้นอยู่กับว่าบริเวณผิวสัมผัสตรงที่กระแสไหลเข้าและไหลออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่ได้มี คุณสมบัติโอห์มมิกที่ดี แสดงว่าจะต้องมีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้า(หัวและท้าย) เกิดขึ้นด้วยค่าความต้านทาน R ที่วัดได้เป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงๆของสารกึ่งตัวนำจะต้องน้อยกว่าที่วัดออกมาแน่นอน ส่วนที่สองขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทาน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด ถ้าหากความต้านทานของทั้งสองนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าที่ได้จะไม่ถูกต้องโดยจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่เป็นจริงซึ่งหมายถึงความต้านทานจำเพาะของสารจะมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติแล้วจะคำนึงถึงเรื่องผิวสัมผัสโอห์มมิก มากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เพราะที่ผิวสัมผัสจะดี(กรณีเป็น โอห์มมิก)หรือไม่ดี(ไม่เป็น โอห์มมิก)นั้น จะตรวจสอบได้ยากมากจึง แก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มาก เพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์สูงๆ(เท่าที่จะหาได้) ถ้าทำเช่นนี้ค่าของความผิดพลาดจะน้อยมาก

2.12.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว (two point probe method) [4-10]

วิธีวัดจะกระทำโดยการวางขั้วสัมผัสของโวลต์มิเตอร์ไปบนแท่งของสารกึ่งตัวนำที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อจะวัดได้เปรียบเทียบ ณ ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยให้ห่างจากรอยต่อโลหะ (ที่ทำขั้วไฟฟ้า) กับสารกึ่งตัวนำพอสมควร วิธีนี้จะขจัดปัญหาเรื่องความต้านทานที่รอยต่อได้ ถ้าพื้นที่หน้าตัดของ สารกึ่งตัวนำที่ใช้วัดมีค่าคงที่และแสงไฟฟ้าที่ใช้มีค่าไม่สูงนัก เพื่อป้องกันไม่ให้สารกึ่งตัวนำร้อนขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป และโวลต์มิเตอร์ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูง(high impedance) ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามปล่อยให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้องอีกทั้งในการวัดทุกครั้ง จะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวระหว่างจุดที่กำลังจะวัดค่า ความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equipotential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

lines) โดยการวัดที่บริเวณตรงจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมคักซ์นั้นสม่ำเสมอ(ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้า-ออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $L/A > 3$ เมื่อ L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแส ข้อที่ควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ โครงสร้าง ทางผลึกว่ามีโครงสร้างชนิดใดเป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของ การวัดว่ากำลังวัดอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้สามารถแยกสภาพด้านทานฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

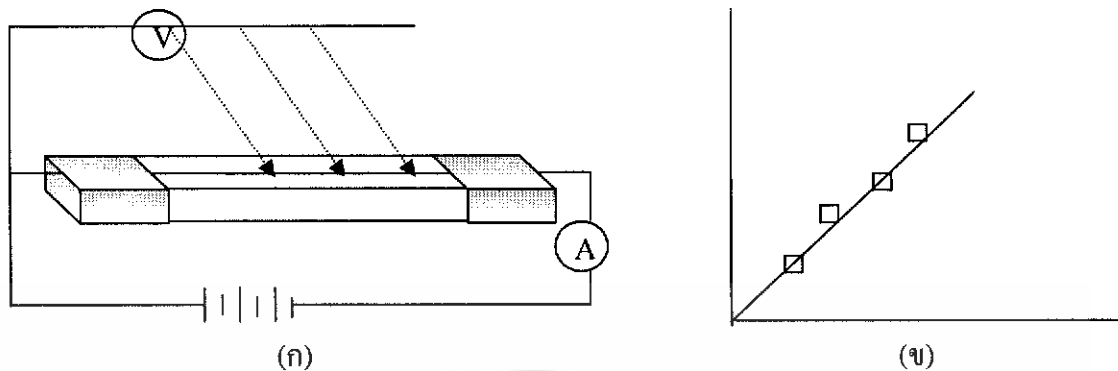
สรุปข้อแนะนำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะแบบสองขั้วเชิงเส้น

- วัดศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่างและห่างจากบริเวณกระแสเข้า-ออกพอสมควร
- โลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าบนสารตัวอย่างนั้น จะต้องเป็นโลหะแข็งและนำไฟฟ้าได้ดี เช่น ทังสเตน เงิน พลาตินัม เป็นต้น
- ขณะที่ทำการวัดสารตัวอย่าง จะต้องทราบระนาบหรือทิศทางของผลึกสารตัวอย่างว่า กำลังวัดอยู่ในระนาบหรือทิศทางใดของสารตัวอย่าง
- ผลึกที่ทำการวัดจะต้องมีความสมบูรณ์ไม่เกิดขอบเขตของเกรน (grain boundaries) ที่ผิว และมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งก้อนผลึก

ข้อแก้ไข

- ควรทำการวัดหลายๆจุดและต้องมีความระมัดระวังเพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ซึ่งจะส่งผลไปถึงปรากฏการณ์ภายในสารตัวอย่าง
- ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าควรจะให้สั้นเพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นสมคักซ์
- วัดบนสารตัวอย่างที่ใหญ่และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะไปด้วยวิธีตรงที่ขั้วหนึ่งและอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะแล้วนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น

(ก) แสดงการวัดแบบสองขั้วเชิงเส้น โดยวิธีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

(ข) แสดงกราฟที่ได้จากการวัดโดยวิธีเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.12.2.3 วิธีวัดด้วยปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point method)[4-10]

วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น เป็นวิธีที่ใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่แพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับมากในวงการอุตสาหกรรมวิธีนี้ได้ใช้กันมานานประมาณ 70 กว่าปีมาแล้ว ซึ่งปัจจุบันก็ยังนิยมใช้กันอยู่ เป็นวิธีที่ดีและไม่ทำลายสารตัวอย่างที่นำมาวัด อันที่จริงแล้วปัญหา 2 จุด และ 4 จุด คล้ายๆกัน คือ ปัญหาที่จุดสัมผัสระหว่างขั้วต่างๆ ดังนั้นวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นนี้ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งด้านให้กระแสเข้า-ออก ตลอดจนขั้วที่วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะอยู่บริเวณผิวหน้าของสารตัวอย่างซึ่งเป็นโลหะแข็ง โดยทั่วไปจะใช้เส้นลวดโลหะทั้งสแตนเลสที่มีลักษณะเส้นเล็ก และแหลมวางเป็นแนวเส้นตรงระยะห่างกันจัดให้เท่ากันหมดหรือในบางครั้งอาจจะวางขั้วห่างไม่เท่ากัน ในบางกรณีที่สำคัญจะต้องทราบระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าที่แน่นอน

หากจะทำการวิเคราะห์ให้ใครมาซึ่งค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะพอจะมีแนวความคิดได้ดังนี้ เนื่องจากหลักการวิเคราะห์จริงๆ แล้วจะใช้การหาค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยสมการพัวซองในที่นี้จะกล่าวเพียงแนวความคิดที่ได้มาของสูตรคำนวณหาความนำไฟฟ้าจำเพาะเท่านั้น

ค่าความต้านทานจำเพาะโดยทั่วไปแล้วจะหาได้จากกระแสที่เข้าไปในสารตัวอย่างและวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง วิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ามีข้อจำกัดในการวัดกระแสจะต้องให้ลักษณะสม่ำเสมอภายในสารตัวอย่าง จุดอ่อนนี้เองจึงได้มีการพัฒนาวิธีการวัดความต้านทานเฉพาะ ด้วยวิธีหลายขั้วไฟฟ้า ดังนั้น สูตรในการคำนวณจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อความเหมาะสม ดังจะแสดงให้เห็นต่อไป

ในการวัดความต้านทานจำเพาะโดยสี่ขั้วเชิงเส้นนี้มีข้อจำกัดอยู่ด้วยกัน 2 ข้อ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ขั้วทั้งสองต้องมีลักษณะ มีพื้นที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสสารตัวอย่างเท่ากันหมด ลวดที่ใช้ทำ ขั้วไฟฟ้าจะต้องเป็นโลหะมีความต้านทานไฟฟ้าน้อย

2. สารตัวอย่างตรงบริเวณขั้วทั้งสองจะจะต้องสม่ำเสมอทั่วบริเวณ ไม่เกิดรูกลวงด้านใน และจะคิดว่า การกระจายของกระแสเป็นไปในลักษณะครึ่งวงกลม โดยอาศัยหลักแห่งไฟฟ้าสถิตเมื่อมีการฉีดกระแสเข้าไปในสารตัวอย่างจะสามารถหาศักย์ที่เกิดขึ้นภายในสารตัวอย่างที่ระยะใดๆ

$$\text{ได้} \quad V = \frac{K}{r} \quad (2.36)$$

เมื่อ r คือ ระยะใดๆที่จะหาศักย์เมื่อเทียบกับจุดที่ให้กระแสและ K คือค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของกระแสที่ฉีดเข้าไป และรูปร่างของสารตัวอย่าง นอกจากนี้ยังสามารถหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในได้จาก

$$E = -\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right) = \frac{K}{r^2} \quad (2.37)$$

เนื่องจากขั้วทั้งสองไม่อยู่ห่างกันมาก ดังนั้นจึงคิดได้ว่าการไหลของกระแสจะมีค่าสม่ำเสมอจากความสัมพันธ์เบื้องต้นจะได้ความหนาของกระแส J คือ

$$J = qn \mu E \quad (2.38)$$

โดยคิดว่า $\left(\frac{\partial n}{\partial r}\right) = 0$ หมายความว่า ความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการแพร่มีน้อยมากและสม่ำเสมอทั่วระยะ r โดยกำหนด n คือ ความหนาแน่นของพาหะ μ คือ สภาพคล่องพาหะและ q คือประจุไฟฟ้า

จากสมการ J สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสภาพต้านทานไฟฟ้าจะได้

$$J = \left(\frac{E}{\rho}\right) \quad (2.39)$$

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในขั้นต้น การกระจายของกระแสเป็นลักษณะครึ่งวงกลม ดังนั้นจะหากระแส I รวมทั้งหมดคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = J * A = \left(\frac{E}{\rho} \right) * 2\pi r^2 \quad (2.40)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ผิวของครึ่งวงกลม รัศมี r

นำสมการ E แทนในสมการ I จะได้ค่าคงที่ K คือ

$$K = \left(\frac{I\rho}{2\pi} \right) \quad (2.41)$$

และนำค่าคงที่ K นี้แทนในสมการ V จะได้รูปทั่วไป

$$V = \left(\frac{\rho I}{2\pi r} \right) \quad (2.42)$$

สมการ V เป็นสมการพื้นฐานสำหรับใช้วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าชนิดลึขั้วที่คิดว่าสารตัวอย่างมีขนาดใหญ่และหนามาก ส่วนถ้านำมาใช้เป็นสารตัวอย่างที่มีขนาดบาง d จะได้สมการซึ่งแก้ไขแล้ว ดังนี้

$$V = \left(\frac{\rho l \ln 2}{\pi d} \right) \quad (2.43)$$

สรุปการนำสมการ V ไปใช้งานให้พิจารณาความหนาของสารตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.28

2.12.3 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ[12-14]

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้น มีที่โดดเด่นอยู่ในแต่ละช่วงอุณหภูมิสองแบบด้วยกัน โดยในช่วงอุณหภูมิสูงการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณของ Seto ในแบบจำลองนี้ประจุจะถูกดักจับไว้ที่ขอบเขตของเกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นในบริเวณเกรนซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้เกิดกำแพงศักย์ที่ขอบเขตของเกรน หรือไม่ก็เกิดการขยายตัวของเขตปลอดพาหะหรือเพียงบางส่วน ซึ่งขึ้นกับขนาดของความหนาแน่นของระดับพลังงานของกับดักประจุ, ระดับพลังงานของสารเจือ, ขนาดของเกรนและความยาวเดออร์บายน์ ซึ่งความสูงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงแก้งจะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าที่เป็นแบบเทอร์มิโอนิกอิมิสชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^{-\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{\Phi_b}{kT}\right] \quad (2.44)$$

เมื่อ Φ_b คือ ค่าแรงแก้งศักย์
 A คือ ค่าคงที่
 T คือ อุณหภูมิเป็นองศาเคลวิน
 k คือ ค่าคงที่ของโบลซ์ทมานน์ (Boltzmann's constance)

และในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้นการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของ Mott ซึ่งจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบเช่น อะมอร์ฟัส เรียกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดดเป็นช่วงๆ (variable-range hopping) ซึ่งจะโดดเด่นในช่วงที่สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบ การนำไฟฟ้าแบบนี้โดดเด่นในช่วงอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากโฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียง และพาหะจะเคลื่อนที่ลักษณะคล้ายการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกันซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึก พหุพันธ์นั้นที่อุณหภูมิต่ำ พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของเกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน ซึ่งที่ขอบเขตของเกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกับดักประจุซึ่งเกิดจากความไม่เป็นระเบียบของอะตอม หรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะเคมีซึ่งกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma T^2 = A \exp\left[-\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}}\right] \quad (2.45)$$

เมื่อ T_0 คือ อุณหภูมิเริ่มต้นเป็นองศาเคลวิน

2.12.4 การวัดสภาพต้านทานแบบแวนเดอร์เพาว์ [4-10]

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชั้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส (nonblocking contact)



รูปที่ 2.29 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่าง

รูปที่ 2.30 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.46)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.47)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.47)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.48)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

โดย

$$f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.49)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.50)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์จะให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ โดยจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวนี

1. ขั้วไฟฟ้าต้องมีสมบัติที่ดี เพื่อลดปัญหาเรื่องความต้านทานบริเวณรอยต่อ และไม่ให้เส้นสมศักย์ (equipotential) บิดเบี้ยว (distorted) โดยรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำควรเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี

2. ความหนาของสารตัวอย่างจะต้องมีความสม่ำเสมอตลอด และเนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรอยแตกหรือเป็นรู

3. ขั้วไฟฟ้าต้องสัมผัสที่ขอบของสารกึ่งตัวนำและต้องมีขนาดเล็กมากๆเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า คิดว่าสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่เป็นแบบกึ่งอนันต์ (semi - infinite) คือ ให้กระแสที่ไหลและค่าความต่างศักย์บนชิ้นสาร ตัวอย่างเสมือนอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน

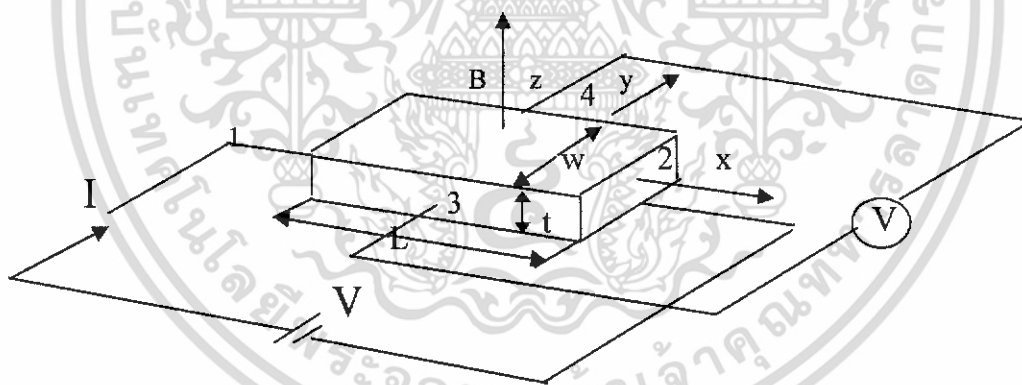
4. ไม่ควรออกแรงกดขั้วสัมผัสแรงเกินไป เพราะอาจทำให้ผิวด้านบนของสารตัวอย่างเสียหายแตกร้าวได้

5. ไม่ควรใช้กระแสไฟฟ้าสูงเกินไป เนื่องจากสารกึ่งตัวนำจะเกิดความร้อนทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน นอกจากนี้โวลต์มิเตอร์จะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) สูงๆด้วย

6. การเพิ่มความยาวเส้นรอบรูปของสารกึ่งตัวนำ จะช่วยลดปัญหาความคลาดเคลื่อนของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าได้

การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้นมีปัจจัยต่างๆเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งปัจจัยในการนำไฟฟ้านั้นคือ อัตราการส่องผ่าน (transmittance) อัตราการดูดกลืน (absorbance) ช่องว่างระหว่างพลังงาน (E_g) และขนาดของเกรน ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้มีผลต่อการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

2.13 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ [Kittel, 1971; งามนิคย์, 2543; ฐิตินัย, 2546; อารีย์, 2543]



รูปที่ 2.31 แสดงการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์

สำหรับโลหะ หรือ สารกึ่งตัวนำชนิด n หรือ p พาหะตัวนำจะมีเพียงชนิดเดียว (อิเล็กตรอน หรือ โฮล) ถ้าพาหะตัวนำมีประจุ q และสภาพเคลื่อนที่ได้ μ โดยอาศัยรูปที่ 2.31 เราพบว่าพาหะตัวนำดังกล่าวจะถูกแรงกระทำ จากทั้งสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B (ในทิศทาง $+z$) โดยอาศัยนิยามสภาพเคลื่อนที่ได้ เมื่อคิดถึงผลของสนามแม่เหล็กร่วมด้วย เราสามารถเขียนความเร็วลอยเลื่อนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{v} = \pm\mu(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.51)$$

โดยที่เครื่องหมายบวก ใช้สำหรับ โสตร และเครื่องหมายลบ ใช้กับอิเล็กตรอน

สำหรับในพิกัดฉาก $x y z$ เราสามารถเขียน $\vec{v} = v_x \hat{i} + v_y \hat{j} + v_z \hat{k}$

โดยที่

$$v_x = \pm\mu(E_x + v_y B_z) \quad (2.52)$$

$$v_y = \pm\mu(E_y + v_x B_z) \quad (2.53)$$

$$v_z = \pm\mu E_z \quad (\because B_x = B_y = 0) \quad (2.54)$$

เนื่องจาก ความหนาแน่นกระแส $\vec{J} = nq\vec{v}$ ดังนั้น ความหนาแน่นกระแส ในแต่ละแกนพิกัด (component) เขียนได้เป็น

$$J_x = \pm\mu(nqE_x + J_y B_z) \quad (2.55)$$

$$J_y = \pm\mu(nqE_y + J_x B_z) \quad (2.56)$$

$$J_z = \pm\mu nqE_z \quad (2.57)$$

ถ้าจ่ายกระแสให้กับวัสดุตัวนำ ตามรูปที่ 2.31 โดยต่อขั้วของแหล่งจ่ายไฟคร่อมด้าน 1 และ 2 จะทำให้กระแสไหลผ่านวัสดุตัวนำดังกล่าวในทิศทาง \hat{x} ดังนั้น current density ในแนว y และ z จึงเป็นศูนย์ กล่าวคือ $J_y = J_z = 0$ ดังนั้น

$$E_y = \frac{J_x B_z}{nq} \quad (\text{V/m}) \quad (2.58)$$

สมการที่ (2.58) แสดงให้เห็นว่าเกิดสนามไฟฟ้าในแนว y คร่อม ด้าน 3 และ 4 ขึ้นโดยสนามไฟฟ้า E_y นี้จะทำให้เกิดแรงกระทำต่อพาหะ โดยขนาดของแรงเท่ากับ แรงกระทำที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก B_z แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน เพื่อที่จะให้เห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ลองพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.31

โดยผ่านกระแสดังรูป อิเล็กตรอนอิสระจะถูกแรงกระทำเนื่องจากสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นเอกสารถูกผลักให้เคลื่อนที่ในแนว y สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$F_{By} = -qV_x B_z$ ทำให้ด้าน 4 ของสารกึ่งตัวนำมีประจุบวก และด้าน 3 มีประจุลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.31 ซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์ตามขวางในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall voltage : V_H) และมีสนามไฟฟ้า E ในทิศทาง $-y$ สนามนี้ทำให้เกิดแรงกระทำขนาด qE ในทิศ $+y$ ($F_E = qE_y$) หักล้างแรงจากสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ

$$F_y + F_{-y} = 0 \quad (2.59)$$

$$qE_y - qv_x B_z = 0$$

$$\therefore E_y = \frac{qv_x B_z}{q} = \frac{nv_x B_z}{nq} = \frac{J_x B_z}{nq}$$

กำหนดให้สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient : R_H) เขียนได้เป็น

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} \quad (2.60)$$

เพื่อความสะดวกในการหาค่า R_H เราจึงจำเป็นต้องเขียนให้อยู่ในเทอมของค่าที่วัดได้จากการทดลอง V_H, t (ความหนาของวัสดุที่นำมาศึกษา), I และ B_z

เนื่องจาก $V_H = V_3 - V_4 = WE_y$ (เมื่อ W คือความกว้างของวัสดุที่นำมาศึกษา) และ

$$J_x = \frac{I}{W_t}$$

(ตามนิยามของค่าความหนาแน่นกระแสในแนวแกน x)

$$\therefore R_H = \frac{V_H t}{IB_z} \quad \left(\frac{m^3}{C} \right) \quad (2.61)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.58) และ (2.59) เราพบว่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สัมพันธ์กับความหนาของพาหะตัวนำ (n) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad \left(\frac{m^3}{C} \right) \quad (2.62)$$

ดังนั้นการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ทำให้เราได้ทราบถึงค่าความหนาแน่นของพาหะประจุของพาหะ รวมถึงสภาพคล่องของพาหะ (Hall mobility : μ_H) ตามสมการ

$$\mu_H = |R_H| \sigma \quad (m^2(V.s)^{-1}) \quad (2.63)$$

เมื่อ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า

สำหรับในกรณีที่วัสดุตัวนำมีพาหะตัวนำทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอน และ โฮล เราสามารถหาสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ได้ดังนี้

เราสามารถเขียนความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน และ โฮล ในแนวแกน y ได้เป็น

$$J_y = n_h e v_{hy} - n_e e v_{ey} \quad \left(\frac{A}{m^2} \right) \quad (2.64)$$

เมื่อ v_{hy} และ v_{ey} คือ ความเร็วลอยเลื่อนของโฮลและอิเล็กตรอนในแนวแกน y โดยอาศัยสมการที่ (2.52), (2.53) เราสามารถเขียน J_y ได้ดังนี้

จากสมการที่ (2.53)
$$v_y = \pm \mu (E_y - v_x B_z)$$

$$\therefore J_y = n_h e \mu_h (E_y - v_x B_z) + n_e e \mu_e (E_y - v_x B_z)$$

$$J_y = (n_h \mu_h + n_e \mu_e) e E_y - n_h e \mu_h v_x B_z - n_e e \mu_e v_x B_z$$

จากสมการที่ (2.52)
$$v_x = \pm \mu (E_x - v_y B_z)$$

$$\therefore J_y = (n_h \mu_h + n_e \mu_e) e E_y - n_h e \mu_h B_z (\mu_h (E_x + v_{yh} B_z) + n_e e \mu_e B_z (\mu_e (E_x + v_{ye} B_z))$$

$$= (n_h \mu_h + n_e \mu_e) e E_y - n_h e \mu_h^2 B_z E_x - n_h e \mu_h^2 B_z^2 v_{yh} + n_e e \mu_e^2 B_z E_x + n_e e \mu_e^2 B_z^2 v_{ye}$$

(กำหนดให้ ขนาดของ B มีค่าน้อย ๆ จะทำให้เทอมที่ 3 และ 5 เป็น (0))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore J_y = (n_h \mu_e + n_e \omega_e) e E_y - (n_e \mu_h^2) e B_z E_x \left(\frac{A}{m^2} \right) \quad (2.65)$$

จากนั้นเราสามารถพิจารณาเงื่อนไข $J_y = 0$ (เพราะเป็นไปตามเงื่อนไขที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างด้าน 3 และ 4 ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าหักล้างกับแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก และทำให้พาหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่)

โดยอาศัยนิยามของ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{E_y}{\sigma E_x B_z}$$

โดย σ หาได้จากสมการ

$$\sigma = n_e e \mu_e + n_h e \mu_h \quad (\Omega \cdot m)^{-1}$$

และ $\frac{E_y}{E_x E_z}$ หาได้จากสมการที่ (2.65) เมื่อ $J_y = 0$

$$\text{โดยที่ } \frac{E_y}{E_x E_z} = \frac{n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2}{(n_e \mu_e + n_h \mu_h)}$$

$$\therefore R_H = \frac{E_y}{\sigma E_x B_z} = \frac{n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2}{e (n_e \mu_e + n_h \mu_h)} \quad (2.66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง ZnO:B โดยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิส โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ 17 MHz เพื่อให้สารละลายกลายเป็นไอบริสุทธิ์ พร้อมทั้งทำการศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ZnO และ ZnO:B ที่ความเข้มข้นในการเจือที่ระดับต่างๆ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ รวมทั้งทำการศึกษาระยะเวลาในการพ่นสารละลายว่ามีผลอย่างไรกับการเตรียมฟิล์มบางสำหรับ ในการศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางนั้น จะทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การวัดค่าการส่องผ่านโดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ในย่านความยาวคลื่นต่างๆ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยตรวจสอบด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าและการศึกษาสภาพคล่องของพาหะจากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

โดยจกกล่าวให้ทราบถึงรายละเอียดในการจัดเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ และวิธีการเคลือบฟิล์มบาง ZnO:B โดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสและการตรวจสอบสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ZnO:B ที่เตรียมได้ ดังต่อไปนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบาง ZnO และ ZnO:B ประกอบด้วย

1. แผ่นกระจกสไลด์ 25x75 มิลลิเมตร
2. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
3. เตาให้ความร้อนกำลังสูงสุด 6000 วัตต์
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิของ SHIMADEN รุ่น PID FP21
5. เครื่องอัลตราโซนิก
6. เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกความถี่ 17 MHz
7. เครื่องชั่งดิจิตอล
8. เตาแอนนูล
9. ก๊าซไนโตรเจน
10. สารตั้งต้น ประกอบด้วย

- ซิงค์อะซิเตรตไดไฮเดรต ($C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$)

- กรดบอริก (H_3BO_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อะซิโตน (CH_3COOH)
- เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
- เมทานอล ($\text{C}_2\text{H}_3\text{OH}$)
- น้ำปอดคประจุ (deionized water)

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง ZnO:B ด้วยวิธีการอัลตราโซนิคเพรย์ไฟโรไลซิส

3.2.1 การเตรียมแผ่นรองรับ

แผ่นรองรับที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง ZnO ด้วยวิธีการอัลตราโซนิคเพรย์ไฟโรไลซิส เป็นแผ่นกระจกสไลด์มีความกว้างและยาว 25 และ 75 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยนำกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดตามขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตน 10 นาที
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอล 10 นาที
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปอดคประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 3 รอบ
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2 การเตรียมฟิล์มบาง ZnO:B ด้วยวิธีการอัลตราโซนิคเพรย์ไฟโรไลซิสมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยชั่งสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรต ไดไฮเดรต ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 3.2929 กรัม และชั่งสารกรดบอริก (H_3BO_3) โดยใช้อัตราส่วน น้ำหนักของซิงค์อะซิเตรตไดไฮเดรต ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และกรดบอริก (H_3BO_3) ดังตารางที่ 3.1 และนำมารวมกัน โดยแสดงตัวอย่างการคำนวณดังต่อไปนี้

มวลโมเลกุลของธาตุ

C	=	12.01 g / mol
H	=	1.01 g / mol
O	=	16.00 g / mol
Zn	=	65.39 g / mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณปริมาณของ $C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$ ความเข้มข้น 0.1 โมล ในสารละลายปริมาณ 150 ml

$$C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O \text{ จำนวน 1 โมล มีน้ำหนักโมเลกุล} = (12.01)(4) + (1.01)(6) + (16.00)(4) + (65.39) + (1.01)(2)(2) + (16.00)(2) \text{ g} = 219.530 \text{ g}$$

$$\therefore C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O \text{ จำนวน 0.1 โมล} = (219.53)(0.1) \text{ g} = 21.953 \text{ g}$$

$$\text{สารละลาย 1000 ml มี } C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O \text{ จำนวน 0.1 โมล} = 21.953 \text{ g}$$

$$\text{สารละลาย 150 ml มี } C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O \text{ จำนวน 0.1 โมล} = \frac{(21.953)(150)}{1000} \text{ g} = 3.29295 \text{ g}$$

ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

- นำ $C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$ ที่คำนวณน้ำหนักแล้วผสมเข้ากับสารเจือ H_3BO_3
- ทำการละลายสารที่ผสมแล้วใน CH_3OH (Methyl Alcohol) ให้ได้ปริมาตร 150 ml

การคำนวณปริมาณของสารเจือ [B]/[Zn]

$$(\text{ปริมาณของ } C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O) (\text{เปอร์เซ็นต์การเจือของสารประกอบโบรอน}) / 100$$

โดยได้แสดงปริมาณของสารตั้งต้นที่ได้จากการคำนวณไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นซิงค์อะซิเตรตไดไฮเดรต ($C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$)

และสารที่เจือกรดบอริก (H_3BO_3) ณ ที่เปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ

[B]/[ZnO] wt%	ปริมาณสารตั้งต้น	ปริมาณสารเจือ
(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	$C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$ (g)	H_3BO_3 (g)
0	3.2929	0.0000
1	3.2929	0.0329
3	3.2929	0.0987
5	3.2929	0.1646
7	3.2929	0.2305
9	3.2929	0.2963
15	3.2929	0.4939

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีการใช้งานในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปยังหน่วยงานอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

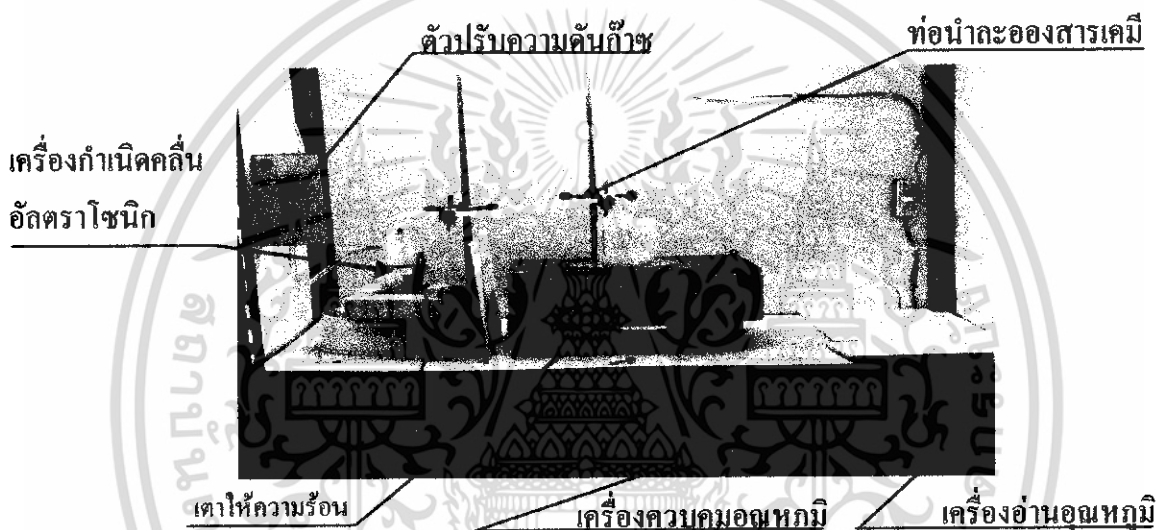
2. เติมน้ำที่ได้จากข้อที่ 1 และเมทานอล (C_2H_5OH) ในบีกเกอร์เพื่อให้ได้ปริมาตรรวมเป็น 125 มิลลิลิตร

3. นำกระจกสไลด์ที่ทำความสะอาดแล้วจำนวน 3 แผ่นมาวางบนแผ่นสแตนเลสบนเตาให้ความร้อนแล้วนำแก้ววือชมาครอบ โดยให้อุณหภูมิกับแผ่นรองรับ $400^{\circ}C$ โดยการปรับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

4. นำสารละลายที่ได้มาบรรจุลงในท่อนำก๊าซปริมาณ 10 – 15 มิลลิลิตร ทุก ๆ 2 นาที

5. ปล่อก๊าซไนโตรเจนไปในท่อนำไอสเปรย์

6. เปิดเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกสเปรย์ไฟโรไลซิสเป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไฟโรไลซิส

- ได้นำฟิล์มบาง ZnO และฟิล์มบาง $ZnO:B$ ที่ความเข้มข้นในการเจือที่ระดับต่าง ๆ มาทำการศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์ดังต่อไปนี้
- การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกโตรมิเตอร์ ของ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์
- การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400
- การวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 1,000 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ในย่านความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (UV-VIS-NIR Spectrophotometer) ของ Shimadzu รุ่น 3101PC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ดังนี้
 - อิเล็กโตรมิเตอร์ ของ Keithley รุ่น 236 Source Measure Unit
 - มัลติมิเตอร์ของ Digicon รุ่น DM-810A
 - แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงปรับค่าได้ของ Dolphin Electronic
 - กาวเงินนำไฟฟ้า
 - สายไฟ

- วัดปรากฏการณ์ฮอลล์โดยใช้อุปกรณ์ดังนี้
 - มัลติมิเตอร์รุ่น 8842A ของบริษัท Fluke
 - เครื่องวัดสนามแม่เหล็กพร้อมหัววัดของ Phywe
 - แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงค่าสูงของ Electronic Measurement Inc.
 - มัลติมิเตอร์ของ Digicon รุ่น DM-810A
 - แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงปรับค่าได้ของ Dolphin Electronic
 - กาวเงินนำไฟฟ้า
 - สายไฟ

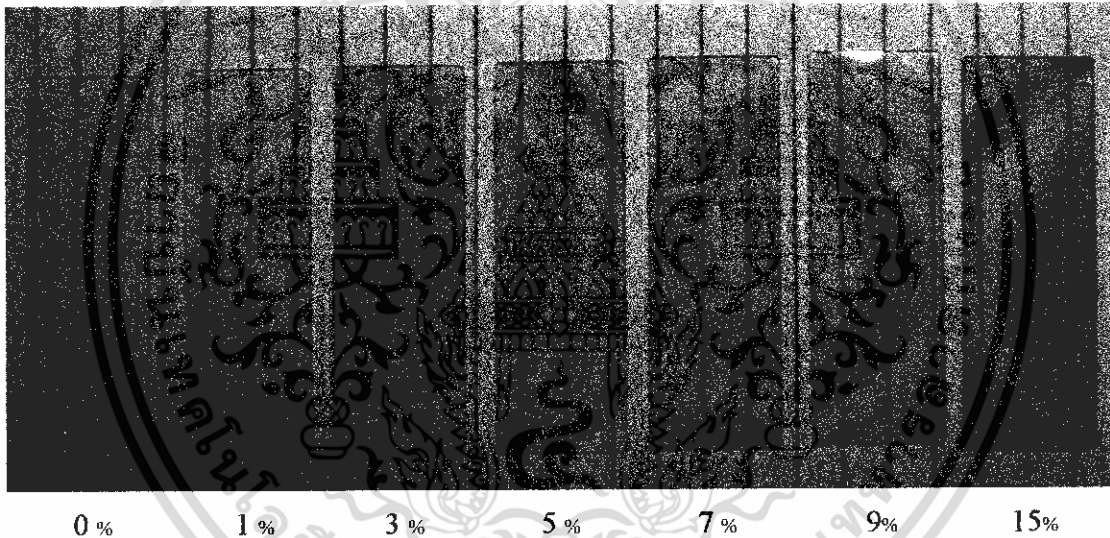
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้

จากการสังเกตการเตรียมฟิล์มบาง ZnO และ ฟิล์มบาง ZnO:B ที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] 1, 3, 5, 7, 9 และ 15% ตามลำดับ โดยวิธีการอัตราราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิส เมื่อไม่มีการแอลนิกพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีการยึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดี โสและมีสีรุ้ง ซึ่งมีความเรียบสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1

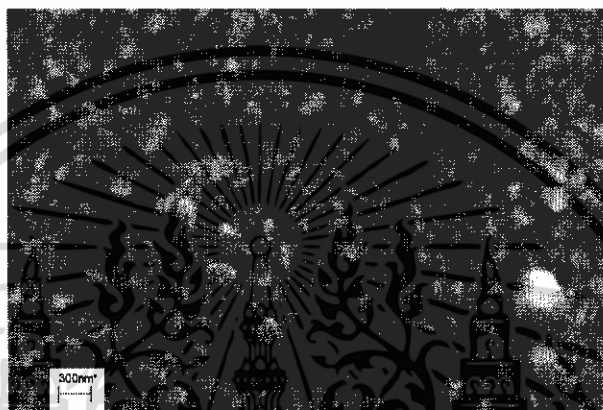


รูปที่ 4.1 แสดงภาพฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัตราราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] wt % ต่าง ๆ โดยใช้เวลาในการพ่น 30 นาทีเท่ากัน เมื่อไม่มีการแอลนิก

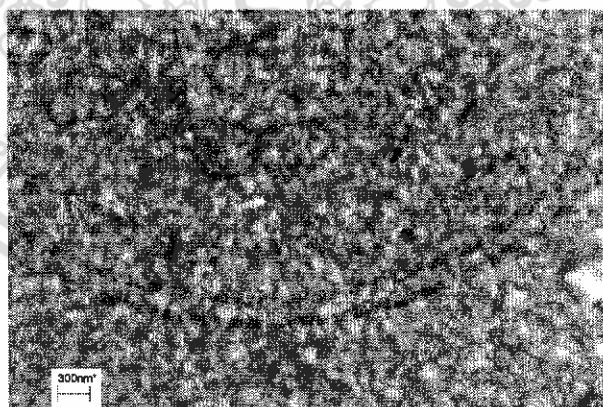
4.2 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างเชิงพื้นผิว

ได้ทำการศึกษาโครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง ZnO:B ที่เตรียมด้วยวิธีการอัตราราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิส ที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] wt % ต่าง ๆ กัน โดยใช้เวลาในการพ่น 30 นาทีเท่ากันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากผลการศึกษาโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบาง ZnO และ ZnO:B ซึ่งที่เราให้ความสนใจในระดับการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

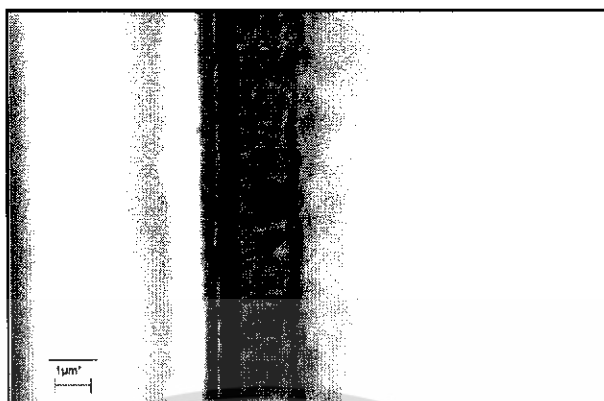
เจือที่ที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] wt 5% โดยจะนำมาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของเกรนนั้นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบาง ZnO นั้นมีลักษณะเกรนที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบและประกอบไปด้วยเกรนที่มีขนาดแตกต่างกัน ในขณะที่ฟิล์มบาง ZnO:B 5% ดังแสดงในรูปที่ 4.3 นั้นมีลักษณะเกรนที่มีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไฟโรไลซิสที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] wt 0 % ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาที เมื่อไม่มีการเอกลนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



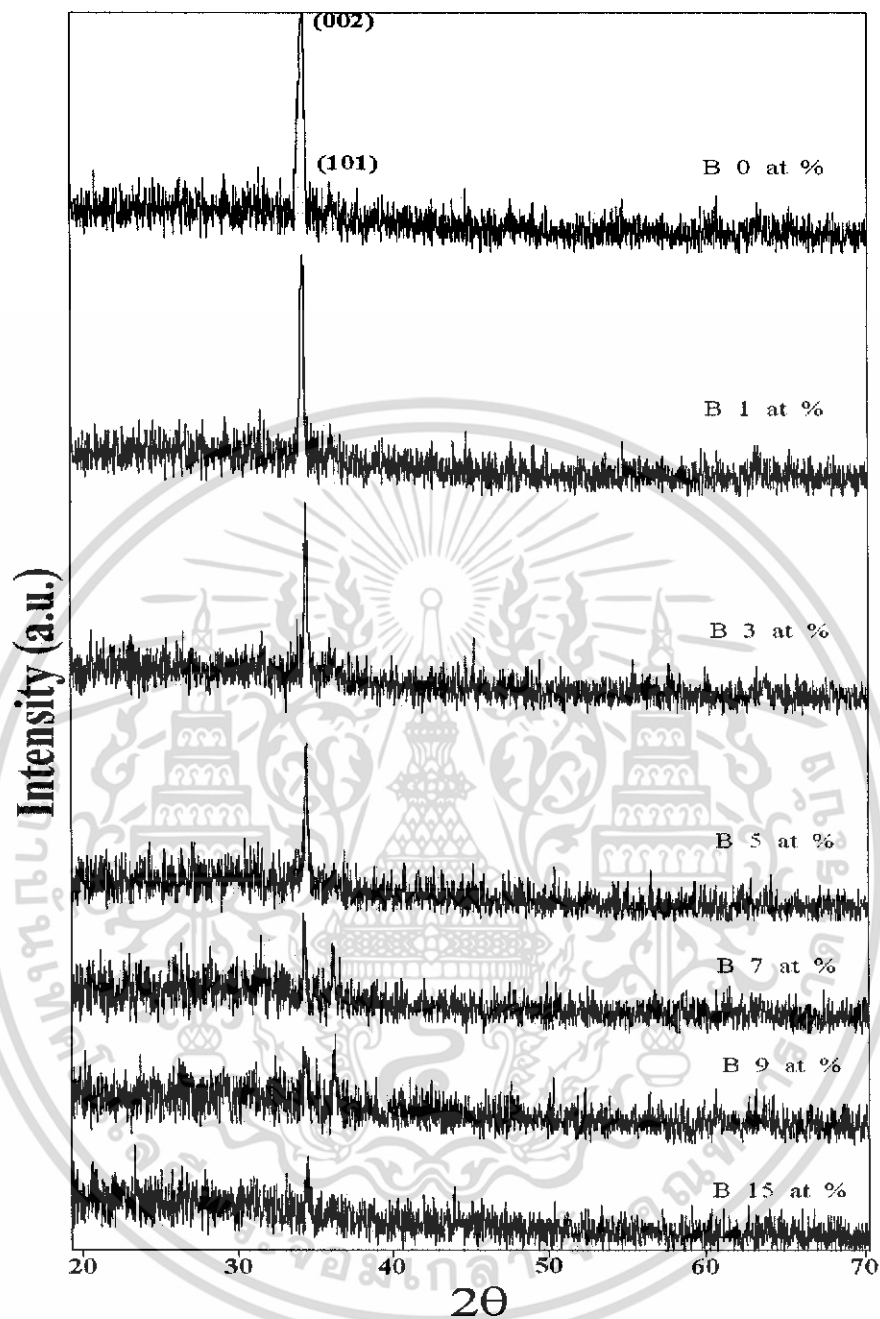
รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบาง ZnO เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไฟโรไลซิสที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] wt 5 % ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาที เมื่อไม่มีการเอกลนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิสโดยไม่มีการเจือโบรอน แบบภาพตัดขวางเพื่อวัดความหนาของฟิล์มบางที่ใช้เวลาพ่น 30 นาที เมื่อไม่มีการแอลนีสจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากต้องการทราบถึงลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาครวมถึงพิสูจน์ว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นเป็นสารประกอบ ZnO หรือไม่ ดังนั้นจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาลักษณะเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อศึกษาค่าแห่งของพิกที่ปรากฏและนำไปเปรียบเทียบกับค่าแห่งพิกจากไฟล์มาตรฐาน เพื่อพิจารณาว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้น มีลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบใด โดยในรูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง ZnO และฟิล์มบาง ZnO:B เมื่อไม่มีการแอลนีสที่มุม 2θ 20° - 70° ปรากฏว่าฟิล์มบาง ZnO และฟิล์มบาง ZnO:B จะปรากฏระนาบ (002) ที่มุม 2θ ประมาณ 34°

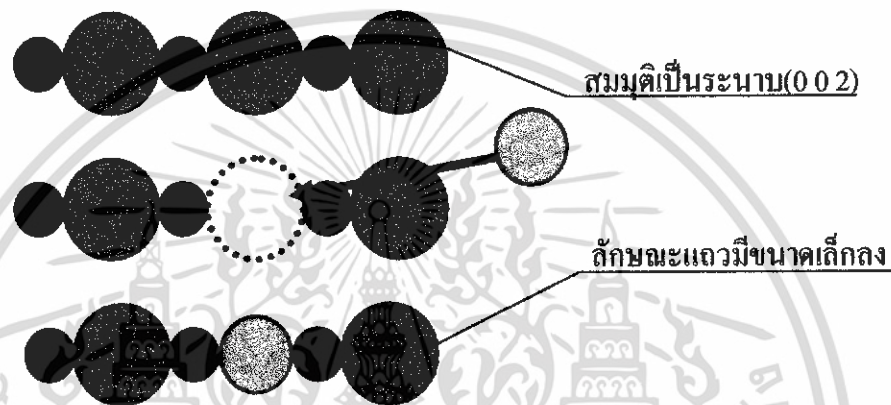


รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีอัลตราโซนิกสเปร์ย์ไฟโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 0, 1, 3, 5, 7, 9 และ 15% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนีส

จะสังเกตเห็นว่า ZnO ที่ไม่ได้เจือโบรอน ระนาบ (0 0 2) จะปรากฏอย่างชัดเจน แต่เมื่อมีการเจือโบรอนเข้าไป ระนาบ (0 0 2) จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยที่การเจือ 7% จะทำให้เกิดระนาบ (1 0 1) ขึ้นที่มุม 2θ ประมาณ 36° ซึ่งใกล้กับระนาบ (0 0 2) ในการเจือมากกว่า 7% นั้นพีคจะลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในการเจือที่ 15% จะพบว่าระนาบผลึกนั้นจะมีปรากฏออกมาน้อยลง ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากความเครียดที่เกิดจากขนาดที่แตกต่างกันของไอออนของ Zn กับ B (Ionic Radius Zn = 0.83 \AA , B = 0.2 \AA)

พิจารณาอะตอมใหญ่และเล็กวางสลับกันในโครงผลึก แต่เมื่อนำอะตอมขนาดใหญ่ออกแล้วใส่อะตอมที่เล็กลงไปแทนจะเกิดช่องว่างขึ้นเมื่อจับมาชิดกันแล้วขนาดของแถวจะเล็กลงหมายความว่าโครงผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเห็นได้จากผลการทดลอง



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะระนาบของผลึกที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

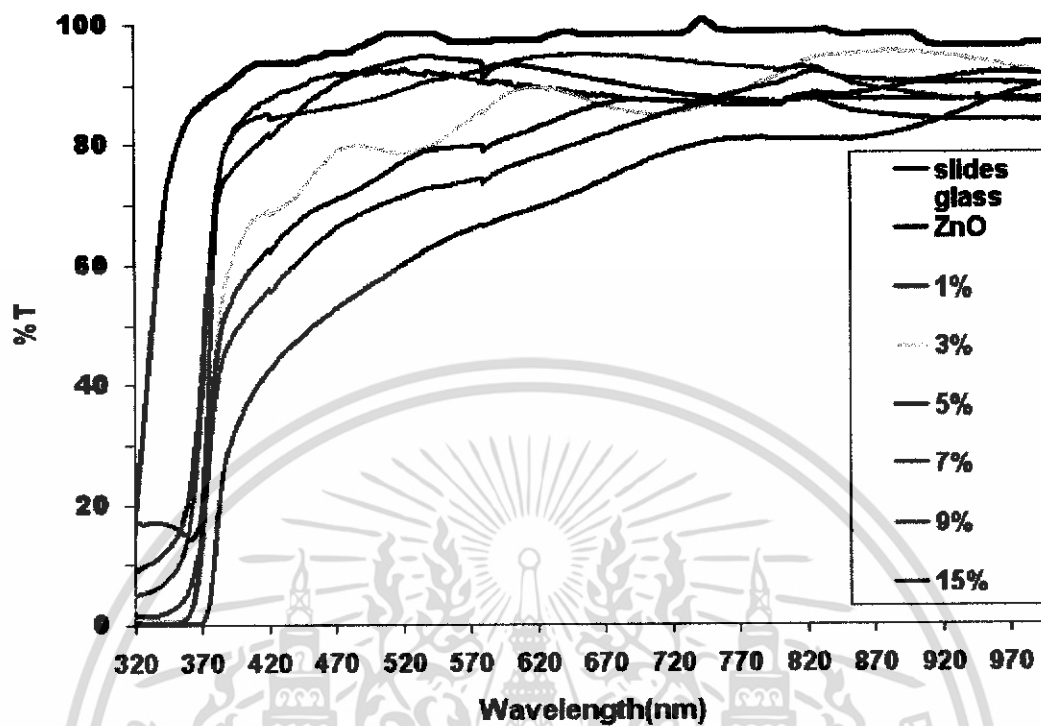
นอกจากนี้ได้คำนวณหาค่าขนาดของเกรนจากค่า FWHM โดยใช้สมการที่ 2.4 ดังแสดงค่าที่ได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดเกรนได้จากการคำนวณตามสมการที่ 2.4 ของฟิล์มบาง ZnO:B ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิก สเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 0, 1, 3, 5, 7, 9 และ 15% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาที เมื่อไม่มีการแอลนีส

สารตัวอย่าง	ขนาดเกรนที่คำนวณได้จาก FWHM (10^{-9} เมตร)
ZnO	85
ZnO:B (1 wt%)	70
ZnO:B (3 wt%)	60
ZnO:B (5 wt%)	49
ZnO:B (7 wt%)	45
ZnO:B (9 wt%)	44
ZnO:B (15 wt%)	41

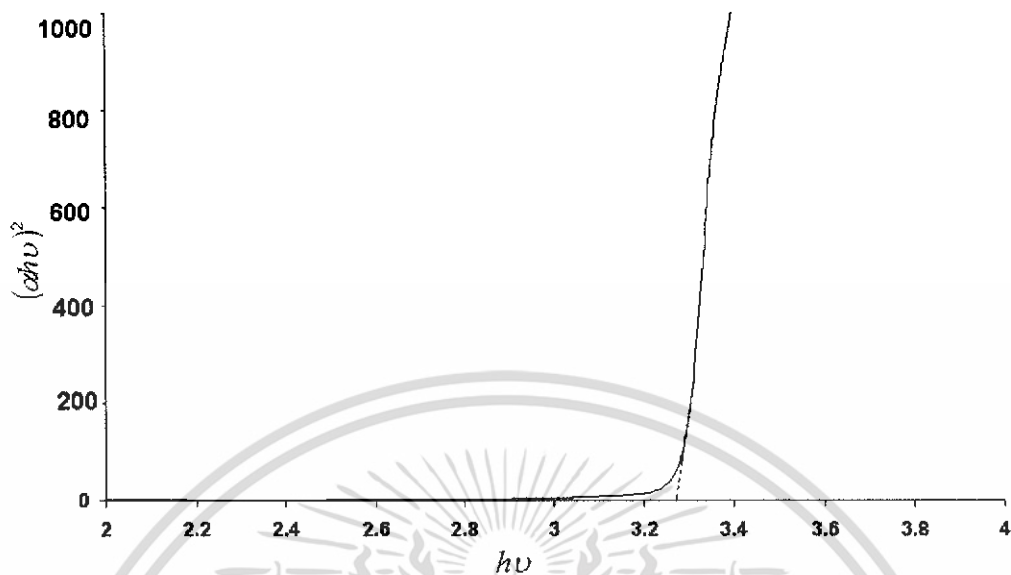
4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

การศึกษากการส่งผ่านของฟิล์มบาง ZnO และฟิล์มบาง ZnO:B ที่มีการเจือโบรอนในระดับที่ต่างกัน สามารถตรวจสอบด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลแบบดับเบิลบีมสเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ จัสโก้ 7800 โดยเลือกค่าความยาวคลื่นในช่วง 300-1,000 นาโนเมตร ปรากฏว่าฟิล์มบาง ZnO ที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] 0, 1, 3, 5, 7, 9 และ 15% เมื่อไม่มีการแอลนีสสามารถส่งผ่านแสงได้ในที่ความยาวคลื่นประมาณ 360 nm ซึ่งสามารถส่งผ่านแสงได้ดีในทุกค่าความเข้มข้นของการเจือ โดยพบว่าเมื่อมีระดับเปอร์เซ็นต์การเจือโบรอนมากขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] wt 15% จะมีการส่งผ่านแสงได้มาก ดังแสดงในรูปที่ 4.8

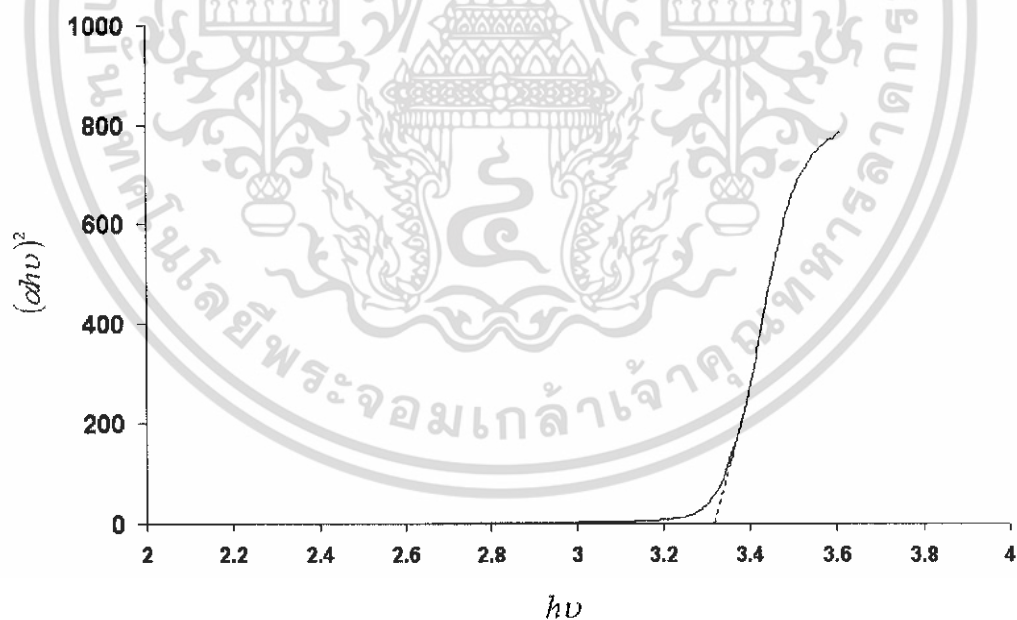


รูปที่ 4.7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปร์ย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 0, 1, 3, 5, 7, 9 และ 15% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต

และได้นำข้อมูลจากรูปที่ 4.7 ไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง ZnO:B ที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 0,1,3,5,7,9 และ 15% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต

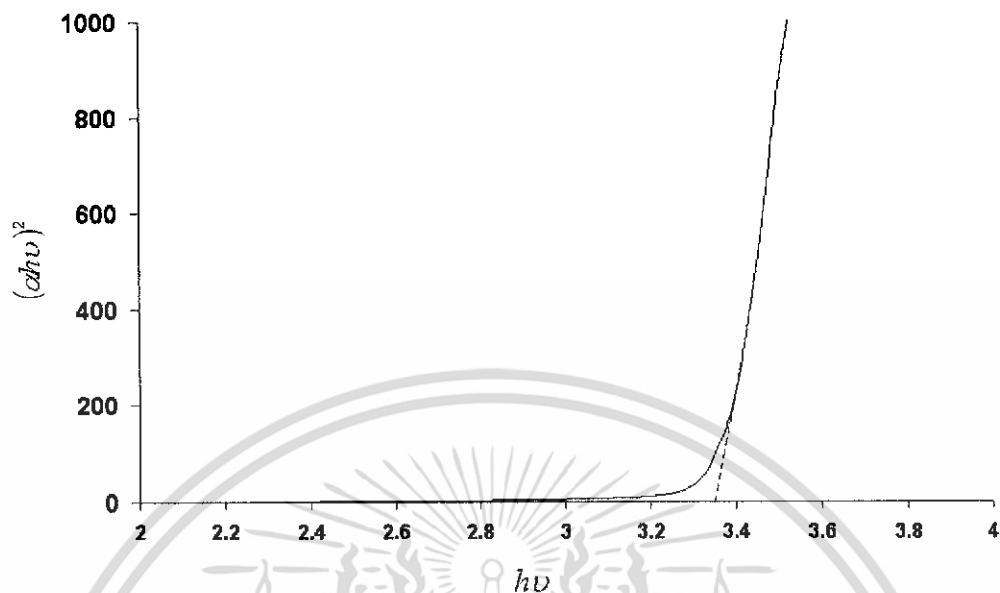


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปร์ย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 0wt% ที่ใช้เวลาดำเนิน 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต

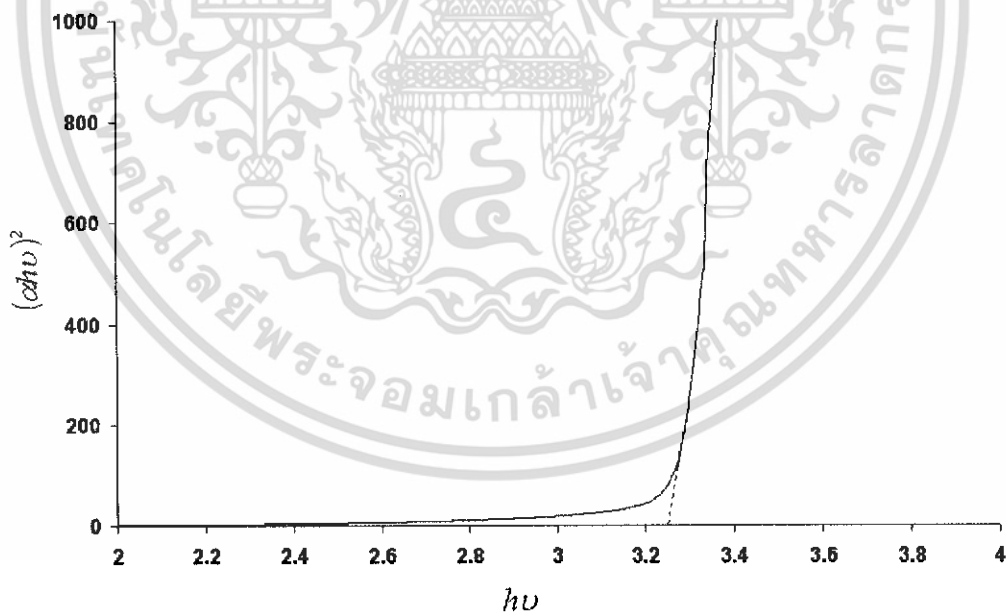


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปร์ย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 1wt% ที่ใช้เวลาดำเนิน 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

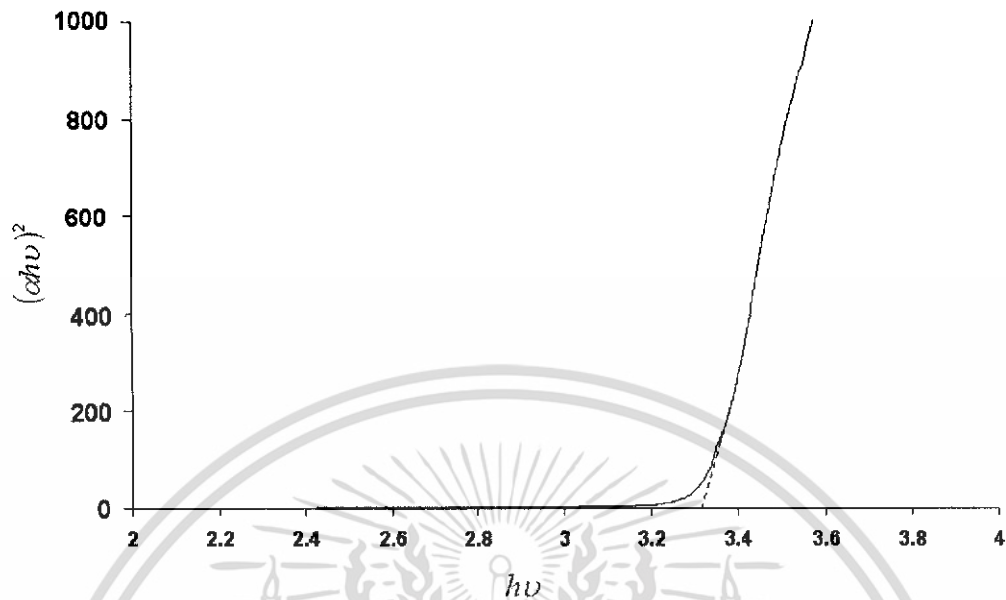


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 3wt% ที่ใช้เวลาดำเนิน 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอตนิล

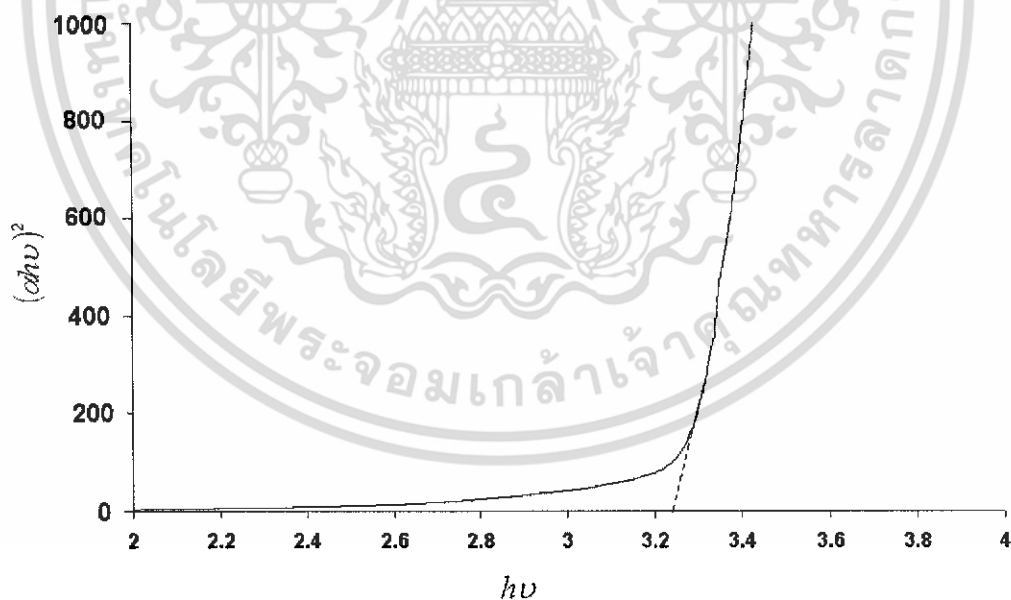


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 5wt% ที่ใช้เวลาดำเนิน 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอตนิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

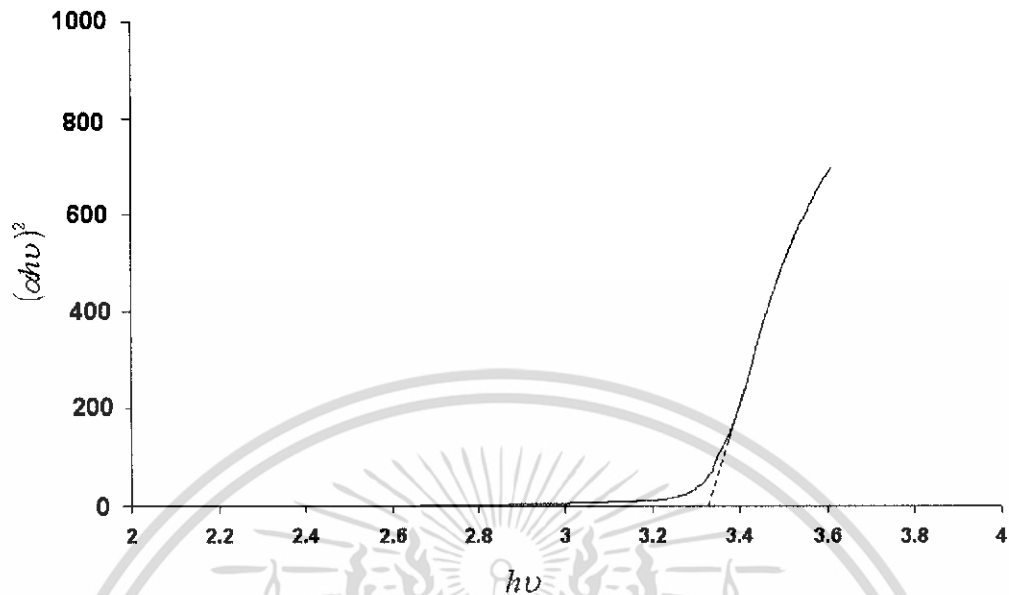


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 7wt% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 9wt% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิกสเปรย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 15wt% ที่ใช้เวลาพ่น 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนีส

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv

%[B]/[Zn]	E_g (eV)
Slide glass	4.00
ZnO	3.27
ZnO:B (wt1%)	3.27
ZnO:B (wt3%)	3.33
ZnO:B (wt5%)	3.34
ZnO:B (wt7%)	3.35
ZnO:B (wt9%)	3.37
ZnO:B (wt15%)	3.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

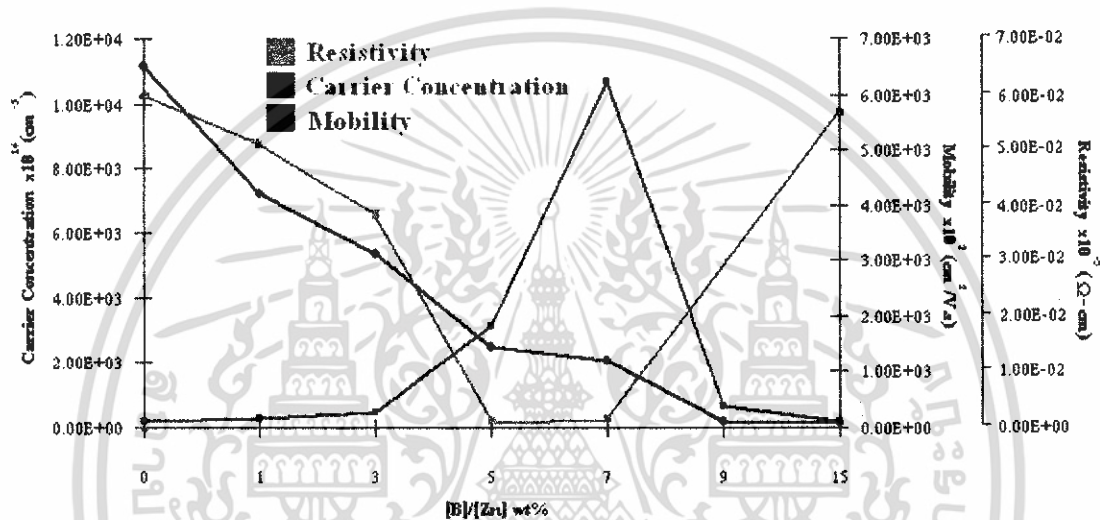
ได้ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง ZnO ด้วยวิธีการแวนเดอร์เพอร์ เพื่อวัดปริมาณพาหะข้างมากและสภาพคล่องโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่า ฟิล์มบาง ZnO:B สภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงโดยมีค่าต่ำสุดเมื่อทำการเจือที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าความต้านทานแผ่นเท่ากับ $3.65 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ และ $1.42 \times 10^2 \Omega/\text{sq}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะสอดคล้องกับปริมาณพาหะข้างมาก เมื่อปริมาณพาหะข้างมากเพิ่มขึ้น สภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การเจือ ในขณะที่ปริมาณพาหะข้างมากเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลทำให้สภาพคล่องมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงเมื่อมีการเจือด้วยโบรอน และเมื่อปริมาณการเจือมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักค่าความต้านทานแผ่นจะเริ่มมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อปริมาณพาหะข้างมากเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพคล่องมีค่าลดลง อีกทั้งผลการทดลองนี้ยังสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้ผ่านการตีพิมพ์และเผยแพร่มาแล้ว

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมวิธีการอัตรารังสีไอออนที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของความเข้มข้น [B]/[Zn] 0, 1, 3, 5, 7, 9 และ 15% ที่ใช้เวลาดำเนินการ 30 นาที เมื่อไม่มีการแอลนีส

สมบัติทางไฟฟ้า	ปริมาณของสารเจือ [B]/[Zn] (wt.%)						
	0	1	3	5	7	9	15
ความต้านทานแผ่น $\times 10^2 (\Omega/\text{sq})$	72	66	44	1.42	3.15	36	58
สภาพต้านทานไฟฟ้า $\times 10^{-3} (\Omega\text{-cm})$	51.2	45.6	35.1	1.5	36.5	29.0	47.1
สภาพคล่องพาหะ $\times 10^2 (\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec})$	65.20	42.10	31.20	14.50	12.13	0.96	0.83
ปริมาณพาหะข้างมาก $\times 10^{16} (\text{cm}^{-3})$	165	287	480	3150	10700	6500	182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ค่าสภาพคล่องพาหะและ ปริมาณพาหะข้างมาก ทำให้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่กล่าวมาได้ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยพบว่า ในการเตรียมฟิล์มบาง ZnO ด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปร์ย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้นของ [B]/[Zn] wt% ต่าง ๆ นั้น มีความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดอยู่ที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] wt 5% คือ ที่ค่า สภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $1.5 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$, ค่าสภาพคล่องพาหะเท่ากับ $14.5 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ และ ปริมาณพาหะข้างมากเท่ากับ $3.150 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$



รูปที่ 4.15 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธีการอัลตราโซนิคสเปร์ย์ไพโรไลซิสที่เจือด้วยความเข้มข้น [B]/[Zn] 0, 1, 3, 5, 7, 9 และ 15% ที่ใช้เวลานาน 30 นาทีเมื่อไม่มีการแอลนิต

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการเตรียมฟิล์มบาง ZnO:B โดยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิสที่ระดับความเข้มข้นของสารเจือในระดัต่าง ๆ โดยให้อุณหภูมิกับฐานรอง ประมาณ 400 °C และใช้เวลาในการเตรียม 30 นาที พบว่าฟิล์มบางที่ได้นั้นติดแน่นกับแผ่นรองรับและมีความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น จากการมองด้วยตาเปล่าฟิล์มจะมีลักษณะใส สีออกสีรุ้ง เมื่อนำไปตรวจสอบคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบางพบว่า จากการศึกษาคโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟิล์มที่เตรียมที่อัตราส่วนของ [B]/[Zn] ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มีระนาบการเลี้ยวเบน (002) เด่นชัดที่สุดที่ความเข้มข้น [B]/[Zn] 0wt% แต่เมื่อเราเพิ่มปริมาณการเจือพบว่าระนาบผลึกเกิดความไม่เป็นสัดส่วนทางเคมี (non-stoichiometric) ทำให้ระนาบ (002) มีค่าลดลง จากการคำนวณหาค่าขนาดของเกรนพบว่าขนาดของเกรนอยู่ในช่วง 41-85(nm)

จากการศึกษาคโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าฟิล์มบาง ZnO ที่ไม่ได้ทำการเจือมีขนาดโตและมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เมื่อทำการเจือโบรอนลงในฟิล์มบาง ZnO พบว่าเกรนมีขนาดเล็กลงและมีความสม่ำเสมอมากขึ้นและขนาดของเกรนมีค่าประมาณ 100 nm และเมื่อตรวจสอบความหนาของฟิล์มบาง ZnO จากภาพตัดขวางพบว่ามีความหนา 1.2 μm

จากการศึกษาการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm พบว่าฟิล์มบาง ZnO ที่ไม่มีการแอนนिलมีค่าการส่องผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 360 nm และเมื่อเจือโบรอนเพิ่มขึ้น พบว่าขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลงซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองของ Burstein-Moss [15] เมื่อนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจะอยู่ในช่วง 3.27-3.38 eV โดยฟิล์มบาง ZnO ที่มีความเข้มข้นของ [B]/[Zn] 15wt% มีค่าช่องว่างแถบพลังงานมากที่สุดเท่ากับ 3.38 eV

จากการวัดค่าสภาพต้านไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดอยู่ในช่วงระดับ $1.5-36.5 \times 10^{-3} \Omega - \text{cm}$ ที่ความเข้มข้นของ [B]/[Zn] 5-7 wt% และจากการตรวจสอบฟิล์มบาง ZnO ด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์พบว่าปริมาณพาหะข้างมากและสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางที่มีความเข้มข้นของ [B]/[Zn] 7 และ 5 wt% มีค่าสูงสุดเท่ากับ $1.07 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ และ $14.50 \times 10^2 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{sec}$ ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่าฟิล์มบาง ZnO ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจือโบรอนด้วยความเข้มข้น 5-7wt% เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบาง ZnO:B ที่เตรียมด้วยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิสพบปัญหา และเทคนิคบางประการที่สามารถนำมาปรับปรุงการทดลอง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพมากขึ้น มีดังนี้

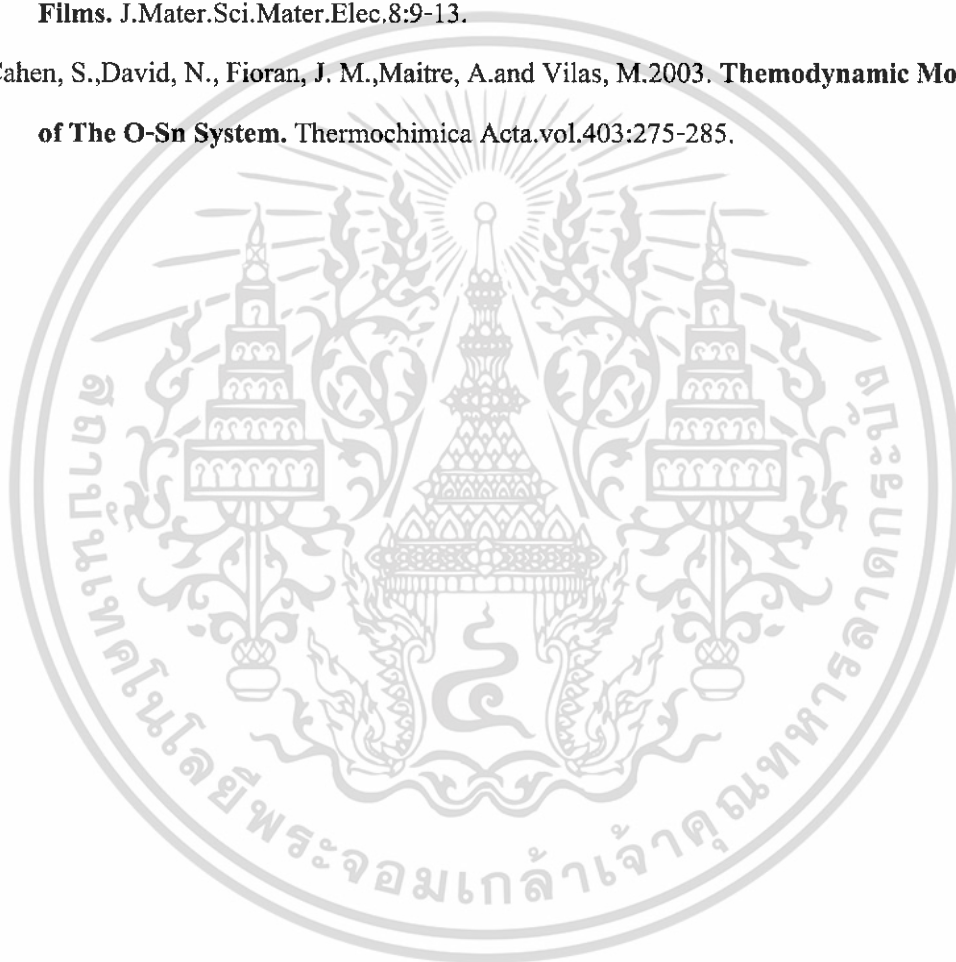
1. คุณภาพของฟิล์มขึ้นอยู่กับกระบวนการพ่นสารละลายเคมี ต้องมีอัตราที่คงที่ที่ไม่ควรจะพ่นสารเร็วหรือช้าเกินไป
2. ควรให้อุณหภูมิของฐานรองมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วแผ่นและอุณหภูมิของฐานรองไม่ควรเกิน 400 °C เนื่องจากถ้าอุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูงเกินไปจะทำให้ฟิล์มบางมีเกรนขนาดเล็ก ขอบพร่องของผลึกมีปริมาณมากและมีผงฝุ่นตะกอนปกคลุมที่บริเวณผิวหน้า
3. ควรนำฟิล์มบางที่ได้ไปแอลกอฮอล์ในภายใต้บรรยากาศของธาตุไนโตรเจน เพราะทำให้ระนาบผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Jun-Liang Zhao , Xiao-min Li , Ji-Ming Bian , Wei-Dong Yu , Can-Yun Zhang , 2005 ,
Growth of nitrogen-doped p-type ZnO films by spray pyrolysis and their electrical and optical properties , **Journal of Crystal Growth 280 (2005) 495-501**
2. M.A. Lucio-Lopez , M.A. Luna-Arias , A.Maldonado , M. de la L. Olvera , D.R. Acosta ,
Preparation of conducting and transparent indium-doped ZnO thin films by chemical spray , 2005 , **Solar Energy Materials and Solar Cells**
3. Jiming Bian , Xiaomin Li , LiDong Chen , Qin Yao , 2004 , Properties of undoped n-type ZnO film and N-In codoped p-type ZnO film deposited by ultrasonic spray pyrolysis ,
Chemical Physics Letter 393 (2004) 256-295
4. งามนิษฐ์ แก้วแดง , จิตินัย แก้วแดง , ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ , 2543 , การเตรียม และศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ , รายงานเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5. Jin-Hong Lee , Byung-Ok Park , 2003 , Characteristics of Al-doped ZnO thin films obtained by ultrasonic spray pyrolysis: effect of Al doping and an annealing treatment , **Materials Science and Engineering B 106 (2004) 242-245**
6. Sze,S.M., in **Physics of Semiconductor Devices** , 2nd ed., pp.8-11 , John Wiley & Sons Inc., New York , 1981.
7. Kittel, C .,in **Introduction to Solid State Physics** , 4 th ed., pp.4-32, 46-48, 56-60, 364-365, 540-552, 611-612, John Wiley & Sons Inc., New York 1971
8. สิงห์เดช แดงจวง, "การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเทคนิคการเคลือบแบบออบสาลละลายเคมี", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539
9. Abelas,F., in **Optical Properties of Solids** , North-Holland,London, 1972,pp23-40.
10. Runyan , W.R., in **Semiconductor Measurement and Instrumentation**, pp.67-91 , McGraw-Hill , Bombay , New York , 1975.
11. อารีย์ วิเชียรฉาย เครื่องมือและการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ. เอกสารประกอบการเรียน คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Garadkar,K.M.;Hankara,P.P.and Patil R.K.1999.**Effect Of Indium Doping on Structural, Optical and Electrical Propertical Properties of Cd_{0.95}Hg_{0.05}S Thin Films.**Meter.Chen.Phy.58.:64-70.
13. Ramaiah.K.S. 1999. **Electrical Properties of In Doped CdS Thin Films.** J.Mater.Sci.Mater.Elec. 10:291-294.
14. Gunal,I.and Prarlak,M.1997. **Current Transport Mechanisms in Low Resistive CdS Thin Films.** J.Mater.Sci.Mater.Elec.8:9-13.
15. Cahen, S.,David, N., Fioran, J. M.,Maitre, A.and Vilas, M.2003. **Themodynamic Modeling of The O-Sn System.** Thermochimica Acta.vol.403:275-285.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 77-191		Radiation = 1.540600		Quality: High							
Zn O		<i>2th</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>					
		31.770	57	1	0	0					
		34.442	44	0	0	2					
Zinc Oxide		36.253	100	1	0	1					
		47.539	23	1	0	2					
		56.603	32	1	1	0					
		62.864	29	1	0	3					
		66.380	4	2	0	0					
		67.963	23	1	1	2					
		69.100	11	2	0	1					
<i>Lattice:</i> Hexagonal	<i>Mol.weight</i> = 81.38	72.562	2	0	0	4					
<i>S.G.:</i> P63mc(186)	<i>Volume[CD]</i> = 47.62	76.955	4	2	0	2					
	<i>Dx</i> = 5.675	81.370	1	1	0	4					
<i>a</i> = 3.24982		89.607	7	2	0	3					
		92.784	3	2	1	0					
		95.304	6	2	1	1					
		98.613	4	1	1	4					
<i>c</i> = 5.20661		102.946	2	2	1	2					
	<i>Z</i> = 2	104.134	5	1	0	5					
		107.430	1	2	0	4					
		110.392	3	3	0	0					
		116.279	8	2	1	3					
		121.572	4	3	0	2					
		125.188	1	0	0	6					
ICSD COLLECTION CODE : 039177		133.932	3	2	0	5					
TEMPERATURE FACTOR : ATF		136.520	1	1	0	6					
REMARKS FROM ICSD : REM	TEM 930.	138.513	2	2	1	4					
		142.918	3	2	2	0					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายทศพล วงษ์ศุทธิภากร เกิดเมื่อวันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจาก โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ เตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2545

นายอิสระ ศรีธนะชัย เกิดเมื่อวันที่ 22 กันยายน พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจาก โรงเรียนจุฬาราชวิทยาลัย เชียงราย และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2545

นายอุดมโชค ชันธหัตถ์ เกิดเมื่อวันที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจาก โรงเรียนราชดำริ และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2545